

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ТЕПЛОВОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НЕГЕРМЕТИЧНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

Е.Н. Васильев, В.А. Дервянко, А.В. Макуха
ВЦ СО РАН, Россия, Красноярск, Академгородок
В.Е. Косенко, В.Е. Чеботарев, В.Ф. Черемисин
НПО ПМ, Россия, Железногорск

При разработке конструкции и компоновки космических аппаратов (КА) одной из основных проблем является проблема обеспечения такого теплового режима для работы бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), при котором функционирование каждого отдельного элемента РЭА осуществлялось бы в оптимальном температурном диапазоне. В настоящее время перспективным направлением для повышения надежности и увеличения срока активного существования спутников связи является разработка КА нового поколения, имеющих негерметичное исполнение. Своеобразие теплообмена КА негерметичного исполнения связано с тем, что в отсутствие конвекции передача теплоты от каждого радиоэлемента внутри прибора и от самого прибора на радиатор осуществляется механизмами теплопроводности и излучения. В данной работе представлен подход к тепловому проектированию КА негерметичного исполнения, конструкция которых состоит построена из плоских панелей и состоит из состыкованных между собой нескольких модулей с некоторым тепловым сопротивлением на стыках между ними (рис.1).

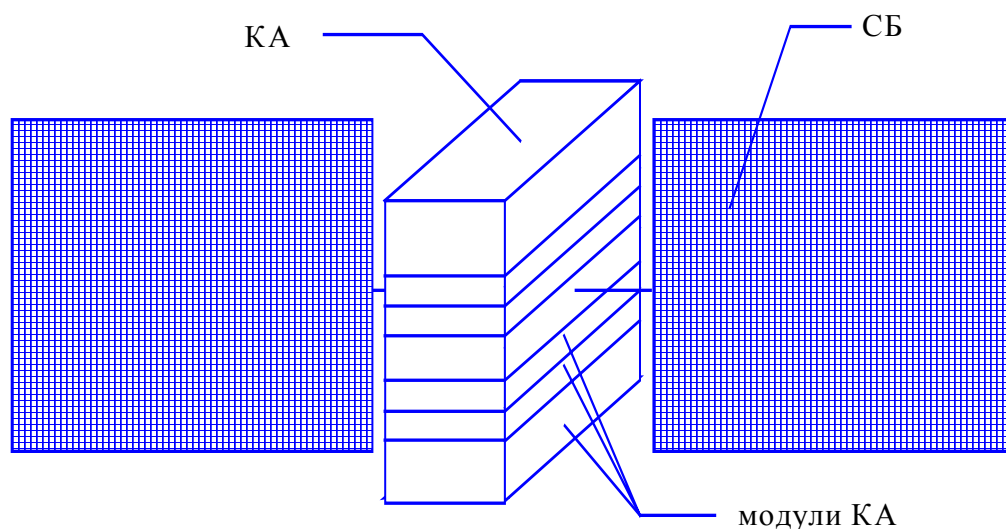


Рис.1.Компоновка КА негерметичного исполнения

КА негерметичного исполнения в целом представляет собой сложную техническую систему с большим числом узлов и элементов и разнообразными функциональными и тепловыми связями между ними, кроме того изменение внешних условий, связанное с изменением взаимной ориентации Солнца, Земли и КА, поворотом солнечных батарей (СБ) при движении КА по орбите, приводит к изменению как величины интегрального теплового потока, поступающего на поверхность аппарата, так и самого распределения теплового потока. Поэтому задача теплового проектирования КА с определением температуры каждого радиоэлемента в любой точке орбиты с учетом ресурсов современных персональных компьютеров может быть решена только с применением тепловых математических моделей нескольких иерархических уровней с различной степенью детализации.

С учетом удобства работы на различных этапах теплового проектирования и вычислительных ресурсов современных персональных компьютеров была разработана следующая иерархия тепловых компьютерных моделей КА негерметичного исполнения.

1. *Математическая модель КА негерметичного исполнения.* Назначение модели - определение теплового режима при распределении тепловой нагрузки по отдельным модулям и панелям КА и оптимизация теплового режима КА в целом. Данная модель на основе численного решения системы двумерных нестационарных уравнений теплопроводности описывает теплообмен полной конструкции КА, состоящего из нескольких модулей, с учетом нестационарных внешних потоков тепла от Солнца и Земли в зависимости от параметров орбиты, излучения солнечных батарей, собственного излучения с поверхности радиаторов, тепловых потоков от РЭА и других внутренних тепловых источников, теплового сопротивления стыков. Учет влияния навесных элементов КА (антенн, отражателей, дополнительных СБ и пр.) может быть также осуществлен путем учета тепловых потоков от этих устройств на поверхность КА. Модель КА - модель самого верхнего иерархического уровня, она имеет наибольшую расчетную область, поэтому шаг разностной сетки наиболее крупный, а уровень детализации наименьший. Конструкция КА и солнечных батарей вводится в программу в виде файлов данных, поставляемых из системы АСAD. Параметры орбиты вводятся в программу также в виде файла. Результат моделирования выводится на экран в виде цветовых полей, соответствующих распределениям температуры на всей поверхности спутника, а также каждой панели в отдельности. По данным расчета определяются модули и панели, имеющие тепловой режим, не соответствующий техническим условиям (ТУ), и проводится перераспределение тепловой нагрузки с последующим расчетом новой компоновки КА. Математическая модель КА имеет две модификации.

В первом варианте модели для каждой отдельной панели распределение тепловой мощности внутренних источников задается осредненным по поверхности без учета локальных координат расположения РЭА. Модель необходима на самом первом этапе теплового проектирования для интегрального распределения тепловых мощностей по отдельным модулям и панелям. Данная модель позволяет получить динамику распределения температуры по всей поверхности КА при движении по орбите, определить граничные тепловые потоки, перетекающие из одного модуля в другой. По результатам моделирования КА определяются отсеки, интегральный тепловой режим которых не удовлетворяет ТУ, проводится их перекомпоновка с последующей проверкой теплового режима.

Вторая модификация математической модели КА учитывает локальность тепловыделения от приборов в месте их крепления к панели. Данная модель служит для определения теплового режима КА после расстановки приборов. Программа, созданная на основе данной модели КА, предусматривает возможность перемещения приборов по панели в процессе моделирования с целью оптимизации расстановки приборов и достижения наиболее благоприятного теплового режима в каждом модуле с учетом потоков теплоты между ними. На заключительном этапе проектирования модель позволяет проводить окончательную проверку теплового режима КА негерметичного исполнения при движении его по орбите.

В процессе моделирования в любой точке орбиты выполнение программы может быть остановлено и произведена запись граничных условий для каждого модуля КА для дальнейшей детализации теплового режима.

2. *Математическая модель отдельного модуля КА.* Модель этого уровня позволяет на более мелкой разностной сетке детально определить температурное поле поверхности модуля с учетом потоков теплоты от внешних источников и соседних модулей, тепловых потоков от внутренних тепловых источников с заданием конкретных посадочных мест крепления РЭА на стенках модуля. Модель отдельного модуля основана на численном решении системы стационарных двумерных уравнений теплопроводности для заданной точки орбиты. Конструкция модуля, параметры приборов считываются из файлов данных, поставляемых системой АСАД. Тепловое воздействие соседних модулей задается через распределения температур на их границах с данным модулем. В рамках модели дополнительно рассматривается применение таких систем терморегулирования, как жалюзи и тепловые трубы. Модель отдельного модуля определяет тепловые поля стенок модуля и значения температуры на посадочных местах РЭА. По результатам моделирования определяются посадочные места, не отвечающие по тепловому режиму техническим условиям, и проводится их перекомпоновка с целью оптимизации теплового режима модуля.

По результатам моделирования теплового режима отдельного модуля производится запись в файл температур посадочных мест всех приборов, расположенных на панелях данного модуля.

3. *Математическая модель прибора.* Данная модель предназначена для расчета теплового режима прибора с учетом теплового влияния блоков друг на друга и дает возможность оптимизации теплового режима путем распределения тепловых нагрузок по отдельным блокам на этапе теплового проектирования прибора. С помощью тепловой модели прибора моделируется распространение теплоты в составной конструкции, состоящей из боковых стенок и вертикально или горизонтально прикрепленных к ним блоков (плат). Математическая модель основана на решении системы двумерных нестационарных уравнений теплопроводности. Тепловыделение на блоках задается однородным, а выделяемая тепловая мощность на каждом блоке равна суммарной мощности всех расположенных на нем радиоэлементов. Входными параметрами являются температура посадочного места, геометрические размеры стенок и блоков, мощности тепловыделения на каждом блоке и теплофизические свойства материалов. Результаты моделирования выводятся в цифровом и графическом виде. По итогам расчета определяются блоки с неблагоприятными тепловыми режимами и проводится их перекомпоновка или перераспределение тепловых нагрузок между блоками. После оптимизации теплового режима прибора в целом производится запись в файл граничных условий на стенке для каждого блока.

Данная математическая модель имеет две модификации для приборов с вертикальным и горизонтальным расположением блоков.

4. *Математическая модель отдельного блока.* Назначение модели самого низкого иерархического уровня - расчет и оптимизация теплового режима блока прибора таким образом, чтобы все радиоэлементы, расположенные на нем функционировали в оптимальном температурном диапазоне. Причем тепловой режим блока уже интегрально сбалансирован с помощью модели прибора, поэтому на данном уровне теплового проектирования необходимо добиться, чтобы на блоке не было локальных областей с температурой, выходящей за пределы допустимого диапазона. В рамках тепловой модели блока расчет и оптимизация тепловых режимов блоков с двухсторонним расположением радиоэлементов производится на основе численного решения стационарного уравнения теплопроводности, в качестве граничных значений используется распределение температуры на стенке прибора, записанное в файл моделью прибора. При этом учитываются координаты, размеры, тепловые сопротивления стыка элемент-блок, мощности

тепловыделения радиоэлементов и их оптимальный диапазон рабочих температур. Данные о размещении радиоэлементов считываются из файла, подготовленного с помощью системы PCAD, и дополняются следующими характеристиками радиоэлементов: мощность тепловыделения, оптимальный диапазон температур, значение теплового сопротивления стыка элемент-блок. Данные расчета температурного поля выводятся в виде изолиний, также определяются значения температуры всех элементов, расположенных на обеих сторонах блока. Для проведения оптимизации теплового режима блока в модели предусмотрена возможность перемещения и перестановки радиоэлементов, работающих за пределами допустимого температурного диапазона, с последующей проверкой теплового режима .

Таким образом, разработанная методика теплового проектирования дает возможность конструктору контролировать тепловой режим КА и РЭА на разных этапах проектирования и с различной степенью детализации. Созданный на основе данных математических моделей пакет прикладных программ позволяет разработчикам оперативно определять температурный режим КА и РЭА на всех этапах проектирования и в результате оптимизации добиться условий при которых поддерживается температура каждого радиоэлемента бортовой аппаратуры в заданных ТУ пределах. С помощью разработанного иерархического подхода к тепловому проектированию КА возможно рассмотрение и других конструкций КА (отличных от формы параллелепипеда), которые могут быть представлены как набор плоских панелей.