

Расчет теплообмена в негерметичных космических аппаратах

Васильев Е.Н., Дервянко В.А., Косенко В.Е.

This paper offers a mathematical model to obtain a numerical calculation and optimization of the thermal regimes of satellite radio electronic apparatus in vacuum condition. This model consists of two levels. The first one is finding the temperature distribution of the non-tightness satellite surface. The second one is the simulation of the single radio technical device temperature regime.

Коллективы кафедры прикладной физики Красноярского госуниверситета и лаборатории магнитной газодинамики Института вычислительного моделирования СО РАН в течение последних десяти лет активно сотрудничают с разработчиками космической техники в НПО «Прикладной механики». Предметом совместной работы является экспериментальное и теоретическое исследование тепловых режимов бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Эксперименты проводятся на установке «Вакуумный стенд», имеющей полезный объем 2 м³ и оснащенной имитатором солнца, азотным экраном, автоматизированной системой измерений на базе персонального компьютера, тепловизионным измерительным комплексом. Теоретические исследования направлены на математическое моделирование температурных режимов космических аппаратов (КА) и радиоэлектронной аппаратуры, а также разработку программных средств теплового проектирования.

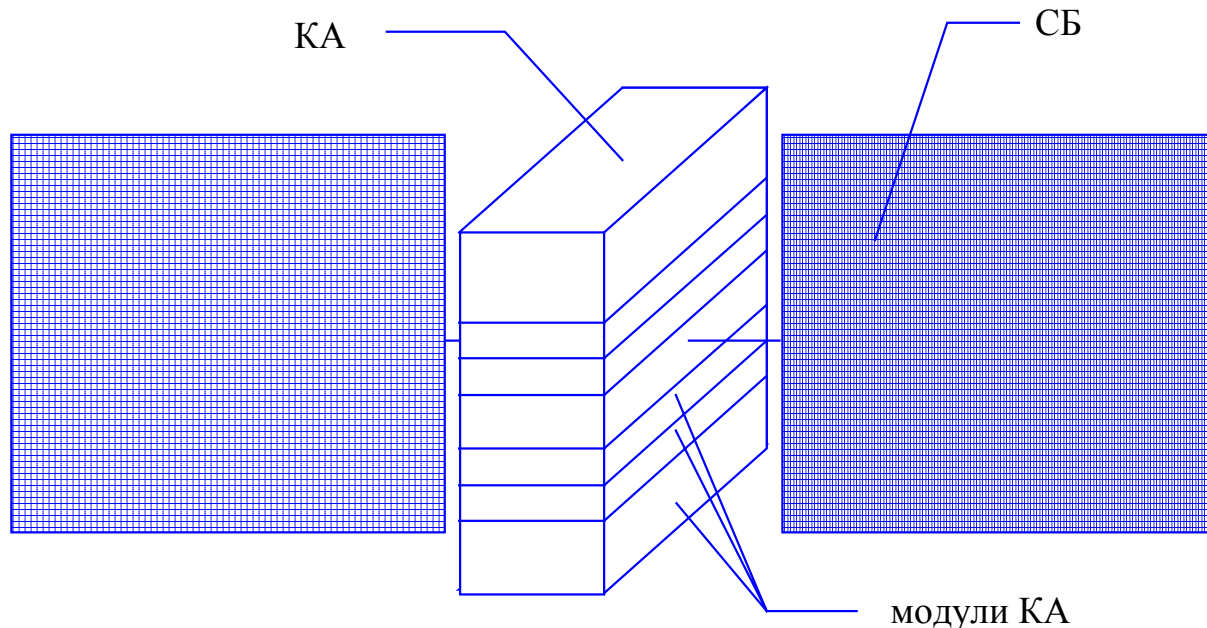


Рис. 1. Компонировка КА негерметичного исполнения

В последние годы в НПО ПМ переходят к разработке и проектированию космических аппаратов нового поколения, имеющих негерметичное исполнение. Предполагается, что в сравнении с герметичными спутниками такие КА будут иметь повышенную надежность и увеличенный срок активного существования. Негерметичное исполнение КА приводит к существенному изменению его облика. На этих аппаратах отсутствует такой ограничивающий и объединяющий элемент, как гермоконтейнер. Отсутствие гермоконтейнера приводит к тому, что конструкция КА строится из плоских панелей (Рис. 1). Это позволяет упростить конструкцию КА и облегчает монтаж радиоэлектронной аппаратуры на пло-

ских панелях. Но при этом тепловой режим КА и бортовой РЭА в отсутствие конвекции необходимо обеспечить такими механизмами теплопередачи, как излучение и теплопроводность. Конструирование негерметичных КА требует предварительной, детальной компоновки с учетом тепловой нагрузки, обусловленной расположением бортовой РЭА во внутреннем объеме и наличием внешних нестационарных тепловых потоков. Одной из основных проблем является задача обеспечения оптимального температурного режима для каждого узла КА. Поэтому конструктору на стадии проектирования необходим пакет прикладных программ, который в режиме диалога обеспечивает выдачу информации о тепловом режиме КА и его узлов в любой точке орбиты. В данной работе представлены математические модели, описывающие тепловой режим негерметичного КА и бортовой РЭА.

Тепловая модель КА должна описывать теплообмен конструкции сложной геометрической конфигурации с источниками и стоками тепла и взаимным обменом энергией. Негерметичная компоновка КА предъявляет определенные требования к обеспечению необходимого теплового режима, который достигается другими способами, чем у КА герметичного исполнения. Для этого используются радиаторы с определенными оптическими характеристиками. Изменение внешних условий, связанное с изменением угла падения солнечного излучения на поверхность КА и поворотом солнечных батарей (СБ) при движении КА по эллиптической орбите, приводит к изменению, как величины интегрального теплового потока, поступающего на радиатор, так и распределения теплового потока на поверхности радиатора. Как следствие, это приводит не только к деформации температурного поля на поверхности радиатора, но и к изменению средней температуры радиатора. С учетом сложности задачи, требований на различных этапах теплового проектирования и удобства работы математическая модель имеет различные уровни детализации. Ниже будут описаны математические модели КА и прибора.

1. *Космический аппарат.* Данная модель описывает теплообмен полной конструкции КА, состоящего из нескольких модулей, с учетом нестационарных внешних потоков тепла 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. Для каждой отдельной стенки распределение тепловой мощности внутренних источников задается с учетом локальных координат расположения РЭА. Модель этого уровня позволяет получить динамику распределения температуры по всей поверхности КА при движении по произвольной эллиптической орбите. По результатам моделирования КА определяются приборы, тепловой режим которых не удовлетворяет техническим условиям (ТУ), проводится их перекомпоновка с последующей проверкой теплового режима.

Расчет теплового режима космического аппарата негерметичного исполнения, работающего в реальных условиях переменных тепловых потоков, возможен только с помощью численного моделирования процессов теплообмена с учетом всех внешних и внутренних источников теплоты и всех тепловых связей между элементами КА. Для того, чтобы иметь возможность проводить анализ тепловых режимов переходных процессов и нестандартных ситуаций, необходимо использовать для тепловой модели КА нестационарную задачу теплопроводности. Основная сложность моделирования КА связана с наличием большого числа тепловыделяющих элементов (отдельных приборов, расположенных на внутренних и внешних стенках отсеков) и тепловых стыков, взаимным влиянием элементов друг на друга, сложностью конфигурации теплоотводящей системы, а также неоднородностью и нестационарностью тепловых потоков от различных источников. Кроме того, для обеспечения автономного теплового режима возможен вариант крепления приборов не на поверхность панели КА, а в прорезные отверстия, когда данные приборы имеют собственные радиаторы, теплоизолированные от самой панели. Реализация полной

тепловой модели невозможна из-за ограниченности ресурсов персонального компьютера типа IBM PC/AT. Поэтому при построении тепловой математической модели КА негерметичного исполнения были сделаны следующие допущения:

- Полагается, что испускаемые и падающие лучистые потоки приборов и от других внутренних элементов системы компенсируют друг друга, поэтому лучистый теплоперенос учитывался только для внешней поверхности радиатора. Расчет излучения ведется в приближении серого тела по формуле $q_R = \epsilon \sigma T^4$;
- Расчет температурных полей панелей с приборами, установленными в прорезные отверстия, проводится по сквозному алгоритму, когда рассчитывается температурное поле всей панели, включая радиаторы вставленных в прорезные отверстия приборов. При этом единую расчетную область составляют панель КА и радиаторы отдельных приборов, помещенных в прорезные отверстия. В расчетной области коэффициенты теплоемкости и теплопроводности соответствуют свойствам материала панели и радиаторов приборов. Термические сопротивления стыков "панель - радиатор прибора" учитываются величиной коэффициента теплопроводности в распределении $\lambda(x,y)$ для данной панели;
- Температурный режим приборов, установленных на панелях КА, не рассчитывается, а их тепловое влияние на тепловой режим КА описывается тепловым потоком, равным отношению потребляемой прибором электрической мощности к площади посадочного места.

Для определения двумерного распределения температурных полей математическая модель записывается в виде системы двумерных нестационарных уравнений с переменными коэффициентами теплопроводности, каждое из которых описывает распространение теплоты в отдельной панели КА

$$c_v \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(x, y) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(x, y) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + q_v(x, y, t) - \alpha_v(x, y, t)T, \quad (1)$$

где c_v — удельная объемная теплоемкость материала; ρ — плотность; T — температура; λ — теплопроводность; t — время; x, y — координаты; q_v — объемная плотность теплового потока от источников тепла; α_v — объемная плотность теплового потока стоков тепла.

При этом используются граничные условиями третьего рода

$$\left[\lambda \frac{\partial T}{\partial l} + \alpha T \right]_{l=0,L} = q|_{l=0,L}, \quad \text{где } l = x, y \quad (2)$$

и условия сопряжения на тепловых стыках между отдельными отсеками

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

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

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

Тепловой поток через ЭВТИ рассчитывается по формуле:

$$q = (T_{\text{пов}} - T_c) / R_{\text{из}},$$

где $R_{\text{из}}$ — тепловое сопротивление ЭВТИ; $T_{\text{пов}}$ и T_c — температуры внешней поверхности ЭВТИ и стенки под ЭВТИ. Температуру поверхности ЭВТИ $T_{\text{пов}}$ можно определить записав уравнение баланса тепловых потоков для поверхности ЭВТИ.

Для численного решения рассмотренной выше системы уравнений необходим большой объем вычислений. Поэтому при выборе численного метода решения задачи одними из самых важных критериев являлись экономичность и устойчивость алгоритма.

Такие качества обеспечивает метод суммарной аппроксимации, в котором используется расщепление задачи по пространственным координатам. При этом процесс решения нестационарной двумерной задачи на каждом временном шаге разбивается на два этапа, на каждом из которых решается локально-одномерная задача с помощью неявной разностной схемы, что обеспечивает безусловную устойчивость алгоритма и возможность увеличения шага по времени.

При численном решении задачи вводится сеточная функция $T_{n,m}^j$, соответствующая значениям температуры в узлах разностной координатной сетки при

$$x_n = (n-1)h_x, \quad y_m = (m-1)h_y, \quad t_j = (j-1)\tau$$

и промежуточная функция $U_{n,m}^j$. На первом этапе решается локально-одномерная задача в направлении x для всех y_m и определяются значения промежуточной функции $U_{n,m}^j$

для $n=1$

$$U_{2,m}^j - \left(1 + \frac{\alpha_{0,x} h_x}{\lambda_{3/2,m}} + \frac{(c_v \rho)_{1,m} h_x^2}{2\lambda_{3/2,m} \tau} + \frac{\alpha_{V1,m} h_x^2}{4\lambda_{3/2,m}} \right) U_{1,m}^j + \frac{q_{0,x} h_x}{\lambda_{3/2,m}} + \frac{h_x^2}{2\lambda_{3/2,m}} \left(\frac{q_{V1,m}}{2} + \frac{(c_v \rho)_{1,m}}{\tau} T_{1,m}^{j-1} \right) = 0 \quad (3)$$

для $n=2, \dots, N-1$

$$U_{n+1,m}^j - \left(1 + \frac{\lambda_{n-1/2,m}}{\lambda_{n+1/2,m}} + \frac{(c_v \rho)_{n,m} h_x^2}{\lambda_{n+1/2,m} \tau} + \frac{\alpha_{Vn,m} h_x^2}{2\lambda_{n+1/2,m}} \right) U_{n,m}^j + \frac{\lambda_{n-1/2,m}}{\lambda_{n+1/2,m}} U_{n-1,m}^j + \frac{h_x^2}{\lambda_{n+1/2,m}} \left(\frac{q_{Vn,m}}{2} + \frac{(c_v \rho)_{n,m}}{\tau} T_{n,m}^{j-1} \right) = 0 \quad (4)$$

для $n=N$

$$- \left(1 + \frac{\alpha_{0,x} h_x}{\lambda_{N-1/2,m}} + \frac{(c_v \rho)_{N,m} h_x^2}{2\lambda_{N-1/2,m} \tau} + \frac{\alpha_{VN,m} h_x^2}{4\lambda_{N-1/2,m}} \right) U_{N,m}^j + U_{N-1,m}^j + \frac{q_{L,x} h_x}{\lambda_{N-1/2,m}} + \frac{h_x^2}{2\lambda_{N-1/2,m}} \left(\frac{q_{VN,m}}{2} + \frac{(c_v \rho)_{N,m}}{\tau} T_{N,m}^{j-1} \right) = 0. \quad (5)$$

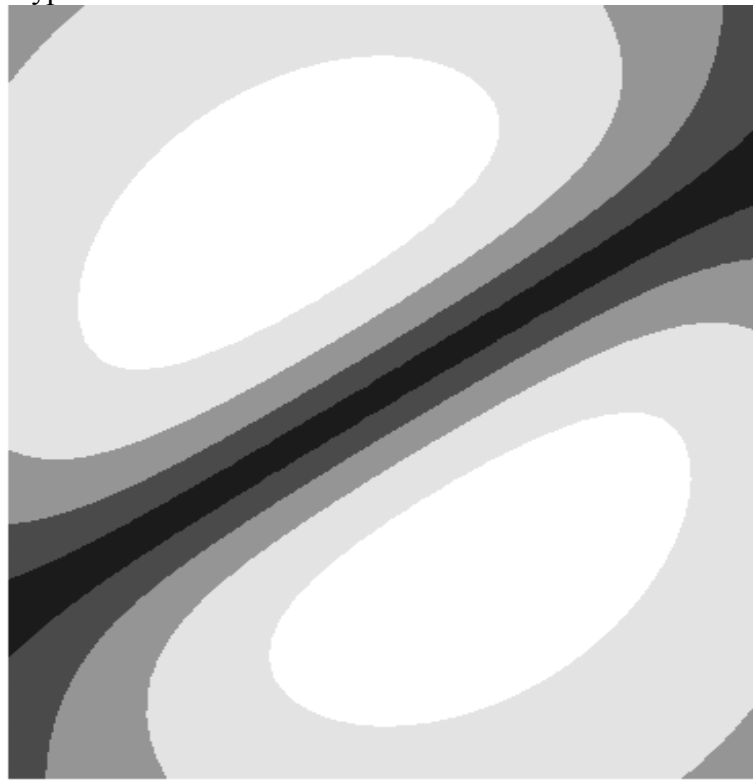
На втором этапе по аналогичным соотношениям решается локально-одномерная задача в направлении y для всех x_n , и вычисляются значения температуры на следующем временном слое

Алгебраические уравнения на сеточные функции $U_{n,m}^j$ и $T_{n,m}^j$ решаются с помощью метода прогонки.

Величина объемного тепловыделения $q_v(x, y, t)$ в уравнении (1) в зависимости от расположения стенки определяется одним или несколькими механизмами из следующего набора: тепловой поток от приборов; тепловой поток, излучаемый солнечными батареями (СБ) на поверхность КА; тепловой поток от Земли; тепловой поток, поступающий от Солнца через ЭВТИ; тепловой поток, излучаемый внешней поверхностью КА в окружающее пространство. Нестационарность тепловых потоков может быть обусловлена нештатной ситуацией (потерей ориентации, вращением КА вокруг своей оси и т.п.), изменением режима работы бортовой аппаратуры, заходом КА в тень Земли, изменением взаимной ориентации КА и Солнца при движении по заданной орбите и соответствующим изменением угла поворота солнечных батарей.

Тепловой поток, поступающий от солнечной батареи зависит от взаимной ориентации стенки и СБ. Распределение теплового потока на стенке от СБ вычислялось при по-

мощи суммирования тепловых потоков от элементарных площадок с учетом температуры поверхности СБ, расстояния и взаимной ориентации элементарных площадок СБ и стенки. Для снижения затрат расчетного времени программы при повороте солнечных батарей новое распределение теплового потока на стенке КА рассчитывается с помощью двумерной интерполяции распределения теплового потока, соответствующего начальному углу поворота СБ. Результаты расчета теплового потока для одной из конструкций СБ в виде двумерного распределения теплового потока на радиаторе КА приведены на рис. 2. На этом рисунке темная полоса по диагонали соответствует тепловому потоку меньше 20 Вт/м². Эта область наименьших значений теплового потока находится в плоскости солнечной батареи. Светлые пятна по обеим сторонам СБ имеют плотность потока больше 120 Вт/м². Таким образом видно, что СБ создают на радиаторах КА существенно неравномерное распределение теплового потока. Это приводит к тому, что в областях с максимальным потоком температура будет выше, чем в области под СБ, и при вращении СБ перемещение пятен теплового потока от СБ будет сопровождаться соответствующим перемещением температурных пятен.



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ОТ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ
 $Q \leq 20.0 \text{ Вт/м}^2$ $20.0 < Q < 53.3$ $53.3 < Q < 86.7$ $86.7 < Q < 120.0$ $Q \geq 120.0 \text{ Вт/м}^2$
 Рис. 2.

Величина теплового потока от Земли зависит от высоты орбиты КА и аналогично определялась суммированием тепловых потоков со всей видимой земной поверхности.

Значение теплового потока через ЭВТИ определяется по величине теплового сопротивления изоляционного покрытия.

Величина теплового излучения с поверхности КА вычислялась в приближении серого тела по формуле $\epsilon \sigma T^4(x, y, t)$.

Таким образом, суммарный тепловой поток на отдельной стенке определяется выражением

$$q_v(x, y, t) = \frac{q_p(x, y) + q_r(x, y) - \varepsilon \sigma T^4(x, y, t)}{\delta_s}, \quad (9)$$

где q_p - поток тепла, попадающий на стенку от приборов, q_r - распределение потока тепла, падающего на стенку от солнечной батареи, Солнца или Земли, δ_s - толщина радиатора прибора или панели.

На основе данной математической модели и разработанного численного алгоритма составлена программа на языке Borland C++ для персонального компьютера.

Для удобства работы с математической моделью теплового режима КА разработана диалоговая оболочка и созданы программные средства, выполняющие следующие функции:

- Чтение информации о компоновке спутника и ввод параметров из файлов с исходными данными, подготовленными с помощью пакета ACAD.
- Возможность графического вывода конфигурации КА, считанной из файлов с данными;
- Непрерывный вывод результатов моделирования в виде цветного изображения двумерных полей температуры всей поверхности спутника, что позволяет наблюдать динамику изменения температурных полей (Рис.3). Также здесь изображаются посадочные места приборов на стенке и выводятся значения мощностей тепловыделения. Предусмотрена возможность остановки выполнения программы и вывод значений температуры в любой точке поверхности КА для данного момента времени;

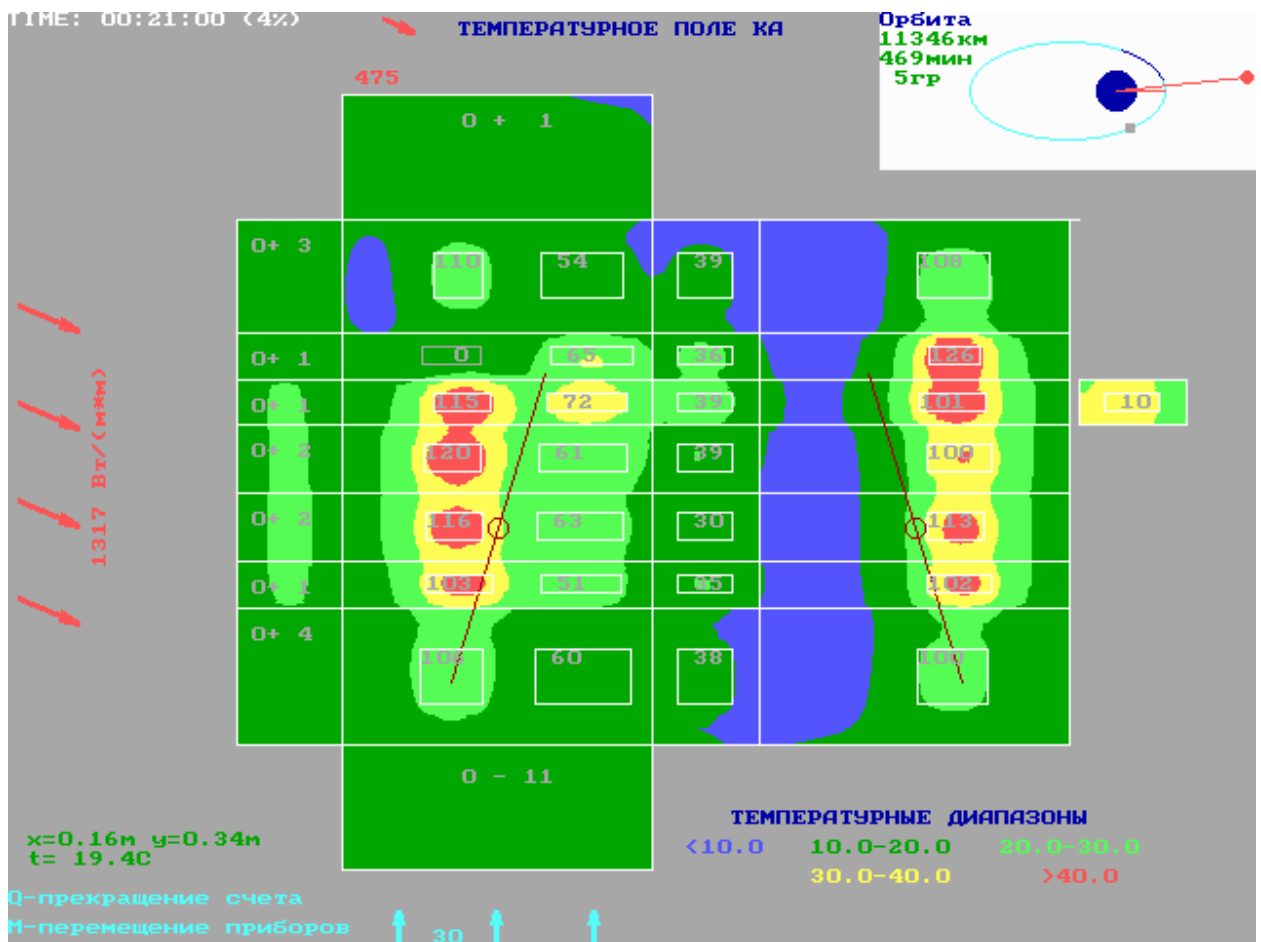


Рис.3. Температурное поле поверхности КА.

- Возможность остановки в любой момент моделируемого процесса с целью перестановки или перемещения приборов в границах данной панели КА для оптимизации компоновки приборов с целью достижения требуемого теплового режима;
- Отображение в каждый момент времени значений и направлений теплового потока от Солнца и Земли на соответствующие поверхности КА, а также ориентацию солнечной батареи;
- Вывод схематичного изображения орбиты КА и ее основных параметров с отображением взаимной ориентации КА, Земли и Солнца, а также возможных теневых участков орбиты;
- Запись в файл распределений температуры на границах всех модулей для программы расчета температурного режима отдельного модуля;
- В конце расчета предусмотрен графический вывод поля температур в цвете каждой отдельной панели и вывод характерных значений температуры, в том числе максимальных и минимальных значений за весь моделируемый период времени с указанием момента времени, когда эти значения были достигнуты.

Таким образом, математическая модель позволяет проводить расчет и оптимизацию теплового режима КА негерметичного исполнения при его движении по орбите, распределить тепловую нагрузку и оптимизировать расположение тепловых источников по панелям. По данным расчета теплового режима КА определяются значения температуры посадочных мест приборов на панели, которые являются граничными значениями для математической модели прибора.

2. *Прибор.* Одним из основных факторов, определяющих эксплуатационную надежность и ресурс радиоэлектронной аппаратуры, является тепловой режим всех используемых в нем радиоэлементов. Необходимо, чтобы температура каждого элемента находилась в диапазоне, предусмотренном техническими условиями.

Тепловая модель прибора моделирует распространение теплоты в составной конструкции, состоящей из боковых стенок и вертикально или горизонтально прикрепленных к ним блоков (плат). Тепловыделение на блоках задается однородным, а выделяемая тепловая мощность на каждом блоке равна суммарной мощности всех расположенных на нем радиоэлементов. Основной сложностью теплового проектирования РЭА является наличие большого количества радиоэлементов и тепловых стыков, взаимное тепловое влияние элементов друг на друга и сложная конфигурация теплоотводящей системы.

Разработанные программные средства теплового проектирования предназначены для расчета и оптимизации тепловых режимов РЭА, работающей в условиях вакуума, когда в отсутствие конвекции механизмами передачи теплоты являются излучение и теплопроводность. Под РЭА в данном рассмотрении понимается прибор, конструктивно выполненный в виде двух сплошных стенок, к которым крепятся блоки (платы) с двухсторонним расположением радиоэлементов. Блоки к стенкам могут крепиться как вертикально (Рис.4), так и горизонтально (Рис.5). Полагается, что прибор установлен на посадочном месте, имеющем фиксированное значение температуры. Это граничное значение температуры определяется из результатов расчета теплового режима КА.

Модель прибора включает в себя систему нестационарных двумерных уравнений теплопроводности с граничными условиями третьего рода и условиями сопряжения на тепловых стыках и предназначена для моделирования процесса распространения теплоты в составной конструкции. Параметрами модели являются геометрические размеры блоков и стенок, мощности тепловыделения, теплофизические свойства материалов, значения тепловых сопротивлений стыков “блок - стенка” и “стенка - посадочное место”, температура посадочного места. При построении математической модели полагалось, что испускаемые и падающие лучистые потоки блоков и других внутренних элементов прибора взаимно

компенсируют друг друга, поэтому излучение в приближении серого тела учитывалось только для внешних поверхностей прибора.

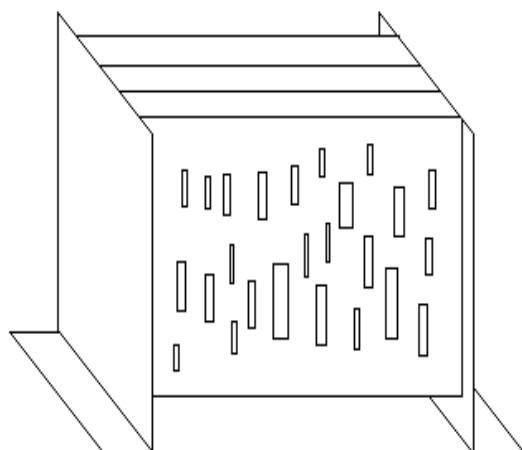


Рис.4. Схема прибора с вертикальным расположением блоков

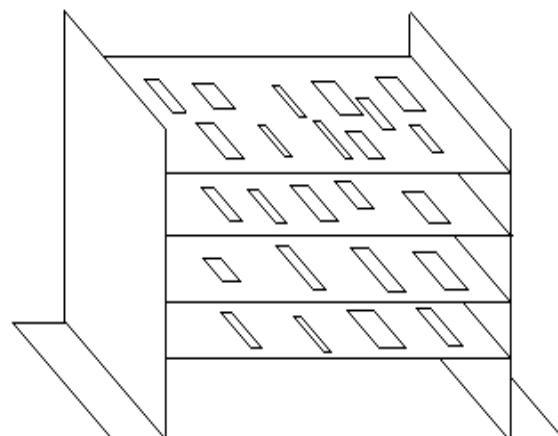


Рис.5. Схема прибора с горизонтальным расположением блоков

Для решения системы уравнений использовался алгоритм расщепления по пространственным координатам с применением неявной локально-одномерной разностной схемы, методика расчета аналогична приведенной в описании модели КА. На основе математической модели были написаны на языке Borland C++ две автономных программы для приборов с вертикальным и горизонтальным расположением блоков. Разработанные программные средства предусматривают графический и цифровой вывод температурных полей всех блоков. По результатам расчета определяются блоки с тепловым режимом, не удовлетворяющим ТУ, проводится перераспределение мощности блоков и переконфигурация прибора с последующим перерасчетом теплового режима. Данная процедура повторяется до тех пор, пока не будет достигнут оптимальный тепловой режим каждого отдельного блока. В процессе теплового проектирования блока программные средства дают возможность многократных переконфигураций и перерасчета теплового режима блока. В случае, если полученный тепловой режим отдельных элементов блока не отвечает ТУ, то производится переконфигурация блока, после чего производится новый расчет и проверка теплового режима. При завершении оптимизации теплового режима блока производится запись файла с новым расположением элементов и протокола с данными расчета.

Математическая модель прибора позволяет проводить расчет и оптимизацию теплового режима РЭА на уровне компоновки блоков в приборе и отдельных радиоэлементов на каждом блоке и добиться работы всех радиоэлементов прибора в оптимальном тепловом режиме.

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 всей бортовой аппаратуры в заданных ТУ пределах.