

ПЛОСКИЕ ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ ДЛЯ ОТВОДА ТЕПЛА ОТ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ В КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

В. А. Деревянко¹, Д. А. Нестеров¹, В. Е. Косенко², В. Д. Звонарь², В. Е. Чеботарев²,
Р. Ф. Фаткулин², С. Б. Сунцов²

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН

Россия, 660036, Красноярск, ул. Академгородок, 50. E-mail: dv@icm.krasn.ru

²ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

Описаны медно-водяные плоские тепловые трубы, разработанные для отвода тепла от компонентов бортовой аппаратуры космического аппарата. Представлена математическая модель переноса тепла в плоских тепловых трубах, которая позволяет рассчитать температурное поле и максимальную тепловую нагрузку. Проведенные расчеты позволили оценить теплофизические характеристики плоских тепловых труб, а также показали перспективность их использования в системах отвода тепла от радиоэлектронной аппаратуры. Проведены экспериментальные исследования образцов T-образных плоских тепловых труб. Представленные результаты экспериментов подтверждают высокую эффективность переноса тепла. Описанные плоские тепловые трубы позволяют существенно увеличить эффективность системы отвода тепла и снизить температурный перепад между тепловыделяющими элементами и радиатором космического аппарата.

Ключевые слова: плоская тепловая труба, охлаждение радиоэлектронной аппаратуры.

FLAT HEAT PIPES FOR HEAT REMOVAL FROM ELECTRONIC EQUIPMENT IN SPACE VEHICLES

V. A. Derevyanko¹, D. A. Nesterov¹, V. E. Kosenko², V. D. Zvonar², V. E. Chebotarev²,
R. F. Fatkulin², S. B. Suntsov²

¹Institute of Computational Modeling of the SB RAS

50 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: dv@icm.krasn.ru

²JSC "Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems"
52 Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia

The copper-water flat heat pipes for heat removal from electronic components of space vehicle are presented. The mathematical model of heat transfer in flat heat pipes, which allows to calculate temperature fields and maximum heat load, is presented. Numerical calculations performed allowed to evaluate thermal characteristics of flat heat pipes and showed the prospectivity of their use in removal of heat from electronic equipment. Experimental investigations of T-shaped flat heat pipes are conducted. The presented experimental results confirmed the high efficiency of heat transfer. Developed flat heat pipes allow to significantly increase the thermal performance of heat removal system and reduce the temperature drop between heat sources and heat sink of the spacecraft.

Keywords: flat heat pipe, electronic cooling.

Перспективы развития информационных спутниковых систем в России связаны с созданием негерметичных космических аппаратов (КА). Такие аппараты уже вошли в состав глобальной навигационной системы ГЛОНАСС и в недалеком будущем станут ее основой. Одновременно идет разработка новых моделей КА с увеличенной мощностью более 5 кВт, сроком активного существования более 12 лет и с повышенными точностными навигационно-временными характеристиками.

Одной из главных проблем является обеспечение оптимального теплового режима радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) на борту КА. В условиях постоянно возрастающей мощности бортовой аппаратуры и

необходимости уменьшения ее объема и массы, обеспечение работы КА возможно только за счет увеличения эффективности систем теплоотвода.

Одним из эффективных способов увеличения эффективности систем теплоотвода является использование встроенных плоских тепловых труб в конструкции бортовой аппаратуры КА. Передача тепла в тепловых трубах осуществляется за счет энергии фазового перехода, что обеспечивает эффективную теплопроводность в 10–100 раз превышающую теплопроводность алюминия [0–0].

В данной статье приведены результаты исследований плоских тепловых труб (гипертеплопроводящих секций или ГТПС), которые разработаны и использу-

ются для отвода тепла от РЭА в бортовой аппаратуре КА. Создание и испытание перспективных теплоотводящих секций проведено кооперацией трех организаций: института вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева», г. Железногорск и ОАО «Уральский электротехнический комбинат», г. Новоуральск.

Описание плоских тепловых труб. Разработанная тепловая труба представляет собой плоскую тонкую герметичную конструкцию толщиной ≈ 2 мм, внутри которой находится фитиль из спеченного металлического порошка, заполненный жидким теплоносителем. Внутри фитиля располагаются каналы для движения пара (рис. 1, а). Фитиль и паровые каналы обеспечивают движение теплоносителя в любом направлении в плоскости тепловой трубы. На поверхности тепловой трубы произвольным образом могут располагаться источники и стоки тепла (рис. 1, б). В местах подвода тепла жидкость испаряется и движется по паровым каналам к области охлаждения, где пар конденсируется и движется обратно по фитилю. Скрытая теплота парообразования теплоносителя обеспечивает высокую эффективность передачи тепла. Движение рабочего вещества осуществляется за счет капиллярных сил.

На рис. 2, а показана фотография образца плоской медной тепловой трубы Т-образного вида (ГТПС)

покрытой никелем для защиты от коррозии. Образец имеет ширину 110 мм, высоту 130 мм, ширину нижней части 30 мм и толщину 2,3 мм.

Тепловая труба предназначена для использования в конструкциях КА, которые созданы для интенсивного отвода тепла от радиоэлектронной аппаратуры с повышенным тепловыделением на борту космического аппарата (рис. 2, б). Конструктивно они состоят из алюминиевых рамок, в которые вклеены Т-образные тепловые трубы. Непосредственно на тепловые трубы устанавливаются платы с электронными элементами – источники тепла. Нижняя часть тепловых труб прижимается при помощи креплений алюминиевой рамки к охлаждаемой поверхности системы терморегулирования КА.

Т-образная конструкция тепловых труб позволяет создавать основания по размерам аналогичные тем, которые использовались ранее и были изготовлены целиком из алюминия.

Таким образом, появляется возможность, не меняя внутренней конструкции и компоновки прибора, усовершенствовать систему отвода тепла и значительно снизить температуры радиоэлементов в имеющихся компоновках. Однако потенциал разработанных плоских тепловых труб позволяет создавать иные компоновки со значительно более мощными радиоэлементами и высокой плотностью их монтажа.

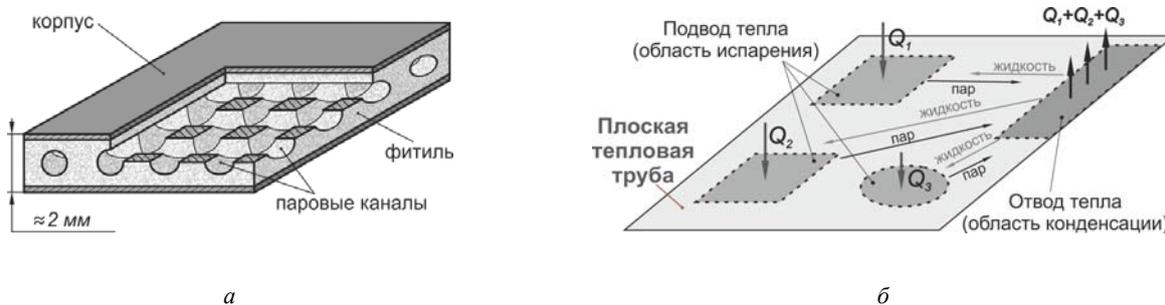


Рис. 1. Внутренняя структура плоской тепловой трубы (а) и процесс переноса тепла (б)

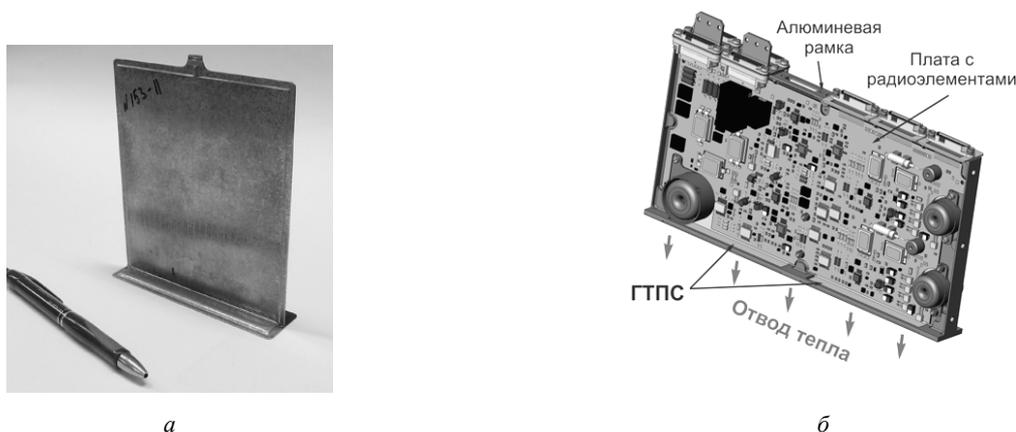


Рис. 2. Образец плоской тепловой трубы – ГТПС (а), блок РЭА с встроенными ГТПС (б)

Математическая модель. Для расчета теплового режима работы изделий с использованием плоских тепловых труб была разработана математическая модель, основанная на решении двухмерных стационарных уравнений сохранения массы, дополненных уравнениями Дарси, для жидкости и пара. Для заданного расположения источников и стоков тепла на поверхности плоской тепловой трубы рассчитываются распределения давлений и потоков массы для обеих фаз теплоносителя. Анализ работоспособности тепловой трубы для заданных условий основан на проверке выполнения капиллярного ограничения. Разница в давлении между жидкой и газообразной фазами теплоносителя в каждой точке трубы не должна превышать величины капиллярного напора, который способен развивать пористая структура.

Для жидкой фазы теплоносителя уравнение будет иметь вид:

$$\operatorname{div}(\beta_l \nabla P_l) = q_{ev} / H_{ev}, \quad (1)$$

где $\beta_l = d_{hp} S_l K \frac{\rho_l}{\mu_l}$ – коэффициент в виде диагональ-

ной матрицы, отражающий гидравлическое сопротивление пористой структуры для жидкости (м·с); d – толщина тепловой трубы (м); K – проницаемость фитиля (м²), ρ_l и μ_l – плотность и вязкость теплоносителя соответственно (кг/м³ и кг/(м·с)), $P_l(x, y)$ – давление теплоносителя (Па), $q_{ev}(x, y)$ – заданное распределение мощности тепловыделения по поверхности тепловой трубы (Вт/м²), H_{ev} – скрытая теплота порообразования теплоносителя.

Матрица $S_l = \begin{pmatrix} S_{lx} & 0 \\ 0 & S_{ly} \end{pmatrix}$ определяет долю эффек-

тивного сечения фитиля от общего сечения тепловой трубы для продольного направления x (компонент S_{lx}) и поперечного y (компонент S_{ly}) соответственно.

Матрица S_l определяет анизотропность проницаемости внутренней структуры тепловой трубы. Для газообразной фазы уравнение имеет аналогичный вид.

В ряде случаев коэффициенты уравнения (1) можно считать постоянными. Если внутренняя структура плоской тепловой трубы в разных местах имеет разные свойства, коэффициенты уравнения будут зависеть от координаты. В общем случае можно учитывать зависимость свойств теплоносителя от температуры. Тогда уравнение становится нелинейным, что требует использовать более сложные методы его решения.

Решением уравнения (1) и аналогичного уравнения для пара являются распределения давления теплоносителя в паровой и жидкостной фазах $P_v(x, y)$ и $P_l(x, y)$ по плоскости тепловой трубы. Разность давлений между фазами $\Delta P(x, y) = P_v(x, y) - P_l(x, y)$ не должна превышать величину капиллярного напора $P_c = 2\sigma \cos(\theta) / r_c$, где r_c – радиус пор фитиля, σ – коэффициент поверхностного натяжения, θ – предельный угол смачивания материала фитиля теплоносите-

лем. Плоская тепловая труба работает успешно при выполнении условия: $\max[\Delta P(x, y) / P_c] < 1$.

Для анализа работы плоской тепловой трубы с точки зрения капиллярных ограничений удобно использовать распределение капиллярной нагрузки

$$\alpha(x, y) = \frac{\Delta P(x, y)}{P_c(x, y)}.$$

Распределение $\alpha(x, y)$ характеризует эффективность работы для заданной конфигурации источников и стоков тепла. Плоская тепловая труба будет работать эффективно (без осушения фитиля) в случае, если капиллярная нагрузка всюду не превышает единицу, то есть капиллярное условие выполняется. Анализ распределения капиллярной нагрузки по плоской тепловой трубе позволяет выявить наиболее нагруженные «узкие» места, а также оценить запас по капиллярному ограничению (оценить возможность увеличения тепловой нагрузки).

Дифференциальное уравнение (1) является параболическим, которое целесообразно решать численными методами. Методы решения таких уравнений широко известны, например можно использовать метод простой итерации с Чебышевским набором параметров [0; 0].

Распределение температуры на поверхности плоской тепловой трубы определяется исходя из температуры пара в каналах, заданных потоков тепла на поверхности и теплового сопротивления тепловой трубы в поперечном направлении:

$$T(x, y) = T_s(P_v(x, y)) + Q(x, y)R, \quad (2)$$

где $R = R_f + R_w$ – сумма тепловых сопротивлений фитиля и стенки корпуса. Тепловое сопротивление фитиля можно оценить: $R_f = c / k_f$, где c – толщина фитиля (расстояние от парового канала до стенки корпуса тепловой трубы), k_f – теплопроводность наполненного теплоносителем фитиля. Тепловое сопротивление стенки равно: $R_w = t / k_w$, где t – толщина стенки, k_w – теплопроводность материала корпуса.

На рис. 3 показан результат расчета теплообмена Т-образной плоской тепловой трубы. На поверхности установлено несколько источников тепла различной формы и мощности. Суммарная подводимая мощность составляет 80 Вт. Тепло отводится от нижней части тепловой трубы. В расчете принято, что источники тепла и холодильник прижат к поверхности тепловой трубы через теплопроводящую пасту толщиной 0,2 мм и теплопроводностью 1,8 Вт/(м·К). Температура холодильника равна 20 °С.

Распределение капиллярной нагрузки показано на рис. 3, а. Работоспособность панели сохраняется, когда эта величина меньше единицы (или меньше 100 %). Результаты расчетов показывают, что капиллярная нагрузка не превышает 70 % от максимально возможного значения, то есть при данных условиях тепловая труба успешно работает с хорошим запасом.

На рис. 3, б показано распределение температуры поверхности тепловой трубы и температуры источников тепла. Максимальное значение температуры

менее 27,5 °С. Перепад температуры вдоль поверхности не превышает 2,5 градусов. Аналогичные градиенты температуры при рассматриваемой конфигурации тепловых потоков соответствуют материалу с теплопроводностью более $6 \cdot 10^4$ Вт/(м·К). Тепловая труба показывает очень высокую эффективность передачи тепла.

Перепад температуры между самым горячим источником тепла (30 °С) и холодильником (20 °С) определяется большей частью тепловым сопротивлением контактов между источниками и стоками тепла и поверхностью тепловой трубы. Поэтому необходимо уделять особое внимание вопросу монтажа элементов на тепловую трубу, особенно с высоким значением плотности тепловой мощности.

Результаты экспериментов. Далее приведены результаты экспериментальных исследований, демонстрирующие возможности Т-образной плоской тепловой трубы (рис. 2, а). На рис. 4, а показана схема эксперимента. На горизонтально расположенную тепловую трубу устанавливался электрический нагреватель размерами 25 мм × 110 мм мощностью 50 Вт на расстоянии 100 мм от холодильника. Холодильник представляет собой медную пластину с трубкой, в которую поступает вода с температурой 30 °С. Холодильник и нагреватель прижимаются к тепловой трубе через теплопроводящую пасту, имеющую теплопроводность $\lambda = 1,8$ Вт/(м·К). Нагреватель и тепловая труба со стороны установки нагревателя были защищены теплоизоляцией. Температурное поле противоположной стороны тепловой трубы фиксировалось тепловизором.

На рис. 4, б показано тепловое поле поверхности плоской тепловой трубы и боковой стороны медной пластины холодильника. Максимальное значение температуры поверхности тепловой трубы (в области нагревателя) не превышает 37,5 °С, минимальное значение – не ниже 36 °С. Таким образом поверхность тепловой трубы

остается изотермической в пределах 1,5 °С. Значение температуры боковой стороны пластины холодильника лежит в пределах 33–34 °С.

На рис. 5 сплошной линией показано продольное распределение температуры поверхности тепловой трубы (вдоль зеленой линии на рис. 4, б). Пунктирными линиями показаны температурные профили, которые возникали бы при передаче тепла 50 Вт по пластине аналогичных размеров из алюминия и меди. Эффективная теплопроводность плоской тепловой трубы при рабочей температуре ≈ 35 °С и тепловой нагрузке 50 Вт превышает 10^4 Вт/(м·К), что более чем в 25 раз выше теплопроводности меди.

Целью следующих экспериментов являлось исследование эффективности теплопередачи Т-образных плоских тепловых труб при разной рабочей температуре. В экспериментах использовались образцы конструкций, которые созданы для интенсивного отвода тепла в блоках радиоэлектронной аппаратуры с повышенным тепловыделением на борту космического аппарата (рис. 2, б).

В эксперименте имитировалась работа плоских тепловых труб борту КА. Схема экспериментальной установки показана на рис. 6. Образцы конструкций с тепловыми трубами устанавливались в вакуумную камеру. Нижняя часть тепловых труб прижималась к интенсивно охлаждаемому радиатору – холодильнику. В ходе эксперимента интенсивность охлаждения контролировалась (температура охлаждающей жидкости холодильника менялась в диапазоне от –10 до +60 °С). На одну из сторон тепловых труб устанавливались плоские нагреватели имитирующие выделение тепла радиоэлементами. На каждую тепловую трубу подводилась тепловая мощность 50 Вт. Тепловое поле противоположной стороны тепловой трубы фиксировалось помощью тепловизора. Дополнительный контроль температуры осуществлялся термомпарами.

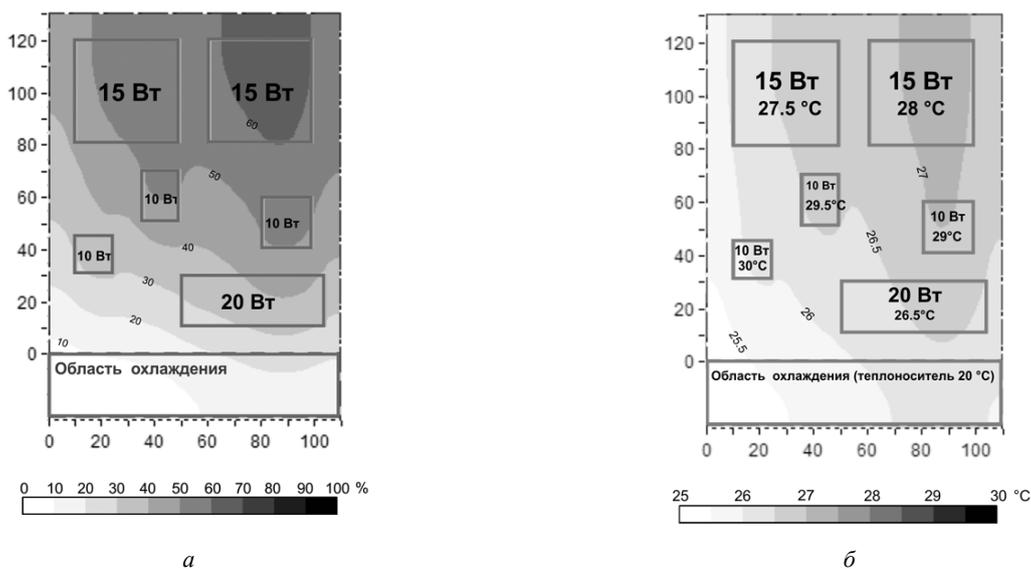


Рис. 3. Результат расчета теплового режима Т-образной плоской тепловой трубы: а – распределение капиллярной нагрузки (шкала в %); б – распределение температуры поверхности тепловой трубы и температуры источников тепла (шкала в °С)

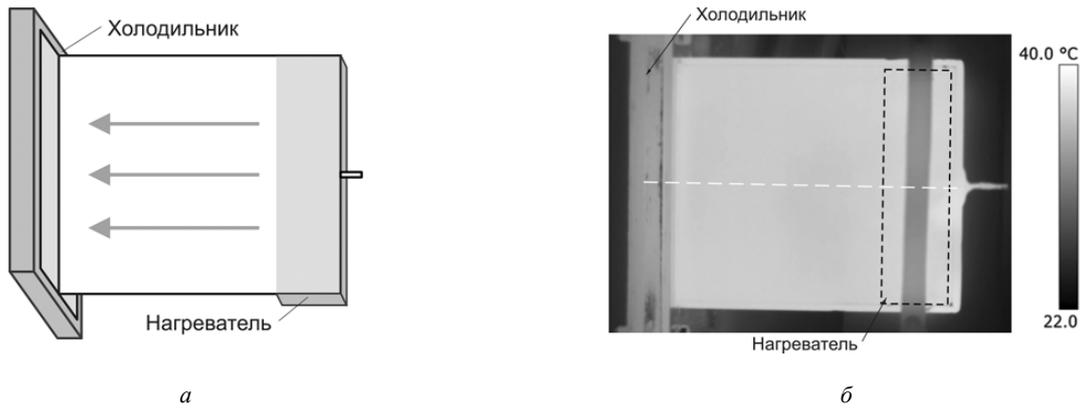


Рис. 4. Схема эксперимента (а) и тепловой поле поверхности тепловой трубы (б)

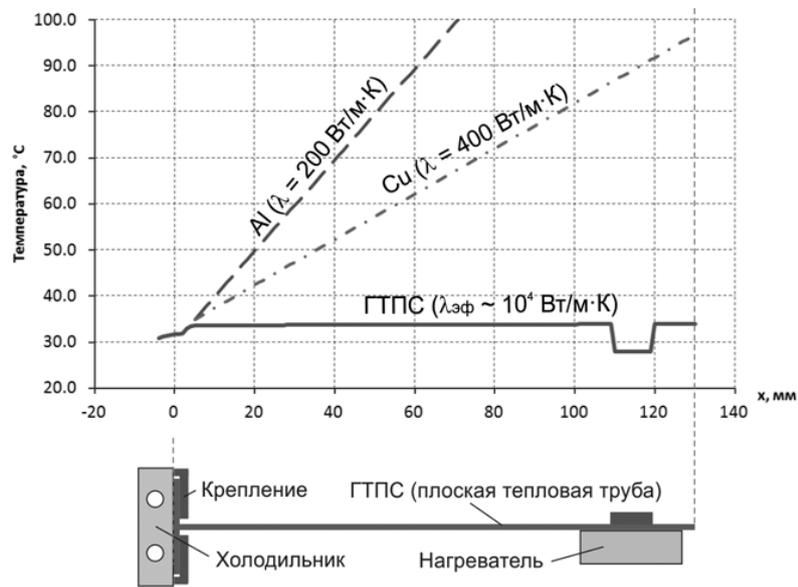


Рис. 5. Продольное распределение температуры при мощности 50 Вт

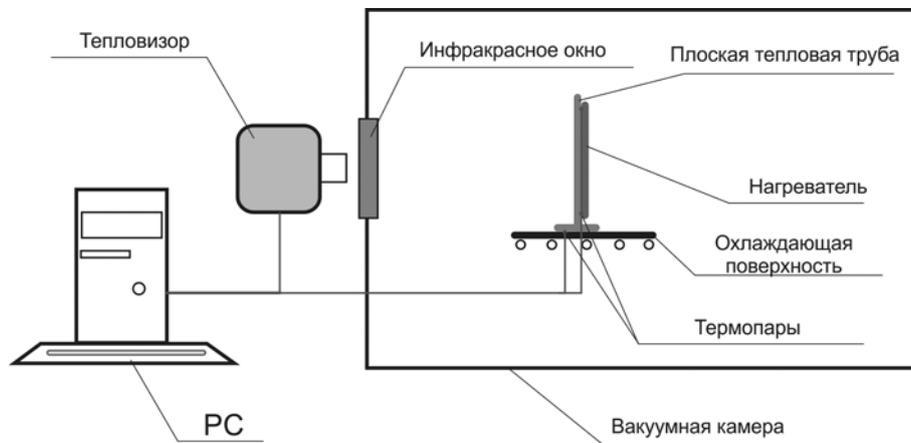


Рис. 6. Схема эксперимента по исследованию характеристик Т-образной плоской тепловой трубы

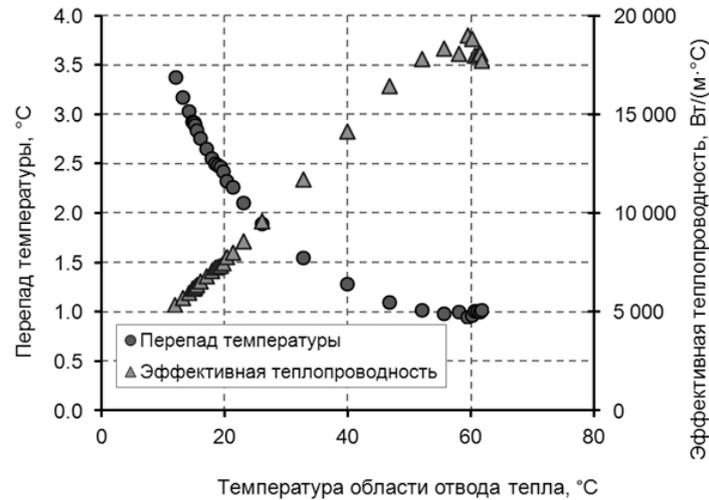


Рис. 7. Зависимость перепада температуры вдоль направления теплопереноса и эффективный коэффициент теплопроводности в зависимости от температуры области теплоотвода:
1 – перепад температуры; 2 – эффективная теплопроводность

На рис. 7 показана зависимость перепада температуры вдоль тепловой трубы (между верхней точкой и областью отвода тепла) и соответствующая эффективная теплопроводность в зависимости от температуры области отвода тепла. Эффективность теплопередачи сильно зависит от рабочей температуры. При температурах ниже $\approx 25^\circ$ плотность водяного пара низкая, что приводит к значительному перепаду давления, а, следовательно, и температуры вдоль движения пара по каналам. С ростом рабочей температуры эффективность теплопередачи резко возрастает. При температуре более 25°C перепад температуры не превышает 2 градусов. При этом эффективная теплопроводность достигает $17\,000\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$.

В работе описаны плоские тепловые трубы, разработанные для отвода тепла от радиоэлектронной аппаратуры на борту космического аппарата. Т-образная форма позволяет использовать тепловые трубы в качестве оснований для монтажа электронных компонентов вместо используемых ранее алюминиевых конструкций.

Описанная в работе математическая модель позволяет выяснить возможность работы плоской тепловой трубы для заданных условий, а также определить температурное поле поверхности. Проведенные расчеты на основе модели позволили оценить теплофизические характеристики плоских тепловых труб. Была показана перспективность их использования в системах отвода тепла от радиоэлектронной аппаратуры.

Результаты экспериментальных измерений подтвердили высокую эффективность теплопередачи разработанных плоских тепловых труб. Использование Т-образных конструкций в качестве основания под радиоэлементы на борту космического аппарата

значительно повысит эффективность охлаждения радиоэлектронных элементов, особенно с высоким уровнем плотности тепловой мощности. Появляется возможность использовать более мощное и компактное оборудование, что, в конечном итоге, приведет к увеличению энергоемкости и уменьшения габаритов и массы КА.

Библиографические ссылки

1. Чи С. Тепловые трубы: Теория и практика / пер. с англ. В. Я. Сидорова. М.: Машиностроение, 1981. 207 с.
2. Дан П. Д., Рей Д. А., Тепловые трубы / пер. с англ. Ю. А. Зейгарник. М.: Энергия, 1979. 272 с.
3. Amir Faghri, Heat pipe science and technology. Taylor and Francis. 1995. 874 p.
4. Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1989. 616 с.
5. Самарский А. А., Николаев Е. С. Методы решения сеточных уравнений. М.: Наука, 1978. 592 с.

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. 1995. 874 p.
4. Samarskii A. A. The Theory of Difference Schemes. USA, Marcel Dekker, Inc. 2001, 762 p.
5. Samarskij A. A., Nikolaev E. S., Numerical Methods for Grid Equations. Birkhäuser Basel, 1988. 284 p.