

# РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕПЛОВОЙ АНАЛИЗ

К.Хайрнасов, к.т.н.<sup>1</sup>

УДК 536.2  
БАК 05.27.00

Электроника – одна из ключевых составляющих современных космических аппаратов (КА). Для надежной и продолжительной эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в космосе необходимо подобрать такие конструктивно-технологические решения (КТР) для силовых конструкций радиоэлектронных блоков и многослойных плат, входящих в их состав [1], которые обеспечивают оптимальный тепловой режим работы РЭА. Эффективный способ оценки теплового состояния электронной компонентной базы (ЭКБ) в окружающей КА среде – математическое моделирование [2]. В статье представлены результаты исследования на основе численных методов тепловых режимов бортовой РЭА, предназначенной для эксплуатации в негерметичных отсеках полноразмерных или малых КА.

## ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве наглядного примера рассмотрим тепловой режим радиоэлектронного блока кассетной конструкции (далее – кассета), которая является базовой для РЭА, эксплуатируемой в вакууме.

В связи с отсутствием конвективных составляющих теплообмена в окружающей КА среде, перенос тепла от ЭКБ будет происходить за счет теплопроводности через составные части конструкции блока к основному стоку тепла на КА, а также за счет излучения в окружающее пространство.

Базовая конструкция кассеты представляет собой плату-рамку из алюминиевого сплава двутаврового сечения, в которой по технологическим соображениям вырезано днище. Многослойная печатная плата (МПП) с SMD-компонентами отечественного и зарубежного

производства устанавливается в вырезанное окно и крепится по периферии алюминиевой рамки с помощью винтовых соединений через теплопроводный компаунд (паста 131-179 (ТУ 6-02-1-342-86)). Ширина контакта МПП с алюминиевой рамкой составляет 7–8 мм.

В таком виде кассета с МПП устанавливается на термостабилизированную термоплату КА, при этом обеспечивается надежный тепловой контакт. Термоплата служит основным стоком тепла для работающей ЭКБ, установленной на МПП.

Учитывая, что конвективная составляющая теплообмена в такого рода кассетах отсутствует, а эффективная теплопроводность слоев по всем направлениям координат весьма незначительна (обычно  $\lambda=0,3-0,4$  Вт/м·К, редко – до 0,7 Вт/м·К), становится очевидным, что в состав МПП необходимо вводить один или несколько промежуточных слоев из теплопроводного материала – медных пластин. С их помощью можно перенести выделяющуюся тепловую энергию от поверхностных источников по трем координатам (3D)

<sup>1</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), доцент, kamillh@mail.ru.

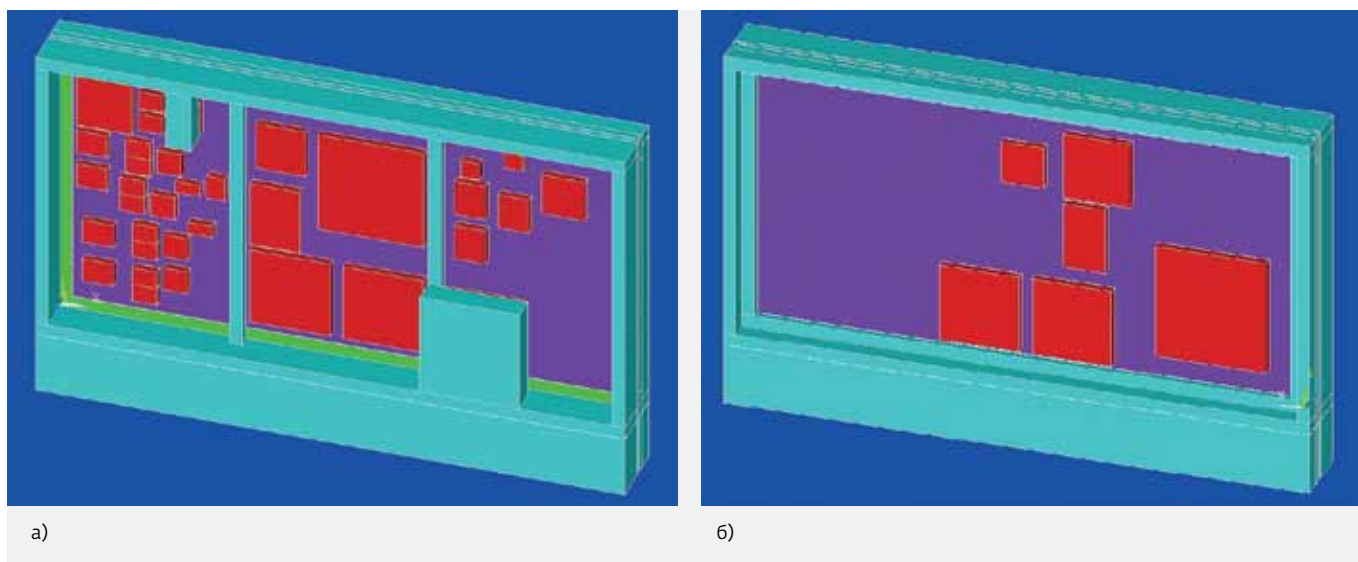


Рис.1. Общий вид кассеты с МПП и установленными на ней ЭРИ, смоделированный в ANSYS: а - спереди; б - сзади

и сбросить на алюминиевую рамку кассеты, которая будет отводить поступающее тепло на термоплату КА. Теплопроводность медных слоев принималась равной  $\lambda = 210 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ .

В рассматриваемом случае МПП состоит из 36 слоев. В состав МПП удалось ввести два медных промежуточных слоя в середине между этими слоями. Встала задача определения толщины медных слоев, обеспечивающей требуемый тепловой режим ЭКБ, установленной на МПП.

Условия эксплуатации характеризуются следующими параметрами:

- кассета установлена в негерметичном отсеке, вакуум от  $10^{-2}$  до  $10^{-6}$  мм.рт.ст. (в расчетах принималось  $10^{-6}$  мм.рт.ст.);
- температура установочной поверхности КА (температура термостатируемой термоплаты КА) поддерживается в пределах от  $-10$  до  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  (в расчетах принималось  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- температура элементов конструкции внутри негерметичного отсека КА, то есть окружающей устройство (кассету) среды, изменяется в диапазоне  $\pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$  (в расчетах принималось  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- непрерывный режим работы;
- генерируемая мощность  $42 \text{ Вт}$ .

Параметры платы-рамки:

- материал АМг3 (теплопроводность  $120 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ );
- габариты:  $0,285 \times 0,150 \times 0,030 \text{ м}$ ;
- габариты основания:  $0,312 \times 0,030 \text{ м}$ .

### РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА КАССЕТЫ С МПП

Задача решалась методом конечных элементов в программной среде ANSYS. Устройство (рис.1)

моделировалось 8-узловыми кубическими конечными элементами (рис.2). Для расчетов использовалось уравнение:

$$Q = C \cdot T,$$

где  $C$  – матрица тепловой проводимости, зависящей от материалов ( $\text{Вт/}^\circ\text{C}$ );  $T$  – неизвестная температура в узлах, подлежащая определению ( $^\circ\text{C}$ );  $Q$  – тепловой источник ( $\text{Вт}$ ).

В качестве тепловой нагрузки, прикладываемой к платам, использовались плотность теплового потока ( $\text{Вт/м}^2$ ) – применительно к граням элементов конструкции – и мощность внутренних источников теплоты ( $\text{Вт/м}^3$ ).

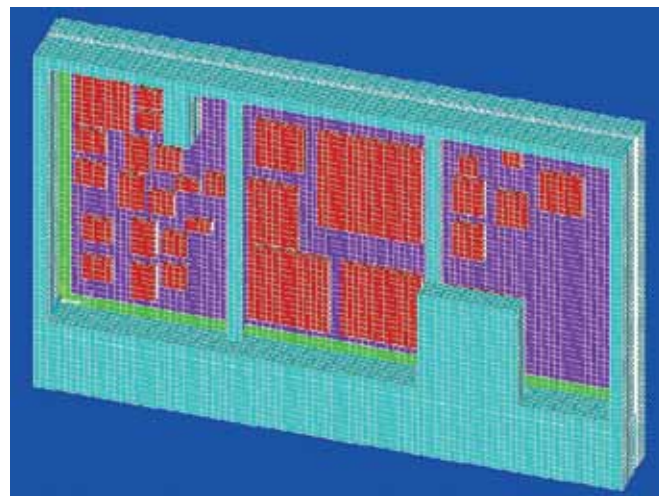
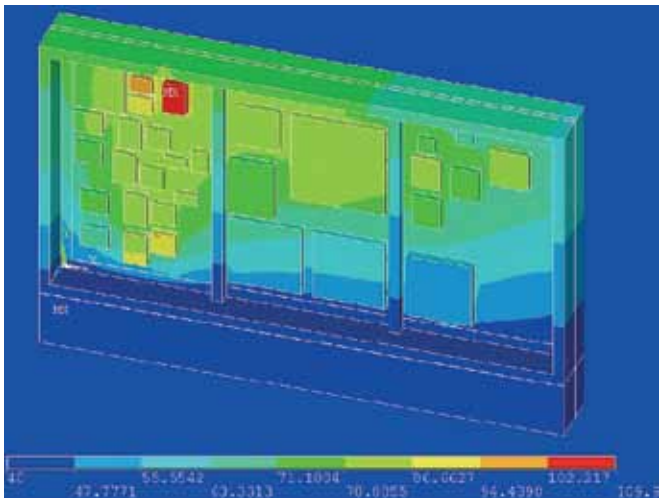
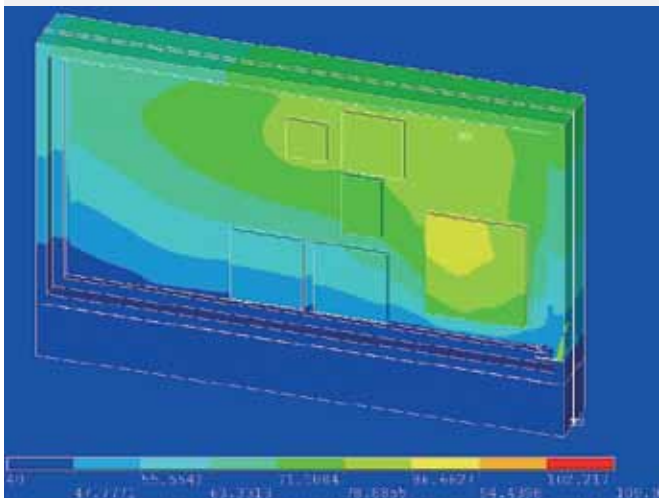


Рис.2. Конечно-элементная аппроксимация модели



а)



б)

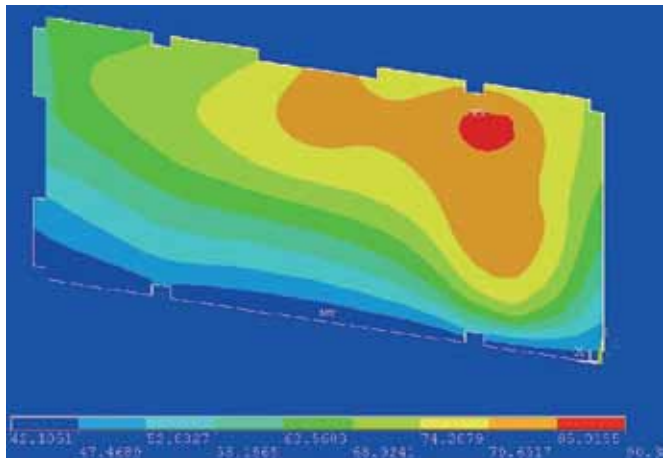
**Рис.3.** Распределение температур в кассете: а – вид спереди; температура от 40,0 до 109,9 °С; б – вид сзади; температура от 40,0 до 94,4 °С

В ходе исследования определялась температура в узлах конечных элементов. Общее число конечных элементов составило 75 690.

Точность полученных данных проверялась путем сгущения сетки конечных элементов. Погрешность вычислений составила порядка 2%. Результаты математического моделирования теплового режима кассеты с МПП представлены на рис.3 и 4.

Зависимость максимальной температуры ЭРИ от толщины промежуточных медных слоев

Толщина медного слоя, мкм	5	20	40	60	105	175	235	300	355	450
Максимальная температура, °С	394	217	159	134	119	110	105	101	98,6	95,1



**Рис.4.** Распределение температуры в медном слое платы; температура от 40,0 до 90,3 °С

Достоверность результатов неоднократно проверялась на тестовых примерах, приведенных в руководстве к программе [3].

Толщина двух медных слоев, размещенных между слоями платы, необходимая для обеспечения требуемого теплового режима ЭКБ, определялась методом перебора. Результаты расчетов показывают (см. таблицу), что максимальная температура электрорадиоизделий (ЭРИ) значительно зависит от толщины медного слоя при увеличении до 105–175 мкм. При толщине слоя более 175 мкм зависимость резко снижается. Эта толщина (175 мкм) и была принята за оптимальную по результатам моделирования тепловых режимов кассеты.

Таким образом, математическое моделирование тепловых режимов базовой кассеты, работающей в условиях негерметичного отсека КА, выполненное методом конечных элементов в ANSYS, показало, что введение в состав многослойных печатных плат дополнительных медных слоев обеспечивает требуемые по ТУ значения температур теплонапряженных ЭРИ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Медведев А.М.** Печатные платы. Конструкции и материалы. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2005.
2. Теплообмен и тепловой режим космических аппаратов / Под ред. Дж. Лукаса. – М.: Мир, 1994.
3. **Годин Э.М., Хайрнатов К.З., Сокольский М.Л.** Системы автоматизированного проектирования и основы систем управления производством: Учебн. пос. – М.: Изд-во МАИ, 2004, 68 с.