

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ТЕПЛООБМЕНА В КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ
НЕГЕРМЕТИЧНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

Е.Н. Васильев, О.П. Вайтузин, В.А. Дервянко
ВЦ СО РАН, Россия, Красноярск, Академгородок
М.Т. Бакиров, В.Д. Звонарь, В.Е. Чеботарев, В.Ф. Черемисин
НПО ПМ, Россия, Железногорск

На этапе конструкторского проектирования космических аппаратов (КА) при выборе вариантов конструкции и компоновки необходимо решать задачу обеспечения оптимального теплового режима в каждом модуле КА, при котором температура бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) должна поддерживаться в заданных пределах в любой точке орбиты. КА негерметического исполнения имеет достаточно сложную конструкцию, состоящую из нескольких модулей (Рис.1), имеющих между собой разнообразные функциональные и тепловые связи. Для определения теплового режима спутника, движущегося по орбите и находящегося в условиях переменных внешних и внутренних тепловых потоков, наиболее эффективным и информативным инструментом является математическое моделирование на ЭВМ. Тепловая математическая модель КА негерметического исполнения должна описывать процесс теплопередачи по телу сложной геометрической формы с учетом термического сопротивления стыков и нестационарного и неоднородного распределения внешних и внутренних источников и стоков теплоты.

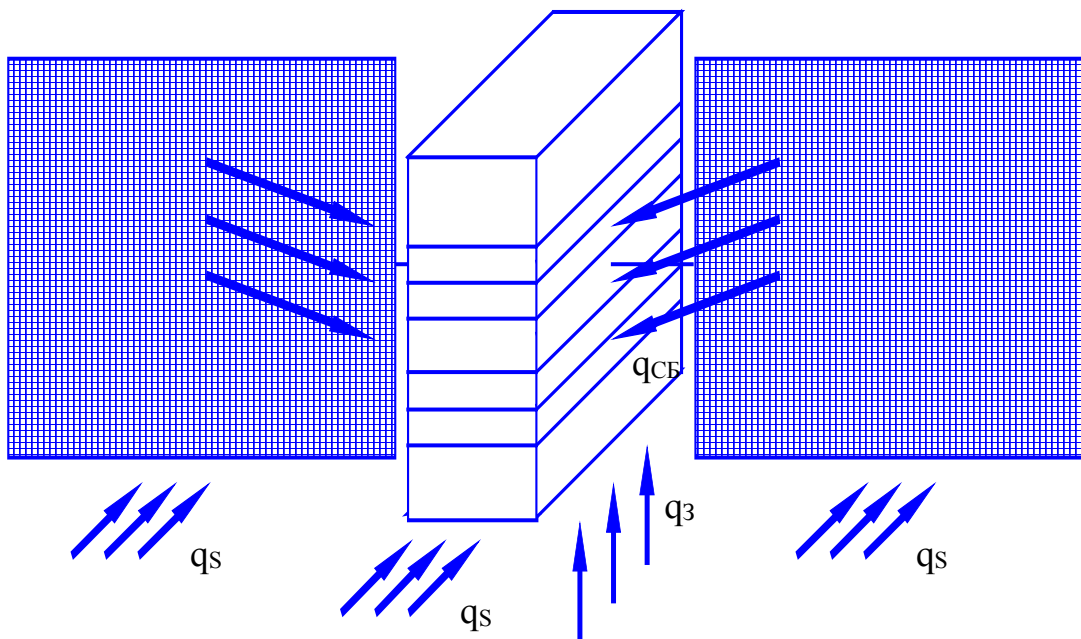


Рис.1. Компоновка КА и схема внешних тепловых потоков.

Под воздействием внешних и внутренних источников теплоты устанавливается некоторый тепловой режим КА, под которым понимается нестационарное температурное поле в отдельных системах, модулях и в целом в аппарате. В модели под внешним тепловым потоком понимается сумма прямого солнечного излучения q_s , излучения от Зем-

ли q_3 , теплового потока от солнечных батарей q_{CB} и других навесных элементов КА. Теплота, поступающая на поверхность КА от внешних и внутренних источников, излучается во внешнее космическое пространство в виде теплового излучения.

Математическая модель КА негерметичного исполнения основана на численном решении системы нестационарных двумерных уравнений теплопроводности, которая описывает процесс распространения теплоты в КА, состоящем из нескольких модулей, которые в свою очередь состоят из отдельных панелей. Для определения двумерного распределения температурных полей каждой отдельной панели КА решается двумерное нестационарное уравнение теплопроводности вида

$$c_v \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_v(x, y, t) - \alpha_v(x, y, t)T,$$

где c_v — удельная объемная теплоемкость; ρ — плотность; T — температура; λ — теплопроводность; t — время; x, y — координаты; q_v — объемная плотность теплового потока от источников теплоты; α_v — коэффициент теплообмена с внешней средой, который характеризует объемную плотность теплового потока стоков теплоты.

При этом используются граничные условиями третьего рода

$$\left[\lambda \frac{\partial T}{\partial l} + \alpha T \right]_{l=0,L} = q|_{l=0,L}, \quad \text{где } l = x, y$$

и условия сопряжения на тепловых стыках между отдельными панелями

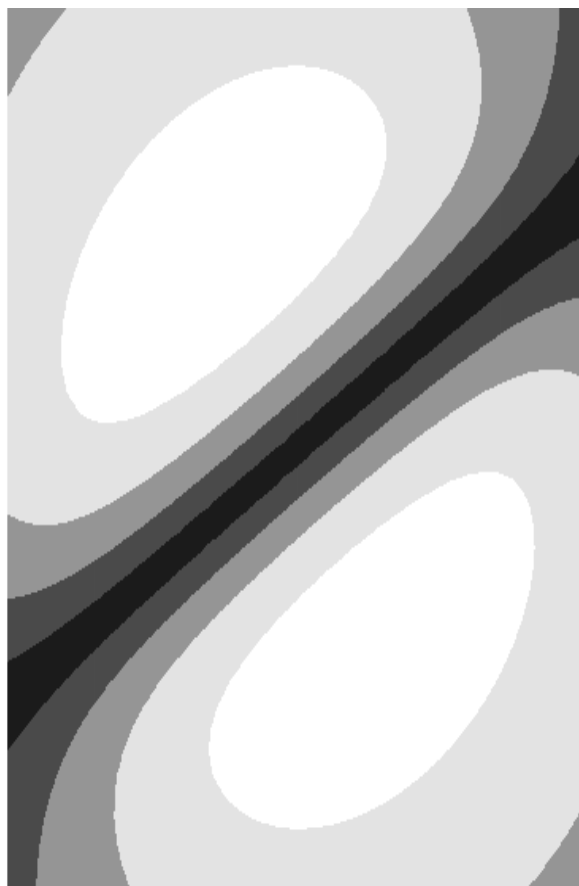
$$(T_1 - T_2) = Rq,$$

где R — термическое сопротивление стыка. Данное условие сопряжения определяет величину и направление тепловых потоков, перетекающих через тепловой стык, имеющих тепловое сопротивление R и значения температуры по обе стороны стыка T_1 и T_2 .

Начальное условие имеет вид $T|_{t=0} = T_0(x, y) = const$.

Параметрами модели являются геометрические размеры КА, солнечной батареи (СБ) и каждого модуля, теплофизические и радиационные свойства материалов, значения тепловых сопротивлений стыков между отсеками, мощности тепловыделения, параметры орбиты КА. Для решения системы уравнений использовался алгоритм расщепления задачи по пространственным координатам с применением неявной разностной схемы.

При расчете внешних тепловых потоков наибольшие временные затраты требуются для определения распределения теплового потока от солнечной батареи на поверхности КА, причем распределение q_{CB} имеет существенно неоднородный характер (Рис.2.) и оказывает заметное влияние на динамику изменения температуры поверхности КА. Для расчета q_{CB} необходимо для каждой точки боковой поверхности КА численно проинтегрировать тепловой поток со всей поверхности солнечной батареи в зависимости от расстояния и относительной ориентации соответствующих элементов площади поверхности КА и СБ. При движении по орбите СБ постоянно меняют свое положение, оставаясь все время перпендикулярными к направлению солнечного потока. Для уменьшения затрат расчетного времени в модели для перерасчета теплового потока от СБ на каждом временном шаге использовался поворот однажды рассчитанного распределения теплового потока на угол поворота СБ с помощью алгоритма двумерной линейной интерполяции.



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ОТ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

$Q \leq 20.0$ Вт/м*м $20.0 < Q \leq 53.3$ $53.3 < Q \leq 86.7$ $86.7 < Q \leq 120.0$ $Q \geq 120.0$ Вт/м*м

Рис.2.

Внутренний тепловой поток принимался равным потоку от приборов и аппаратуры, расположенных на внутренней поверхности КА. В зависимости от вида учета внутренних тепловых потоков математическая модель 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. Второй вариант учитывает локальность тепловыделения от приборов в месте их крепления к панели.

На основе описанной модели была составлена программа на языке С++ для персонального компьютера. Входными параметрами программы являются файлы данных компоновки КА, теплофизических свойств материалов и параметров СБ, подготовленные при помощи системы AutoCAD, а также файл с параметрами орбиты.

В ходе математического моделирования производится графический вывод во времени величин внешних тепловых потоков и развертки всей поверхности КА с изображением в цвете температурных полей, по которым определяется динамика процесса и тепловой режим космического аппарата в целом. При этом использование модели с осредненными внутренними тепловыми потоками дает возможность на первом этапе теплового проектирования интегрально распределить тепловые нагрузки по отдельным модулям и панелям. По результатам моделирования определяются модули КА с неблагоприятными тепловыми режимами и при необходимости проводится перекомпоновка тепловых мощностей на отдельных панелях и следующий расчет теплового режима. После завершения интегральной тепловой оптимизации КА может производиться рас-

становка приборов по модулям и панелям КА. Для определения теплового режима КА после расстановки приборов используется модель, учитывающая локальные координаты и мощности приборов, а также возможность включения и выключения приборов в различных точках орбиты. Программа, созданная на основе данного варианта 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 перетоков теплоты между ними. На заключительном этапе проектирования данная 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, которые необходимы для более детального теплового моделирования отдельного модуля.

Таким образом, математическая модель позволяет проводить расчет и оптимизацию теплового режима КА негерметичного исполнения при его движении по орбите. При этом на начальном этапе теплового проектирования, когда детально конструкция КА еще не определена, модель позволяет распределить тепловую нагрузку и оптимизировать расположение тепловых источников по отсекам. На следующих этапах проектирования модель позволяет детально проработать компоновку КА с учетом расстановки приборов. На заключительном этапе проектирования проводится окончательная проверка теплового режима КА в целом в любой точке орбиты.