

УДК: 629.7.018

Применение обобщенной характеристики лучистого взаимодействия двух тел для оценки температурного влияния термобарокамеры на космический аппарат при проведении тепловакуумных испытаний

С.В. Залетаев¹, Н.А. Румынский¹, А.А. Басов², М.А. Клочкова², Г.Д. Федорук²

¹ АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»,
г. Королев, Московская область, 141070, Россия

² ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева»,
г. Королев, Московская область, 141070, Россия
e-mail: RumynskiyNA@tsniimash.ru, andrey.basov@rscf.ru

DOI: 10.34759/tpt-2020-12-6-282-288

Поступила в редакцию 01.06.2020

После доработки 25.06.2020

Принята к публикации 25.06.2020

Показана необходимость экспресс-оценки допустимости проведения тепловакуумных испытаний в выбранной термобарокамере. Введена обобщенная характеристика лучистого взаимодействия конструкции термобарокамеры и объекта испытаний в виде многопараметрической функции переоблученности. Описан метод проведения оценки температурного влияния термобарокамеры на объект испытаний для «холодных» режимов тепловакуумных испытаний с использованием введенной характеристики. Проведен анализ полученных аналитических зависимостей.

Ключевые слова: лучистое взаимодействие, коэффициент облученности, тепловой поток, степень черноты, криоэкран, термобарокамера, тепловакуумные испытания, фон камеры.

Введение

При создании современных космических аппаратов (КА) тенденция все более широкого применения конструкции негерметичных приборных отсеков, зачастую независимых друг от друга в тепловом отношении, видоизменила концепцию проведения наземной тепловой отработки изделий и их составных частей. Если до внедрения негерметичных спутниковых платформ тепловакуумные испытания с воспроизведением значимых в тепловом отношении факторов космического пространства рассматривались только как важный элемент экспериментальной отработки, то в настоящее время качественно спланированные тепловакуумные испытания летных образцов КА выполняют функцию комплексных приемосдаточных

(заключительных зачетных) испытаний. Рабочее место тепловакуумных испытаний превратилось в единственное в наземных условиях средство проверки работы и взаимовлияния систем КА в специфических условиях космического пространства. Выявленные при тепловакуумных испытаниях недочеты, неисправности или некорректность работы бортовых систем, механизмов и конструкции устранимы до пуска КА.

В связи с повышением роли тепловакуумных испытаний приобрела актуальность задача корректной экспресс-оценки допустимости проведения испытаний в конкретной термобарокамере (ТБК). Важным фактором, влияющим на выбор термобарокамеры, является размер ее рабочей зоны, точнее, соотношение определяю-

щих тепловой режим характерных размеров объекта испытаний и рабочей зоны ТБК.

В представленной работе приводится анализ факторов, влияющих на точность воспроизведения натуральных условий теплообмена КА в термобарокамере с позиции анализа ее геометрических и оптических характеристик. Также в работе дается оценка температурного влияния на КА дополнительных тепловых потоков от воздействия термобарокамеры.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу стационарного теплообмена для системы, содержащей N изотермических узлов, связанных только лучистыми связями. Уравнение баланса тепловых потоков в приближении серого тела [1] для узла с номером i имеет вид:

$$0 = \sum_{\substack{j=1..N \\ j \neq i}} k_{ij} \cdot \sigma \cdot (T_j^4 - T_i^4) + Q_i, \quad (1)$$

где k_{ij} – коэффициент лучистой связи между узлами i и j , м^2 ; $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ – постоянная Стефана–Больцмана, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; T_i , T_j – температуры соответствующих узлов, К ; Q_i – внутренняя тепловая нагрузка узла i , Вт .

Коэффициент лучистой связи между узлами i и j при условии, что излучение переносится в инфракрасном диапазоне спектра, определяется следующим соотношением:

$$k_{ij} = \varepsilon_i \cdot F_i \cdot B_{ij} = \varepsilon_j \cdot F_j \cdot B_{ji}, \quad (2)$$

где ε_i , ε_j – степени черноты соответствующих узлов; F_i , F_j – площади соответствующих узлов, м^2 ; B_{ij} – доля энергии, испущенной узлом i и поглощенной узлом j с учетом всевозможных переотражений.

В отличие от геометрических диффузных угловых коэффициентов φ_{ji} , определяющих «видимость» поверхности j поверхностью i , величина B_{ij} учитывает значения степеней черноты узлов рассматриваемой системы. Выражение (2) при этом также может быть записано с использованием диффузного углового коэффициента:

$$k_{ij} = \varepsilon_n \cdot F_i \cdot \varphi_{ij} = \varepsilon_n \cdot F_j \cdot \varphi_{ji},$$

где ε_n – приведенная степень черноты соответствующих узлов [2].

Весь тепловой поток, уходящий от узла i , можно разбить на три составляющих:

– доля потока, поглощенного другими узлами системы B_{ij} ,

– доля потока, после всех переотражений поглощенного самим узлом i , которую назовем переоблученностью и обозначим как B_i^{self} ,

– доля потока, вышедшего за пределы рассматриваемой лучистой системы, которую назовем внесистемными лучистыми потерями узла и обозначим как B_i^{inact} .

Для каждого узла системы указанные три составляющие связаны следующим соотношением:

$$\sum_{\substack{j=1..N \\ j \neq i}} B_{ij} + B_i^{self} + B_i^{inact} = 1. \quad (3)$$

Учитывая (2) и (3), уравнение (1) можно преобразовать к виду:

$$Q_i = \varepsilon_i \cdot F_i \cdot \sigma \times$$

$$\times \left[\left(1 - B_i^{inact} - B_i^{self} \right) \cdot T_i^4 - \sum_{\substack{j=1..N \\ j \neq i}} B_{ij} \cdot T_j^4 \right]. \quad (4)$$

Из анализа соотношения (4) следует, что при фиксированной внутренней тепловой нагрузке увеличение внесистемных лучистых потерь и переоблученности приводит к увеличению температуры узла. Исходя из этого можно сделать вывод, что при проведении тепловакуумной отработки реальных объектов неверный выбор параметров испытаний, влияющих на величину переоблученности объекта испытаний (геометрия ТБК, ориентация и расположение объекта в ТБК), затрудняет воспроизведение условий теплообмена объекта, соответствующих натурным условиям, и вносит неконтролируемую погрешность в результаты испытаний. Таким образом, одной из наиболее важных задач при подготовке тепловакуумных испытаний является проведение экспресс-оценки теплового влияния ТБК на объект испытаний.

Расчетная схема

Рассмотрим систему, содержащую два изотермических узла: криоэкран (КЭ) и объект испытаний (ОИ). Общий вид системы показан на рис. 1. Криоэкран включает в себя цилиндр радиусом r_2 и высотой l , основание и верхнюю крышку и представляет собой замкнутую поверхность. Температура криоэкрана поддерживается постоянной на уровне 77 К. Степень черноты криоэкрана принимается равной 0.9.

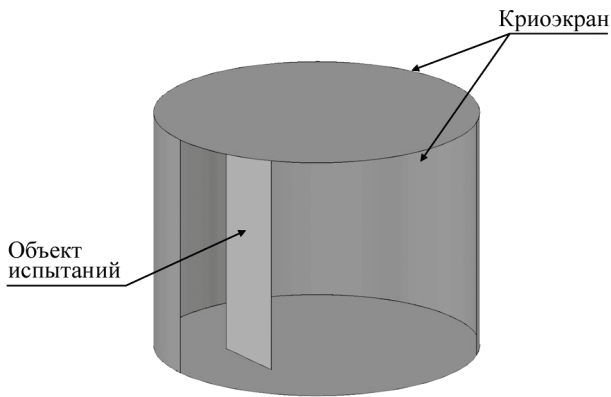


Рис. 1. Общий вид системы (вид в разрезе)

Объект испытаний моделируется плоской пластиной, установленной внутри цилиндрического криозкрана. Оптически активной является только одна из сторон пластины, вторая – «идеальный поглотитель» (все попадающее на поглотитель излучение исключается из расчета). Степень черноты оптически активной стороны поверхности принимается равной 0.9.

В настоящей статье рассматривается тепловая задача в квазидвумерной постановке, т.е. не учитывается влияние изменения соотношения между высотами криозкрана и объекта испытаний, высота последнего принимается равной высоте криозкрана. Таким образом, в описанной квазидвумерной системе основными параметрами, влияющими на величину коэффициента переоблученности, являются ширина пластины (параметр a), расстояние от центра криозкрана до объекта испытаний (параметр r_1), радиус и высота криозкрана (параметры r_2 и l соответственно), а также степени черноты поверхностей объекта испытаний и криогенного экрана.

Рассматриваемая система показана на рис. 2. Видно, что для узла ОИ эта система является замкнутой ($B_{ОИ}^{inact} = 0$), а для узла КЭ внесистемные лучистые потери являются ненулевыми, поскольку часть теплового потока попадает на неактивную сторону узла ОИ.

Для узла ОИ уравнение (1) принимает вид:

$$0 = k_{ОИ-КЭ} \cdot \sigma \cdot (T_{КЭ}^4 - T_{ОИ}^4) + Q_{ОИ}, \quad (5)$$

где $k_{ОИ-КЭ}$ – коэффициент лучистой связи между объектом испытаний и криозкраном, m^2 ; $Q_{ОИ}$ – внутренняя тепловая нагрузка объекта испытаний, Вт. Применяя к (5) соотношения (2) и (3) и переходя к удельным величинам,

$$\varepsilon_{ОИ} \cdot \sigma \cdot (1 - B_{ОИ}^{self}) \cdot (T_{ОИ}^4 - T_{КЭ}^4) = q_{ОИ}, \quad (6)$$

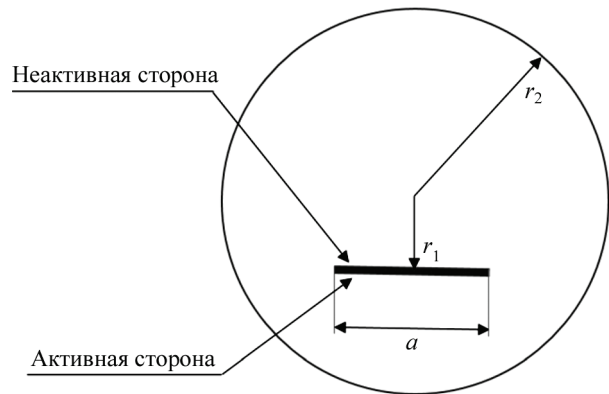


Рис. 2. Схема испытаний

где $q_{ОИ} = Q_{ОИ} / F_{ОИ}$ – удельная внутренняя тепловая нагрузка объекта испытаний, $Вт/м^2$.

Ранее было показано, что ненулевая величина переоблученности $B_{ОИ}^{self}$ приводит к увеличению значения температуры узла, т.е. для получения результатов тепловакуумных испытаний, максимально приближенных к летным, эту величину необходимо минимизировать. Для данной задачи это может быть записано следующим образом:

$$B_{ОИ}^{self} = f(\varepsilon_{ОИ}, \varepsilon_{КЭ}, a, r_1, r_2, l) \rightarrow \min. \quad (7)$$

Для ограниченного количества случаев взаимного расположения узлов существуют аналитические выражения для угловых коэффициентов и приведенных степеней черноты [2]. Для более сложных случаев используются численные методы, например, метод Монте-Карло, суммирование по треугольникам [3]. Однако даже для данной упрощенной задачи моделирования тепловакуумных испытаний, сформулированной в квазидвумерной постановке, поиск аналитической зависимости вида (7) не привел к положительному результату. При этом введение переоблученности как обобщенной характеристики лучистого взаимодействия пары ОИ–ТБК дает возможность провести общую оценку температурного влияния термобарокамеры на объект испытаний.

Оценка температурного влияния термобарокамеры

Для оценки влияния лучистых потоков от стенок термобарокамеры на температуру объекта испытаний можно сравнить ее с температурой, которую принимает данный объект во время летных испытаний в «холодном» режиме (при нулевых внешних тепловых потоках и де-

журной удельной внутренней тепловой нагрузке $q_{ОИ}$). Данное значение температуры $T_{ЛИ}$ определяется из соотношения:

$$\varepsilon_{ОИ} \cdot \sigma \cdot T_{ЛИ}^4 = q_{ОИ}. \quad (8)$$

Объединяя соотношения (6) и (8), получим:

$$\varepsilon_{ОИ} \cdot \sigma \cdot (1 - B_{ОИ}^{self}) \cdot (T_{ОИ}^4 - T_{КЭ}^4) = \varepsilon_{ОИ} \cdot \sigma \cdot T_{ЛИ}^4,$$

откуда

$$\begin{aligned} &\varepsilon_{ОИ} \cdot \sigma \cdot T_{ОИ}^4 - \varepsilon_{ОИ} \cdot \sigma \cdot T_{КЭ}^4 - \\ &- \varepsilon_{ОИ} \cdot \sigma \cdot B_{ОИ}^{self} \cdot (T_{ОИ}^4 - T_{КЭ}^4) - \\ &- \varepsilon_{ОИ} \cdot \sigma \cdot T_{ЛИ}^4 = 0. \end{aligned}$$

Введем величину дополнительного теплового потока dq , определяемого как

$$dq = \varepsilon_{ОИ} \cdot \sigma \cdot (T_{ОИ}^4 - T_{ЛИ}^4). \quad (9)$$

Данное выражение представляет собой дополнительный по отношению к летному «холодному» режиму тепловой поток, возникающий за счет влияния ТБК на объект испытаний. Из выражения (9) dq можно вычислить как сумму двух составляющих

$$\begin{aligned} dq &= \varepsilon_{ОИ} \cdot \sigma \cdot T_{КЭ}^4 + \\ &+ \varepsilon_{ОИ} \cdot \sigma \cdot B_{ОИ}^{self} \cdot (T_{ОИ}^4 - T_{КЭ}^4) = \quad (10) \\ &= dq_{КЭ} + dq_{self}, \end{aligned}$$

где $dq_{КЭ} = \varepsilon_{ОИ} \cdot \sigma \cdot T_{КЭ}^4$ – плотность потока от криоэкрана (так называемый «фон камеры»), а $dq_{self} = \varepsilon_{ОИ} \cdot \sigma \cdot B_{ОИ}^{self} \cdot (T_{ОИ}^4 - T_{КЭ}^4)$ – дополнительная величина плотности потока от самого объекта испытаний за счет многократных переотражений между ним и термобарокамерой, т.е. тепловой поток переоблученности. Перепишем выражение (6) в следующем виде:

$$\varepsilon_{ОИ} \cdot \sigma \cdot (T_{ОИ}^4 - T_{КЭ}^4) = q_{ОИ} / (1 - B_{ОИ}^{self}). \quad (11)$$

Тогда, используя выражение (11), выражение для dq_{self} можно записать как

$$dq_{self} = B_{ОИ}^{self} / (1 - B_{ОИ}^{self}) \cdot q_{ОИ}. \quad (12)$$

Таким образом, мы определили зависимость величины теплового потока переоблученности от величины удельной тепловой нагрузки на объект испытаний и величины переоблученности.

Отсюда также можно получить оценку приращения температуры при испытаниях, вызванную «фоном камеры» и тепловым потоком переоблученности. Пусть известны температура

криоэкрана $T_{КЭ}$, удельная тепловая нагрузка на объект испытаний $q_{ОИ}$, его степень черноты $\varepsilon_{ОИ}$, а также пусть получена оценка переоблученности объекта испытаний $B_{ОИ}^{self}$. Тогда из (8), (9)–(12) имеем

$$\varepsilon_{ОИ} \cdot \sigma \cdot (T_{ОИ}^4 - T_{ЛИ}^4) = dq_{КЭ} + dq_{self},$$

$$T_{ЛИ}^4 = q_{ОИ} / (\varepsilon_{ОИ} \cdot \sigma),$$

$$T_{ОИ}^4 = (dq_{КЭ} + dq_{self} + q_{ОИ}) / (\varepsilon_{ОИ} \cdot \sigma),$$

что после подстановок и упрощения дает общее выражение для температурного приращения

$$\begin{aligned} dT &= T_{ОИ} - T_{ЛИ} = \\ &= \sqrt[4]{T_{КЭ}^4 + q_{ОИ} / (\varepsilon_{ОИ} \cdot \sigma \cdot (1 - B_{ОИ}^{self}))} - \quad (13) \\ &- \sqrt[4]{q_{ОИ} / (\varepsilon_{ОИ} \cdot \sigma)}. \end{aligned}$$

Как видно из выражения (12), при $B_{ОИ}^{self} = 0$ тепловой поток переоблученности dq_{self} также становится нулевым. Из сказанного можно сделать вывод, что при $B_{ОИ}^{self} = 0$ выражение для температурного приращения от «фона камеры» принимает вид:

$$\begin{aligned} dT_{КЭ} &= \sqrt[4]{T_{КЭ}^4 + q_{ОИ} / (\varepsilon_{ОИ} \cdot \sigma)} - \quad (14) \\ &- \sqrt[4]{q_{ОИ} / (\varepsilon_{ОИ} \cdot \sigma)}. \end{aligned}$$

Полученная в (14) зависимость температурного приращения, вызванного «фоном камеры», от отношения $q_{ОИ} / \varepsilon_{ОИ}$ для стандартной для тепловакуумных испытаний температуры криоэкрана 77 К показана на рис. 3.

Из графика видно, что при фиксированной степени черноты объекта испытаний, уменьшение внутренней тепловой нагрузки приводит к увеличению температурного приращения от «фона камеры», причем зависимость носит не-

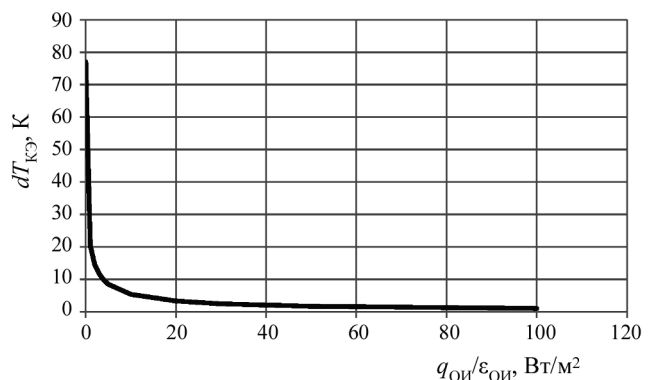


Рис. 3. Зависимость температурного приращения, вызванного «фоном камеры», от отношения $q_{ОИ} / \varepsilon_{ОИ}$ при $T_{КЭ} = 77 \text{ K}$

линейный характер: в предельном случае при нулевом тепловыделении объект испытаний принимает температуру криоэкрана.

Зависимость температурного приращения, вызванного «фоном камеры», от степени черноты объекта испытаний при различных значениях фиксированной внутренней тепловой нагрузки приведена на рис. 4. Видно, что увеличение внутренней тепловой нагрузки объекта испытаний приводит к уменьшению влияния изменения степени черноты объекта испытаний на величину температурного приращения.

Полученная в (13) зависимость температурного приращения от величины переоблученности при различных значениях $q_{ОИ} / \epsilon_{ОИ}$ для $T_{КЭ} = 77 K$ показана на рис. 5.

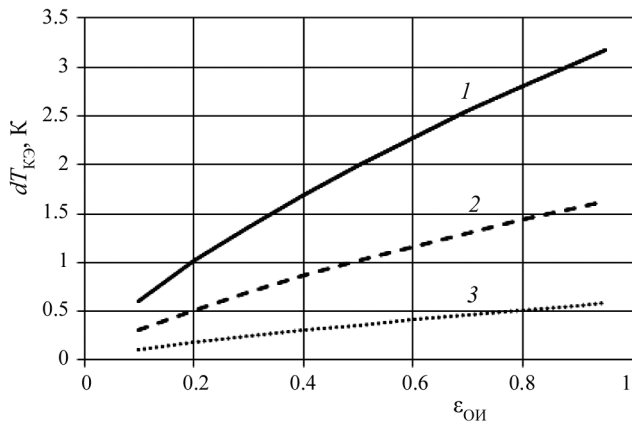


Рис. 4. Зависимость температурного приращения, вызванного «фоном камеры», от $\epsilon_{ОИ}$ при $T_{КЭ} = 77 K$ и внутренней тепловой нагрузке: 1 – 20 Вт/м²; 2 – 50; 3 – 200

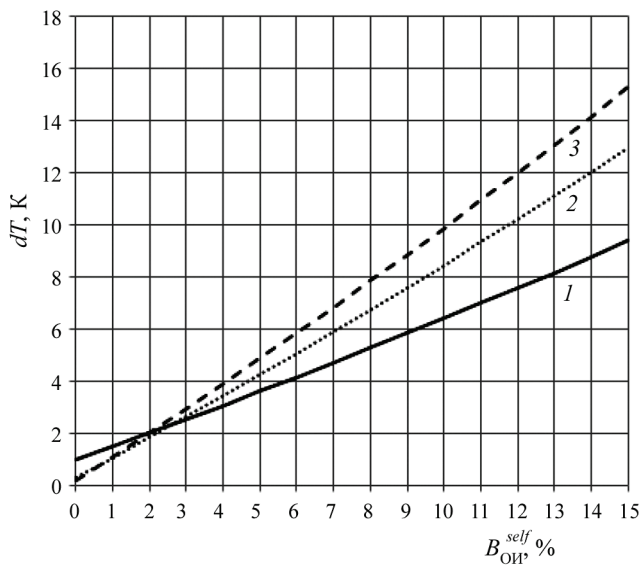


Рис. 5. Зависимость температурного приращения от величины переоблученности для различных $q_{ОИ} / \epsilon_{ОИ}$ при $T_{КЭ} = 77 K$ и внутренней тепловой нагрузке: 1 – 100 Вт/м²; 2 – 500; 3 – 1000

Учитывая зависимость, показанную на рис. 3, из рис. 5 видно, что с ростом внутреннего тепловыделения (при фиксированной степени черноты объекта) влияние переоблученности на температуру объекта испытаний также увеличивается. При этом стоит отдельно рассмотреть диапазон значений переоблученности, в котором температурное приращение уменьшается при увеличении внутреннего тепловыделения объекта испытаний. Этот эффект вызван тем, что в данном случае в силу малого значения $B_{ОИ}^{self}$ температурное приращение от «фона камеры» имеет больший порядок, чем повышение температуры, вызванное переоблученностью.

Обобщая проведенный анализ температурных приращений, вызванных влиянием ТБК, для «холодных» режимов испытаний можно предложить метод проведения экспресс-оценки допустимости проведения тепловакуумных испытаний в выбранной ТБК при известной величине переоблученности. Сначала проводится вычисление температурного приращения от «фона камеры» $dT_{КЭ}$ с помощью соотношения (14). Это дает возможность оценить неустранимое влияние камеры на объект испытаний. Далее с помощью (12) вычисляется отношение теплового потока переоблученности к внутренней тепловой нагрузке $dq_{self} / q_{ОИ}$ для оценки возможной минимизации влияния камеры в терминах теплового потока. Наконец, с помощью (13) вычисляется итоговое температурное приращение от ТБК для имеющейся внутренней тепловой нагрузки. В случае высокого значения переоблученности и попадания в зону роста температурной прибавки с ростом внутренней тепловой нагрузки специалист оценивает необходимость минимизации величины переоблученности доступными способами (например, изменение расстояния r_1 в рассматриваемой квазидвумерной постановке задачи) или делает вывод о непригодности выбранной ТБК для проведения тепловакуумных испытаний имеющегося объекта испытаний.

Выводы

Задача осуществления экспресс-оценки допустимости проведения тепловакуумных испытаний в выбранной термобарокамере может быть решена введением обобщенной характеристики лучистого взаимодействия термобарокамеры и объекта испытаний, названной переоблученностью.

Для «холодных» режимов тепловакуумных испытаний были выявлены зависимости дополнительных потоков от ТБК, наведенных на объект испытаний, и соответствующих им температурных приращений от величины переоблученности и характеристик объекта испытаний (внутренней тепловой нагрузки и степени черноты).

Обобщение анализа этих зависимостей позволило предложить метод проведения оценки температурного влияния ТБК на объект испытаний. При известной величине переоблученности данный метод показывает необходимость ее минимизации либо при отсутствии такой возможности позволяет сделать вывод о непригодности выбранной ТБК для проведения тепловакуумных испытаний имеющегося объекта испытаний. Таким образом, для практического применения предлагаемой экспресс-оценки допустимости проведения испытаний в выбранной термобарокамере требуется создание методики оценки значения многопараметрической функции переоблученности с применением более широкого спектра методов математического моделирования, что является темой дальнейших исследований авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спэрроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. М.: Энергия, 1971. 294 с.
2. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 936с.
3. Альтов В.В., Винокуров Д.К., Залетаев С.В., Копятевич Р.М., Саква Н.В. Программный комплекс «Вычислительная система «СОТР». ФГУП ЦНИИмаш, ФАП РКТ, инв. № 2151П, 2014 г.
4. Блох А.Г. Основы теплообмена излучением. М.: Госэнергоиздат, 1962. 331 с.
5. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
6. Адрианов В.Н. Основы радиационного и сложного теплообмена. М.: Энергия, 1972. 464 с.
7. Колесников А.В., Сербин В.И. Моделирование условий внешнего теплообмена космических аппаратов. М.: «Информация-XXI век», 1997. 170с.
8. 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. 267–275.
9. Залетаев В.М., Капинос Ю.В., Сургучев О.В. Расчет теплообмена космического аппарата. М.: Машиностроение, 1979. 208 с.
10. Козлов Л.В., Нусинов М.Д., Акишин А.И. и др. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды. М.: Машиностроение, 1971. 380 с.
11. Андрейчук О.Б., Малахов Н.Н. Тепловые испытания космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1982. 143 с.
12. Малоземов В.В. Тепловой режим космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1980. 232 с.
13. Финченко В.С., Котляров Е.Ю., Иванков А.А. Системы обеспечения тепловых режимов автоматических межпланетных станций. АО «НПО Лавочкина», 2018. 400 с.
14. Никитин П.В., Сотник Е.В. Катализ и излучение в системах тепловой защиты космических аппаратов. М.: «Янус-К», 2013. 336 с.

Application of the generalized two-body radiant interaction characteristic for estimation of the thermal vacuum chamber temperature effect on a space vehicle during thermal vacuum testing

S.V. Zaletaev¹, N.A. Ruminsky¹, A.A. Basov², M.A. Klochkova², G.D. Fedoruk²

¹ Central Research Institute for Machine Building, Korolev, Moscow region, 141070, Russia

² S.P. Korolev rocket and space corporation «Energia», Korolev, Moscow region, 141070, Russia
e-mail: RumynskiyNA@tsniimash, ruandrey.basov@rsce.ru

The work is dedicated to ground thermal test conducting of space vehicles and its components. Well-planned thermal vacuum tests (TVT) of spacecraft flight models serve as complex acceptance tests and provide performance and interaction tests of spacecraft systems in outer space conditions. So the task of thermal vacuum testing acceptability in the selected thermal vacuum chamber (TVC) rapid assessment becomes actual. The reradiation value role is shown in the steady-state heat exchange problem in a system with several isothermal nodes with radiation conductance. Further in the work the simplified quasi two-dimensional two-body radiation interaction problem in a system of a cryogenic shroud and a test subject is reviewed. An important factor, affecting the TVC selection, is ratio of test subject and TVC working area characteristic dimensions. Accordingly, a possible set of reradiation function parameters, which is the generalized radiant interaction characteristic of thermal vacuum chamber construction and a test subject, is shown on the example of the reviewed problem. To estimate a value of thermal vacuum chamber shroud radiation heat flow effect on the test subject temperature, it is sugges-

ted in the work that the subject temperature should be compared to its temperature during flight «cold» scenarios tests, when there is no external heat flows and specific internal heat loads are in standby mode. Additional heat flow from TVC to the test subject and corresponding subject temperature increment dependency on the reradiation value and test subject characteristics, such as heat load and emissivity, is identified for TVT «cold» cases. The analysis of the temperature increment due to TVC influence in the «cold» cases allowed proposing the method of thermal vacuum testing acceptability in the selected thermal vacuum chamber rapid assessment under certain reradiation value. The method described in the work allows either to show the necessity of reradiation value minimization or, in case of impossibility of such minimization, to make a conclusion of unsuitability of selected TVC for conducting TVT of the test subject.

Keywords: adiant interaction, radiation coefficient, heat flow, emissivity, cryogenic shroud, thermal vacuum chamber, thermal vacuum test, background heat flow.

REFERENCES

1. Sparrow E.M., Cess R.D. *Radiation Heat Transfer*. Brooks/Cole Publishing Company, Monterey, Calif., 1966. [Russ. ed. Sparrow E.M., Cess R.D. *Teploobmen izlucheniem*. Leningrad: Energiya, 1971. 294 p.]
2. Siegel R., Howell J.R. *Teploobmen izlucheniem* [Thermal Radiation Heat Transfer]. Moscow: Mir, 1975. 936 p. In Russ.
3. Altov V.V., Vinokurov D.K., Zaletaev S.V., Kopyatkevich R.M., Sakva N.V. *Programmnyj kompleks «Yuchislitel'naya sistema «SOTR»* [Software Package " TRS ComputingSystem]. FGUP TSNImash, no. 2151 P, 2014. In Russ.
4. Blokh A.G. *Osnovy teploobmena izlucheniem* [The basics of radiation heat transfer]. Moscow – Leningrad: Gosenergoizdat, 1962. 331 p. In Russ.
5. Blokh A.G., Zhuravlev Yu.A., Ryzhkov L.N. *Teploobmen izlucheniem* [Radiation Heat Transfer]. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 432 p. In Russ.
6. Adrianov V.N. *Osnovy radiatsionnogo i slozhnogo teploobmena* [Fundamentals of radiation and complex heat transfer]. Moscow: Energiya, 1972. 464 p. In Russ.
7. Kolesnikov A.V., Serbin V.I. *Modelirovanie uslovij vneshnego teploobmena kosmicheskikh apparatov* [Modeling the conditions of external heat transfer of spacecraft]. Moscow: Informatsiya-XXI vek, 1997. 170 p. In Russ.
8. Kolesnikov A.V., Paleshkin A.V., Syzdykov S.O. *Metodika rascheta obluchennosti ehlementov i spytuemykh ob"ektov v lampovykh imitatorakh vneshnikh teplovykh nagruzok* [Method of calculation of irradiance of elements of tested objects in lamp simulators of external thermal loads]. *Teplovye protsessy v tekhnike – Thermal Processes in Engineering*, 2017, vol. 9, no. 9, pp. 267–275. In Russ.
9. Zaletaev V.M., Kapinos Yu.V., Surguchev O.V. *Raschet teploobmena kosmicheskogo apparata* [Spacecraft heat transfer calculation]. Moscow: Mashinostroenie, 1979. 208 p. In Russ.
10. Kozlov L.V., Nusinov M.D., Akishin A.I., Zaletaev V.M., Kozelkin V.V., Evlanov E.N. *Modelirovanie teplovykh rezhimov kosmicheskogo apparata i okruzhayushhej ego sredy* [Modeling the thermal conditions of the spacecraft and its environment]. Moscow: Mashinostroenie, 1971. 380 p. In Russ.
11. Andreichuk O.B., Malakhov N.N. *Teplovye ispytaniya kosmicheskikh apparatov* [Thermal tests of spacecraft]. Moscow: Mashinostroenie, 1982. 143 p. In Russ.
12. Malozemov V.V. *Teplovoj rezhim kosmicheskikh apparatov* [Thermal conditions of spacecraft]. Moscow: Mashinostroenie, 1980. 232 p. In Russ.
13. Finchenko V.S., Kotlyarov E.Yu., Ivankov A.A. *Sistemy obespecheniya teplovykh rezhimov avtomaticheskikh mezhplanetnykh stantsij* [Systems for providing thermal conditions for automatic interplanetary stations]. Khimki: Publ. house Lavochkin Association, 2018. 400 p. In Russ.
14. Nikitin P.V., Centurion E.V. *Kataliz i izluchenie v sistemakh teplovoj zashhity kosmicheskikh apparatov* [Catalysis and radiation in spacecraft thermal protection systems]. Moscow: Publishing house «Yanus-K», 2013. 336 p. In Russ.

Учредитель и издатель журнала:

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-72651 от 16.04.2018

Редактор Бублик Н.П., e-mail: tpt@mai.ru

Оригинал-макет и электронная версия изготовлены в МАИ.

Сдано в набор 16.07.2020. Подписано в печать 31.07.2020.

Формат 60×90 1/8. Печать цифровая. Усл. печ. л. 5.82. Уч.-изд. л. 6.35. Тираж 55 экз. «Свободная цена». Заказ № 48

Отпечатано в ООО «Печатный салон ШАНС»