

Моделирование расчетных внешних тепловых нагрузок к поверхности космического аппарата с помощью инфракрасных нагревателей

Палешкин А.В.^{1*}, Мамедова К.И.^{2*}

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

²*Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева, ул. Новозаводская, 18, Москва, 121087, Россия*

*e-mail: paleshkin.andrey@mail.ru

**e-mail: Kamilla_kim@mail.ru

Аннотация

Представлено краткое изложение методического подхода к выбору оптимального режима работы в отношении точности моделирования изотропного поля лучистых потоков, испускаемых инфракрасным имитатором в направлении испытуемого объекта. Иллюстрируется эффективность данного подхода на примере решения конкретных задач.

Ключевые слова: имитатор, оптимизация, тепловые нагрузки, космический аппарат.

В настоящее время тенденция создания космических аппаратов нового поколения, имеющих негерметичное исполнение, становится наиболее

актуальной. На таких космических аппаратах (КА) аппаратура и оборудование, в основном, устанавливаются на тепловых сотопанелях с тепловыми трубами. Негерметичное исполнение, увеличение срока эксплуатации, а также повышенные требования по надежности обуславливают необходимость более обстоятельной экспериментальной отработки КА, включающей комплексные и автономные испытания штатного изделия и его элементов, в том числе и комплексные электрические испытания собранного КА в тепловакуумной камере.

Тепловой режим аппаратуры при проведении комплексных электрических испытаний собранного КА в тепловакуумной камере обеспечивается штатными средствами обеспечения теплового режима космического аппарата. Но при этом должны быть проведены мероприятия по обеспечению заданного температурного режима изделия на этапах подготовки вакуумной камеры к испытаниям и в ходе испытаний, а также разработана технология безопасного преодоления интервала давлений окружающей среды, при которой существует возможность электрического пробоя газового промежутка.

Электрические испытания полномасштабного КА можно провести в крупной или средней по объему вакуумной камере, когда размеры испытываемого объекта соизмеримы с размерами экспериментальной установки. Для этого можно использовать упрощенные средства воспроизведения расчётных внешних тепловых нагрузок к поверхности КА. Из упрощенных средств наиболее привлекательными с экономической точки зрения, а также с точки зрения эксплуатации представляются системы устанавливаемых вокруг рабочей зоны

излучателей, желательны локальных – линейчатых, точечных, чтобы не ухудшать качество моделирования в экспериментальной установке поглощательных свойств космического пространства. Такие излучающие системы также называют имитаторами, но имитаторами расчётного теплового воздействия. Имитаторы рассматриваемого класса выполняются, как правило, по модульному принципу с автономной запиткой электроэнергией или каждого модуля или их группы.

Часто излучатели применяются в совокупности с отражателями и теплоизоляцией с целью уменьшения нагрузки на криогенные экраны и, следовательно, повышения коэффициента полезного использования подводимой к имитатору энергии. Кроме того, в ряде случаев отражатели позволяют снизить уровень спектральных погрешностей в эксперименте. Следует заметить, что использование в конструкции модулей отражателей имеет и отрицательные последствия, которые заключаются в увеличении потоков фонового излучения в экспериментальной установке из-за переотражения в рабочую зону поверхностью отражателей падающей на них извне лучистой энергии.

Имитаторы с линейчатыми излучателями, привлекательные своей конструктивной простотой и экономичностью, при достаточно большом числе автономно запитываемых излучающих модулей позволяют с хорошей точностью воспроизводить монотонно изменяющиеся по поверхности объекта внешние тепловые нагрузки. Они применимы при гладкой и выпуклой форме наружных поверхностей объектов испытаний, при однородности их радиационных характеристик, при монотонности распределения по поверхности падающих

тепловых потоков. В иных случаях возникают существенные погрешности имитации. Но в этом случае можно, оперируя весовыми коэффициентами, добиться удовлетворительной точности воспроизведения расчетных внешних тепловых нагрузок на наиболее важные участки поверхности испытываемого объекта, правда, в ущерб точности воспроизведения внешних тепловых нагрузок для других элементов, не отнесенных к категории наиболее важных. При наличии в камере такого имитатора нет необходимости в использовании имитатора солнечного излучения в качестве средства компенсации рассеиваемой объектом энергии [1, 2].

Рассмотрим пример экспериментальной установки ВК 600/300, которую можно использовать в таких испытаниях практически без доработок ее стендовых средств в условиях моделирования космического вакуума при непременном обеспечении требуемого теплового режима всех жизненно важных его элементов. Как и в других вакуумных камерах, в этой установке в качестве средств основной откачки используются насосы поверхностного действия крио-конденсационного типа – экраны, охлаждаемые жидким или кипящим азотом. Поэтому достижение и поддержание в камере требуемого уровня вакуума ($P \leq 10^{-3}$ Па) сопряжено с необходимостью поддержания на экранах камеры достаточно низких температур (менее 90К). В связи с этим возникает необходимость подвода к испытываемому объекту энергии, компенсирующей его энергетические потери за счет излучения элементов внешней поверхности и обеспечивающей в нем требуемый тепловой режим.

В состав систем установки ВК600/300, моделирующих космические условия функционирования КА, помимо откачных средств и имитатора солнечного излучения входит и инфракрасный имитатор (ИКИ), выполненный в виде совокупности условно линейчатых излучателей, которые могут располагаться вокруг испытуемого объекта и обеспечивать моделирование определенных внешних тепловых нагрузок на испытуемый объект. Модули ИКИ содержат излучатели в виде токопроводящих стеклографитовых лент. В инфракрасной области спектра такие излучатели можно считать серыми с интегральной степенью черноты приблизительно равной 0,9. Излучатели размещаются в отражателях корытообразного сечения. Однако, отражатели могут и не устанавливаться.

Для термостатирования объекта достаточно будет воспользоваться средствами предварительной, основной и вспомогательной откачки вакуумной камеры, а также инфракрасным имитатором внешних тепловых нагрузок. В данных испытаниях криогенные экраны камеры выполняют двойную функцию, являясь насосами основной откачки и имитаторами «холодного» и «черного» космоса, что, конечно, значительно усложняет решение задачи термостатирования объекта на уровне небольших положительных температур. Решать задачу термостатирования испытуемого объекта надлежит с помощью ИКИ установки с учетом анизотропности поля лучистых потоков, приходящих на испытуемый объект от экранов по различным направлениям. Анизотропия лучистых потоков обусловлена не столько неоднородностью поля температур по

поверхности криогенных экранов, сколько наличием в этих экранах необходимых конструкционных и технологических вырезов, большинство из которых прикрыты неохлаждаемыми экранами. Это неоднородное по объему экспериментальной установки и направлениям излучения, может привести к заметным погрешностям в воспроизведении заданного однородного поля температур на наиболее важных участках поверхности испытуемого объекта. Однако во время работы инфракрасного имитатора появляется также более мощный источник фонового излучения – отраженный лучистый поток от отражателей излучающих модулей имитатора, источником которого является излучение противоположно расположенных модулей самого имитатора. Площади поверхности среза отражателей составляет несколько более 10% от площади цилиндрической поверхности, проходящей через выходные сечения отражателей. Следовательно, при высокой отражательной способности покрытия поверхности отражателей, в рабочую зону экспериментальной установки по некоторым направлениям может вернуться, по оценкам, до 8% излучения модулей имитатора, что приведет к появлению 2-х процентных температурных погрешностей на теплоизолированных элементах испытуемого объекта.

Для проведения данных испытаний оптический отсек установки ВК600/300 необходимо закрыть криогенными экранами, а модули ИКИ разместить в соответствии с приведенной схемой на рис. 1. При этом 72 модуля будут расположены вдоль образующих поверхности кругового цилиндра, соосного с вакуумной и с диаметром, приблизительно равным 5,25 м. Это так называемые

боковые модули. Кроме того необходимо использовать и 10 торцевых модулей, размещаемых в плоскости, перпендикулярной оси камеры, и предназначенных для термостатирования донной части испытуемого объекта. В имитаторе используются модули метровой и двухметровой длины. Боковые модули расположены в три яруса по высоте. В каждом ярусе по 24 модуля расположенных равномерно по окружности. Модули первого яруса имеют длину 2 м. Боковые модули второго яруса соосны с модулями первого яруса и имеют длину 1 м. Модули третьего яруса имеют длину 2 м. Плоскость размещения торцевых модулей практически совпадает с плоскостью опорно-поворотного стола. Все торцевые модули имеют длину 2 м. Причем первые четыре модуля образуют квадрат, а шесть модулей являются сторонами правильного шестиугольника. Торцевые модули используются без отражателей. Для модулей боковой поверхности имитатора принят следующий принцип нумерации. В первом ярусе располагаются первые 24 излучателя, во втором ярусе излучатели с номерами 25 - 48, а в третьем - излучатели с номерами 49 - 72. Первые модули в каждом ярусе размещены так, что соответствующий им полярный угол приблизительно равен 45° в стендовой системе координат, в которой ось Ox направлена на имитатор солнечного излучения. 2-ому, 3-ему и т.д. (24-ому) модулям соответствуют полярные углы, отсчитываемые в положительном направлении и возрастающие с угловым шагом $6,5^\circ$.

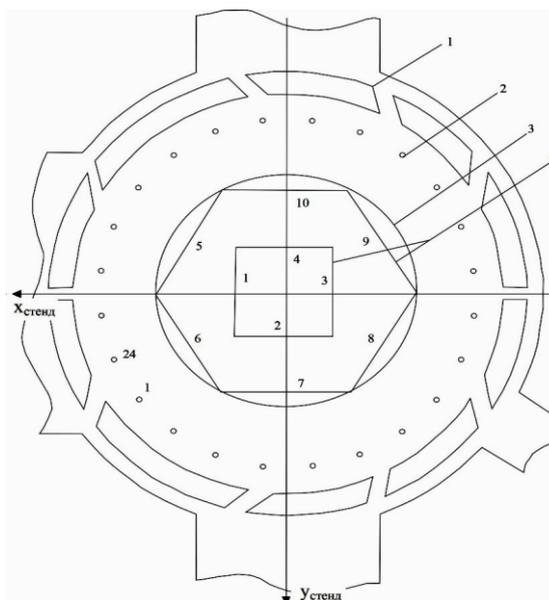


Рисунок 1. Схема размещения модулей ИКИ.

1 – криогенные экраны, 2 – боковые модули, 3 – объект, 4 – торцевые модули

Для определения оптимального энергетического режима работы ИКИ вводилась в рассмотрение упрощенная геометрическая модель термостатируемой поверхности изделия. Поверхность заменялась совокупностью цилиндрической поверхности с диаметром 3 м и двумя торцевыми поверхностями имеющими форму круга с диаметром 3 м. Высота цилиндрической поверхности принималась равной 1,5 м. Координаты центральных точек этих площадок задавались в связанной с объектом системе координат в соответствии с методикой, изложенной в [3]. Точки располагались в 25 поясах отмеченных поверхностей по 48 в каждом поясе с угловым шагом $7,5^\circ$. При этом на каждой из торцевых поверхностей точки располагались в 7 поясах, а на цилиндрической поверхности – в 11 поясах. Предполагалось, что рассматриваемые поверхности в диапазоне длин волн от 2

мкм до 15 мкм являются серыми поверхностями. При наличии этого допущения оптимальный режим работы имитатора можно определять, принимая во внимание только падающий на тепловоспринимающие элементы лучистый тепловой поток, однако при том условии, что эти элементы являются теплоизолированными.

На рисунке 2 представлена схема размещения испытуемого объекта в ВК 600/300. Для расчетов в обеспечение выбора оптимального режима работы имитатора предполагалось, что ось OZ объекта ориентирована в направлении оптического отсека. Более подробно об оптимизации энергетического режима, а также о сопутствующих задачах изложено в [1, 4].

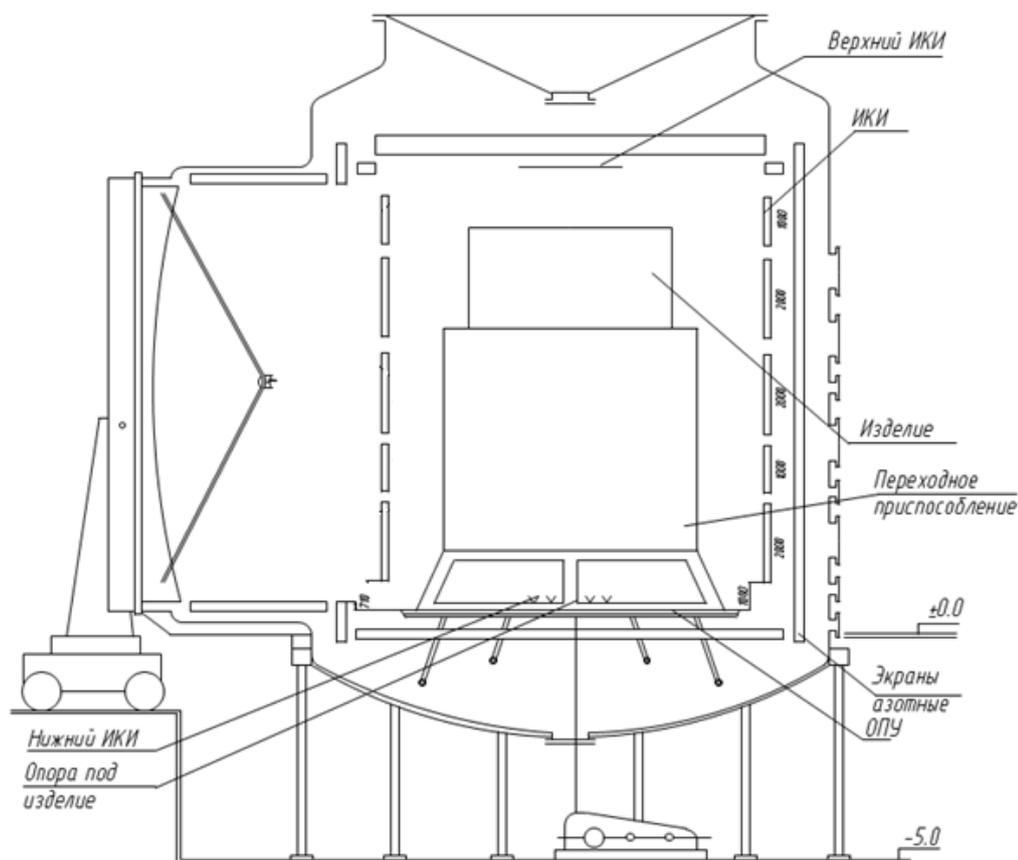


Рис 2. Схема размещения объекта испытаний в вакуумной камере

Помимо отмеченных элементарных площадок, в качестве тепловоспринимающих элементов, на которые настраивается имитатор, рассматривались и установленные в наиболее важных местах термостатируемой поверхности датчики плотности лучистых потоков. Они необходимы для контроля за качеством подвода к внешней поверхности лучистых потоков, призванных обеспечить требуемый уровень температур на термостатируемой поверхности. Для определения оптимального энергетического режима работы инфракрасного имитатора была составлена программа, которая позволила определить локальные погрешности воспроизведения требуемых температур на поверхности выделенных на геометрической модели тепловоспринимающих элементов.

Методический подход по оптимизации энергетического режима работы имитатора, описанный в [4], реализовывался для различных уровней температур термостатирования в диапазоне $[-10; 30]$ °С. Выявлены оптимальные значения подводимой к каждому модулю имитатора электрической мощности и определены погрешности воспроизведения требуемых температур. Результаты расчетов представлены на графиках рисунка 3.

Расчеты проводились для двух возможных режимов работы имитатора:

- 1) отслеживается приоритет датчиков плотности тепловых потоков путем наделения соответствующих им элементарных площадок высокими значениями весовых коэффициентов;

2) все тепловоспринимающие элементы наделяются одинаковыми весовыми коэффициентами, то есть предпочтение не отдается при выборе режима работы имитатора.

Для первого режима работы

Для второго режима работы

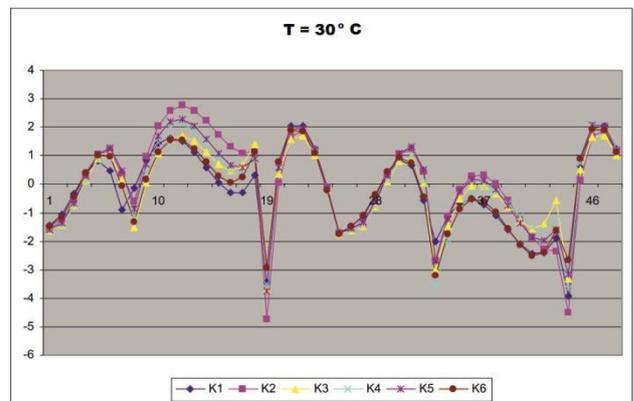
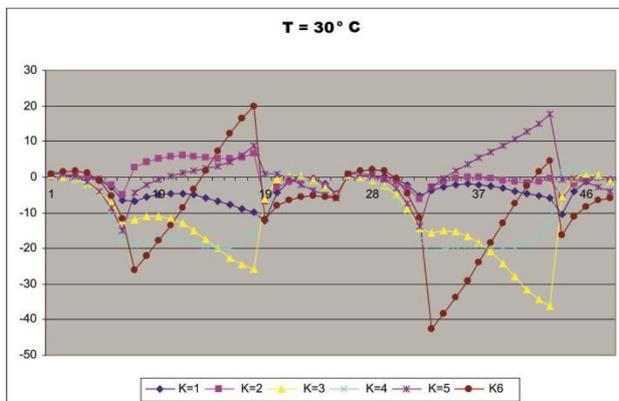
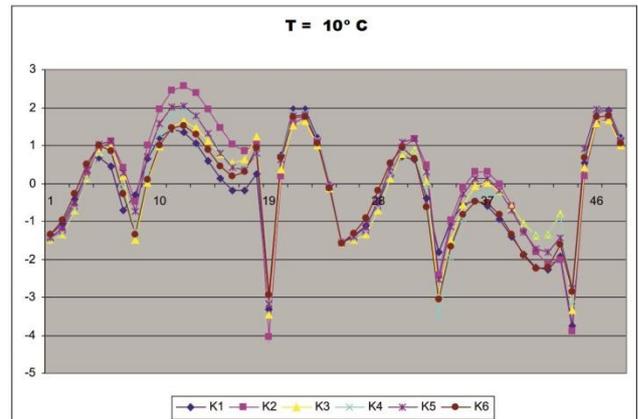
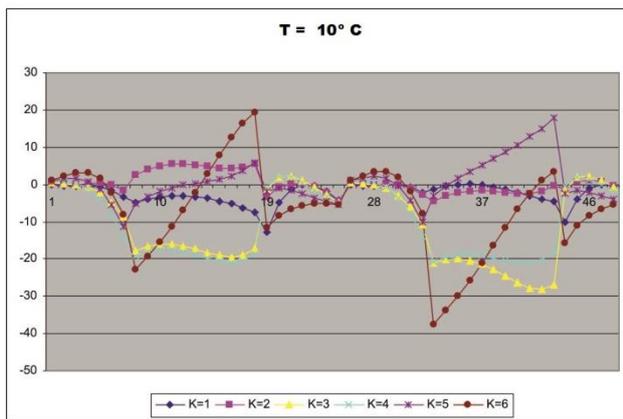
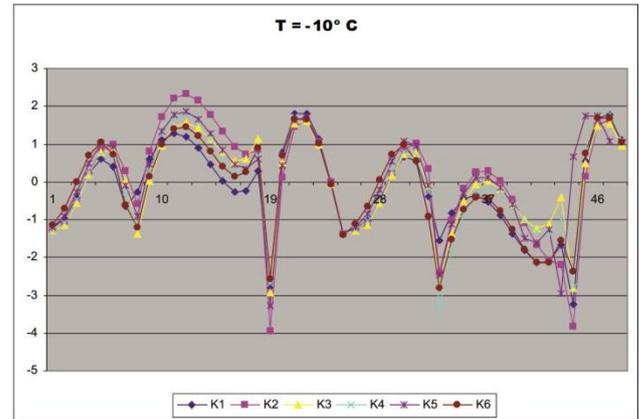
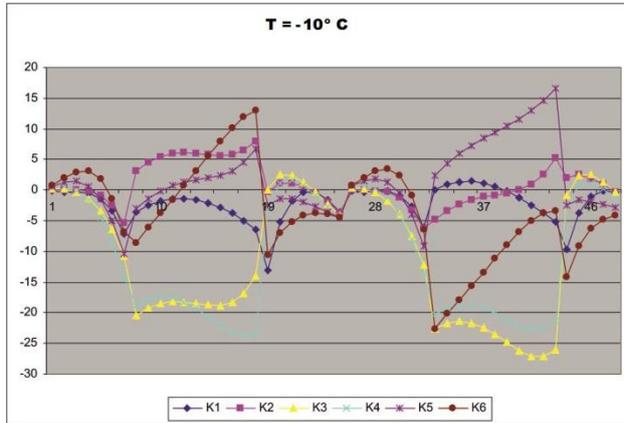


Рис. 3 Погрешности воспроизведения требуемых температур

Таким образом, инфракрасный имитатор, состоящий из 72-х боковых излучающих модулей и 10 двухметровых торцевых модулей без отражателей может обеспечить удовлетворительное термостатирование, наиболее важных внешних поверхностей испытуемого объекта при проведении электрических испытаний в условиях моделирования космического вакуума и внешних тепловых условий, обеспечивающих на элементах его наружной поверхности температуры в диапазоне $[-10; 30]$ °С для имеющихся на борту КА приборов и аппаратуры без применения стендовых нагревателей для внутреннего подогрева.

В процессе испытаний целесообразно реализовать такой режим работы имитатора, при котором точность воспроизведения требуемых температур на датчиках плотности теплового потока не является приоритетной задачей, а значимость всех тепловоспринимающих элементов поверхности испытуемого объекта считается одинаковой.

В данной работе рассматривался имитатор, в котором боковые модули имеют отражатели, однако предпочтительным с точки зрения достижения большей точности моделирования требуемых тепловых условий на поверхности испытуемого объекта является применение боковых модулей без отражателей.

Библиографический список

1. Колесников А.В., Сербин В.И. Моделирование условий внешнего теплообмена космических аппаратов. - М.: Информация –XXI век, 1997. – 170 с.

2. Панкратов Б.М., Хохулин В.С., Дронов В.П., Колесников А.В. Моделирование и отработка тепловых режимов летательных аппаратов: Учебное пособие. - М.: Из-во МАИ, 1990. - 228 с.
3. Колесников А.В., Палешкин А.В. Численный метод моделирования внешнего теплообмена космического аппарата с произвольной формой наружных поверхностей // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т.17. №4. С. 81-89.
4. Мамедова К.И., Колесников А.В., Палешкин А.В. Градиентные методы оптимизации режима работы имитатора внешних тепловых нагрузок // Тепловые процессы в технике. 2014. Т. 6. № 11. С. 522-528.
5. Мамедова К.И., Колесников А.В., Палешкин А.В. Методика выбора оптимального энергетического режима работы сетчатого нагревателя // Тепловые процессы в технике. 2015. Т. 7. № 1. С. 37-42.
6. Мамедова К.И., Колесников А.В., Палешкин А.В. Методика оценки влияния погрешностей моделирования внешних тепловых нагрузок на тепловое состояние КА // Тепловые процессы в технике. 2015. Т. 7. № 9. С. 417-422.