

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ТЕПЛОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ С ПЛОСКИМИ ТЕПЛОВЫМИ ТРУБАМИ

Д. А. Нестеров^{1*}, В. В. Деревянко¹, С. Б. Сунцов²

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44

²АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»

Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

E-mail: *ndanda@mail.ru

Разработан программный комплекс для проведения тепловых расчетов бортовой электронной аппаратуры с использованием плоских тепловых труб для отвода тепла от электронных компонентов. Программный комплекс учитывает математические модели теплопередачи в плоских тепловых трубах и является эффективным инструментом теплового проектирования бортовой РЭА в АО «ИСС».

Плоская тепловая труба, охлаждение электронных компонентов, вычислительное моделирование, программный комплекс

SOFTWARE FOR THERMAL SIMULATION ABOARD EQUIPMENT WITH EMBEDDED FLAT HEAT PIPES

D. A. Nesterov^{1*}, V. V. Derevyanko¹, S. B. Suntsov²

¹Institute of Computational Modelling SB RAS

50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems

52, Lenin Street, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

*E-mail: ndanda@mail.ru

The use of flat heat pipes for increasing efficiency of heat removal from the elements of aboard spacecraft electronic equipment demand the development of appropriate software for thermal simulation. The developed software accounts the mathematical models of thermal processes taking place in the flat heat pipes. The software is used in JSC "ISS" as effective tool for thermal design aboard space equipment.

Flat heat pipe, electronics cooling, computational modelling, software for thermal simulation

Для отвода тепла от элементов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в космических аппаратах (КА) применяются теплоотводящие конструкции со встроенными плоскими тепловыми трубами – гипертеплопроводящие секции (ГТПС). Передача тепла в тепловых трубах осуществляется за счет энергии фазового перехода, что обеспечивает эффективную теплопроводность в 10-100 раз превышающую теплопроводностью алюминия [1–3]. Плоские тепловые трубы встраиваются в алюминиевые рамки, на которые наклеиваются платы с радиоэлементами. На рис. 1а показана фотография образца плоской тепловой трубы Т-образного вида, на рис. 1б представлена конструкция блока РЭА с двумя встроенными тепловыми трубами. Разработка ГТПС была проведена кооперацией трех организаций: института вычислительного моделирования СО РАН (г. Красноярск), АО «Информационные

спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева» (г. Железногорск) и АО «Уральский электротехнический комбинат» (г. Новоуральск). Использование ГТПС позволяет снизить температуру электронных радиоэлементов (ЭРИ), увеличить плотность монтажа и мощность используемых схем [4–5].

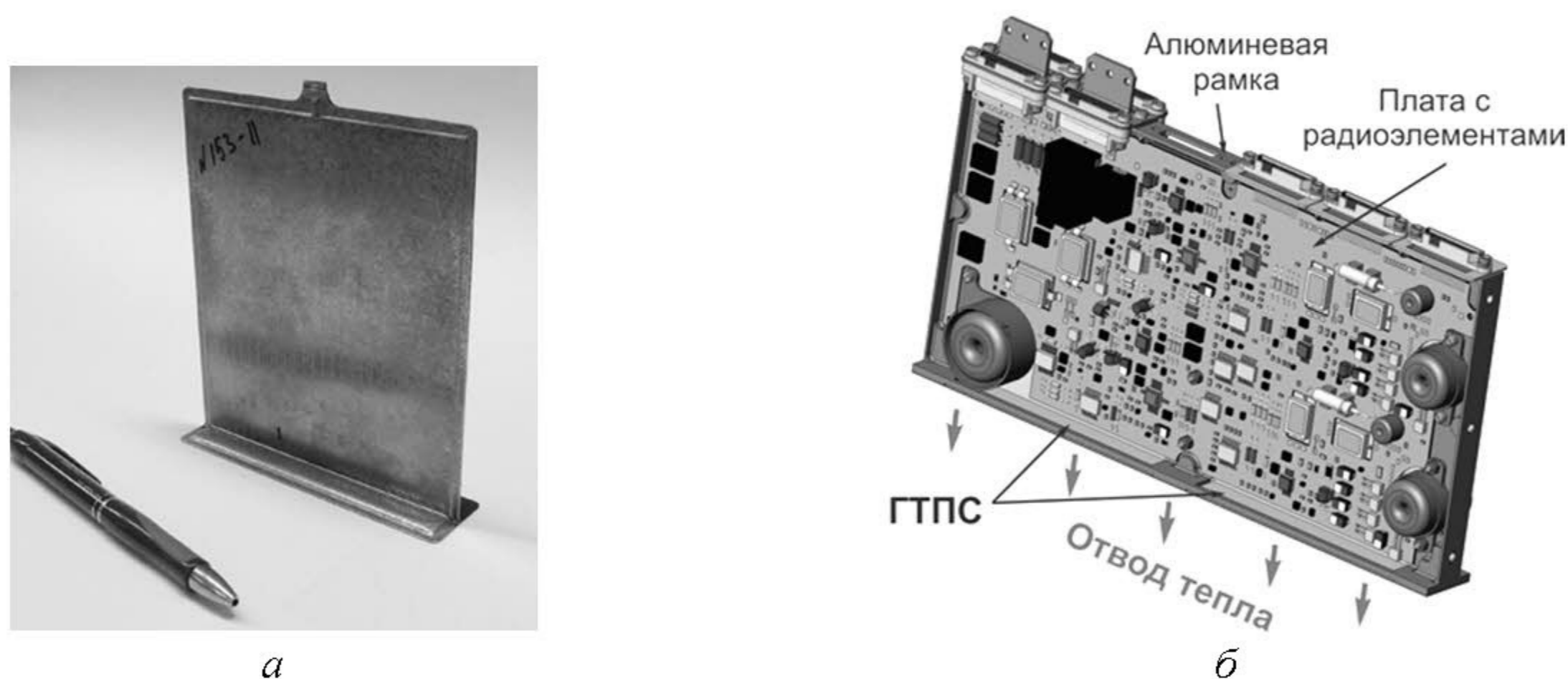


Рис. 1. Образец плоской тепловой трубы – ГТПС (а), блок РЭА со встроенными ГТПС (б)

Внедрение в производство блоков РЭА с использованием ГТПС потребовало изменения методов теплового проектирования. Используемые ранее программные продукты для моделирования теплообмена в бортовой РЭА (в АО «ИСС») не позволяют учитывать физические явления, определяющие перенос тепла в ГТПС. Внутри тепловой трубы в местах подвода тепла жидкий теплоноситель испаряется и движется по паровым каналам к области охлаждения, где пар конденсируется и движется обратно по фитилю за счет капиллярных сил. Кроме того эффективная работа тепловой трубы требует выполнения определенных условий, связанных с расположением и плотностью мощности источников тепла, с теплофизическими характеристиками теплоносителя, температурой теплоотвода, структурой фитиля и паровых каналов. Эти условия зависят от множества взаимосвязанных параметров и должны быть рассчитаны и учтены на стадии проектирования. Поэтому создание бортовых систем с применением ГТПС потребовало разработки программного комплекса для проведения тепловых расчетов РЭА с использованием моделей, учитывающих работу плоских тепловых труб.

В ИВМ СО РАН по заказу АО «ИСС» был разработан программный комплекс моделирования бортовой РЭА, который обеспечивает полный тепловой расчет прибора РЭА, содержащего в своем составе блоки со встроенными плоскими тепловыми трубами. Входными данными являются геометрические и теплофизические характеристики узлов прибора, расположение и мощность тепловыделяющих элементов, параметры тепловых контактов. При использовании ГТПС учитываются характеристики теплоносителя и материалов фитиля и корпуса тепловой трубы, параметры и геометрия пористой структуры. Выходными данными программного комплекса являются температуры элементов, тепловые поля конструкций прибора РЭА и поверхности теплоотводящего основания. При наличии ГТПС определяются распределения давлений и скоростей паровой и жидкостной фаз теплоносителя, наличие зон осушения или замерзания теплоносителя.

Расчетный модуль программного комплекса использует в работе набор различных математических моделей для решения тепловой задачи. Для плоских тепловых труб были разработаны специальные модели и алгоритмы, основанные на совместном решении двухмерных уравнений теплопроводности, уравнений сохранения массы жидкости и пара, дополненных уравнениями Дарси. В модели используются усредненные характеристики,

которые отражают проницаемость внутренней структуры плоской тепловой трубы для пара и жидкости. Система уравнений в области плоской тепловой трубы имеет вид:

$$\operatorname{div}(-d\lambda\nabla T) + gT + q_{ev} = f, \quad (1)$$

$$\operatorname{div}(d \cdot \rho_v \mu_v^{-1} \mathbf{K}_v \nabla P_v) = -q_{ev} / H_{ev}, \quad \operatorname{div}(d \rho_l \mu_l^{-1} \mathbf{K}_l \nabla P_l) = q_{ev} / H_{ev}, \quad (2)$$

где $T(x, y)$ – распределение температуры; d и λ – толщина и эффективная теплопроводность корпуса тепловой трубы (без теплоносителя); $g(x, y)$ и $f(x, y)$ – коэффициенты, учитывающие внешние потоки тепла; $q_{ev}(x, y)$ – поглощаемое испаряющимся теплоносителем в тепловой трубе тепло ($\text{Вт}/\text{м}^2$); $P_l(x, y)$ и $P_v(x, y)$ – давления жидкости и пара; H_{ev} – скрытая теплота парообразования теплоносителя; μ и ρ – вязкость и плотность фаз теплоносителя; \mathbf{K}_l , \mathbf{K}_v – коэффициенты (в общем случае тензоры), определяющие проницаемость капиллярной структуры тепловой трубы для жидкости и пара.

Система уравнений (1) – (2) решается итерационно, при этом на каждой итерации после расчета распределения давлений жидкости и пара проверяется капиллярное условие: $P_v(x, y) - P_l(x, y) < 2\sigma \cos(\theta) / r_c$. В области, где это условие не выполняется, перенос тепла осуществляется только за счет теплопроводности конструкции. Величина q_{ev} в этой области принимается равной нулю для последующих итераций.

В результате работы создан эффективный инструмент для теплового проектирования приборов и блоков бортовой РЭА, в конструкции которых используются встроенные плоские тепловые трубы. Программный комплекс позволяет осуществлять оптимизацию конструкции и компоновки бортовой РЭА с учетом особенностей и возможностей ГТПС. Эффективное использование ГТПС позволяет использовать более мощное и компактное оборудование, что приводит к увеличению энергоемкости и уменьшения габаритов и массы КА.

Библиографические ссылки

1. Чи С. Тепловые трубы теория и практика. – М. : Машиностроение, 1981. 207 с.
2. Дан П.Д., Рей Д.А. Тепловые трубы. Перевод с английского Ю.А. Зейгарника. –М. : Энергия, 1979. 272 с.
3. Amir Faghri, Heat pipe science and technology. Taylor and Francis, London, 1995, 874 p.
4. Derevyanko V., Nesterov D., Matrenin V., and etc. The results of mathematical modeling and experimental investigations of the flat heat pipes // Proceeding of the 15th International Heat Pipe Conference. Clemson, SC, USA. April 25-30, 2010.
5. Derevyanko V., Nesterov D., Suntsov S. Experimental investigation of flat heat pipes to remove high heat fluxes // Proceeding of the 16th International Heat Pipe Conference. Lyon, France. May 20-24, 2012.

References

1. Chi S. W., Heat pipe theory and practice: a sourcebook (Series in thermal and fluids engineering). Hemisphere Pub. Corp., 1976. 242 p.
2. Dunn P. D., Reay D.A., Heat Pipes. Pergamon Press, Oxford, New York, 1976. 299 p.
3. Amir Faghri, Heat pipe science and technology. Taylor and Francis, London, 1995, 874 p.
4. Derevyanko V., Nesterov D., Matrenin V., and etc. The results of mathematical modeling and experimental investigations of the flat heat pipes. Proceeding of the 15th International Heat Pipe Conference. Clemson, SC, USA. April 25-30, 2010.
5. Derevyanko V., Nesterov D., Suntsov S. Experimental investigation of flat heat pipes to remove high heat fluxes. Proceeding of the 16th International Heat Pipe Conference. Lyon, France. May 20-24, 2012.

© Нестеров Д. А., Деревянко В. В., Сунцов С. Б., 2016