

АВИАЦИОННАЯ И КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА
AEROSPACE ENGINEERING

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-3-211-219

УДК 629.7:620.22:536.2

Научная статья

Моделирование охлаждения процессора в наноспутнике
с помощью контурных тепловых труб

Ван Юй, О.В. Денисов, Л.В. Денисова

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),
Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

История статьи:

Поступила в редакцию: 05 августа 2019

Доработана: 18 октября 2019

Принята к публикации: 25 октября 2019

Ключевые слова:

наноспутники, контурные тепловые трубы, композиционные материалы, углепластик, анизотропия коэффициента теплопроводности, математическое моделирование, метод конечных элементов

Одной из ключевых проблем при проектировании наноспутников является обеспечение заданного температурного диапазона работы радиоэлектронной аппаратуры, мощность тепловыделения которой может составлять десятки ватт. Традиционные для больших космических аппаратов системы терморегулирования не подходят для наноспутников из-за ограничений на массогабаритные характеристики. Заданный тепловой режим наноспутников можно обеспечить с помощью систем с удаленным стоком теплоты – миниатюрных контурных тепловых труб. В последние годы в России налажено их серийное производство, однако они еще не нашли широкого применения в наноспутниках. Целью работы является обоснование возможности использования миниатюрных контурных тепловых труб для отведения избыточной теплоты от процессора бортового компьютера на углепластиковый корпус наноспутника. В программе ANSYS проведено параметрическое моделирование влияния геометрических размеров и значений эффективного коэффициента теплопроводности контурных тепловых труб на температуру процессора. Расчеты показали, что использование контурных тепловых труб позволит снизить температуру процессора до допустимых значений. Анизотропия коэффициента теплопроводности в плоскости армирования композиционного материала корпуса наноспутника может оказывать существенное влияние на температуру процессора. Это открывает перспективы применения анизотропных композиционных материалов для обеспечения теплового режима наноспутника.

Введение

В последние годы для проведения научных экспериментов, мониторинга земной поверхности,

телекоммуникации и других целей применяются малые космические аппараты – микро- и наноспутники. Большой спрос на их использование обусловлен сравнительно низкой стоимостью выведения и большим потенциалом на мировом рынке космических товаров [1–3].

Ван Юй, магистрант кафедры СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ имени Н.Э. Баумана.

Денисов Олег Валерьевич, доцент кафедры СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана, кандидат технических наук; denisov.sm13@mail.ru; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7320-0201>, AuthorID: 176625, eLIBRARY SPIN-код: 6884-6227.

Денисова Лилиана Валентиновна, доцент кафедры СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана, кандидат технических наук; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4748-5351>, eLIBRARY SPIN-код: 3508-7617.

© Ван Юй, Денисов О.В., Денисова Л.В., 2019

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Тепловой режим наноспутников обусловлен воздействием внешних тепловых нагрузок и выделением теплоты бортовым оборудованием [4–6]. В составе бортового оборудования важное место занимает бортовой компьютер с центральным процессором. В современных наноспутниках в качестве «начинки» в основном используется элемент-

ная база смартфонов. Постоянно возрастающая информационная нагрузка вызывает необходимость применения в бортовых компьютерах более совершенных процессоров, тепловая мощность (TDP) которых может составлять десятки ватт. Для нормального функционирования большинства процессоров их допустимая температура не должна превышать 80–90 °С [7].

В условиях космического пространства стандартная схема конвективного охлаждения процессора с помощью радиатора и вентилятора невозможна. Из-за высокой плотности компоновки оборудования и малого объема наноспутников отвод теплоты излучением затруднен. Низкая тепловая инертность наноспутников и продолжительное тепловыделение может привести к перегреву процессора и выходу из строя бортового компьютера.

Одним из способов решения данной проблемы может быть применение контурных теплопроводящих труб (КТТ), которые имеют высокую эффективную теплопроводность и легко адаптируются к условиям эксплуатации [8–11]. Они могут работать в условиях космического пространства, отличаются относительной простотой конструкции, незначительной массой, полной автоном-

ностью и способны передавать большое количество теплоты на необходимое расстояние. Конденсатор КТТ сбрасывает теплоту в окружающее пространство через корпус наноспутника. В настоящее время корпуса наноспутников изготавливаются в основном из алюминиевых сплавов, однако большой потенциал имеют высокотеплопроводные полимерные композиционные материалы из углеродных волокон [12]. При этом такие материалы (при меньшей плотности) имеют более высокую удельную прочность и удельную жесткость.

Цель настоящей работы – теоретическое обоснование возможности применения КТТ для обеспечения работоспособности процессора бортового компьютера наноспутника с корпусом из углепластика.

Постановка задачи. На первом этапе необходимо определить с типом процессора и, соответственно, его тепловой мощностью. Для моделирования была выбрана бескаркасная конструкция наноспутника в виде тонкостенного параллелепипеда, в центре которого установлена материнская плата с процессором и шестью устройствами памяти (рис. 1).

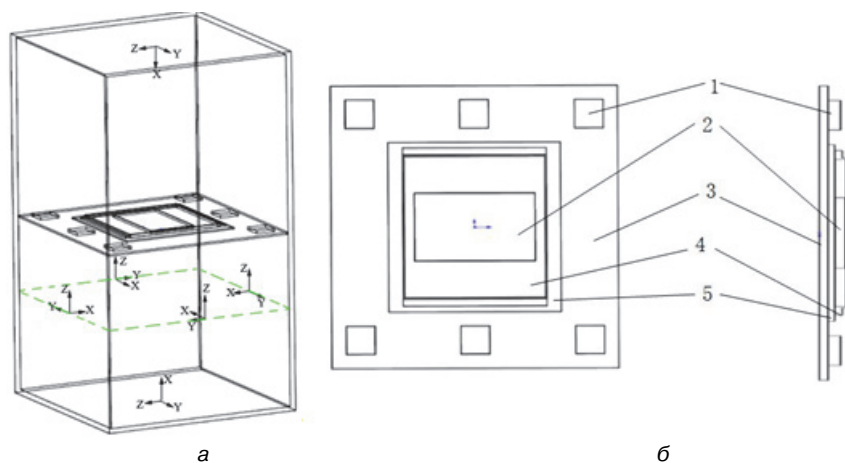


Рис. 1. Конструктивная схема наноспутника:

а – общий вид; б – вид сверху и сбоку; 1 – память; 2 – процессор; 3 – материнская плата; 4 – крышка процессора; 5 – плата процессора

Figure 1. The structural diagram of the nanosatellite:

а – general view; б – top and side view; 1 – memory; 2 – processor; 3 – motherboard; 4 – processor cover; 5 – processor board]

Между процессором (2) и крышкой (4) нанесен тонкий слой термопасты типа Evercool Nano Diamond, который обеспечивает идеальный тепловой контакт между ними (табл. 1).

Полагалось, что процессор и элементы памяти являются единственными источниками тепловыделения. Все поверхности наноспутника диффузно

отражают и испускают излучение во внутреннее пространство, заполненное диатермической средой. С наружной поверхности теплота сбрасывается в окружающую среду, имеющую температуру 4 К. Оптические свойства поверхностей не зависят от температуры и длины волны излучения. Тепловые контакты граней корпуса меж-

ду собой и с материнской платой считаются идеальными. Материал корпуса наноспутника – ортотропный углепластик толщиной 1 мм. Принято, что λ_y и λ_z – коэффициенты теплопроводности в направлениях Y и Z плоскости армирования каждой грани корпуса наноспутника соответственно, а λ_x – коэффициент теплопроводности в направлении нормали X каждой грани корпуса наноспутника (табл. 2).

Таблица 1

Геометрические размеры конструкции наноспутника

Название	Материал	Размер, мм
Материнская плата	стеклотекстолит	100x100x1
Плата процессора	стеклотекстолит	60x60x0,8
Процессор	кремний	24x42x1,3
Память (6 штук)	кремний	10x10x1,5
Термопаста Evercool Nano Diamond	алмазные микрочастицы	24x42x0,1
Крышка процессора	алюминиевый сплав	53x53x0,5
Корпус наноспутника	углепластик	100x100x200 с толщиной листа 1 мм

Table 1

Geometrical dimensions of the nanosatellite design

Name	Material	Size, mm
Motherboard	fiberglass	100x100x1
Processor board	fiberglass	60x60x0.8
Processor	silicon	24x42x1.3
Memory (6 pcs.)	silicon	10x10x1.5
Thermal grease “Evercool Nano Diamond”	Diamond microparticles	24x42x0.1
Processor cover	Aluminium alloy	53x53x0.5
Nanosatellite case	Carbon fiber reinforced plastic	100x100x200 sheet thickness 1 mm

Значения тепловой мощности процессора $W_{про}$ варьировались в диапазоне 1–100 Вт. Тепловая мощность каждого элемента памяти принималась равной 5 Вт.

Задача решена в программе ANSYS в модуле Steady-State Thermal. Настройки нелинейного решателя для радиационного теплообмена использовались по умолчанию. Оценка сходимости показала, что при уменьшении размера конечных элементов в два раза точность решения отличалась не более чем на 5 %.

В результате моделирования установлено, что при $W_{про}$ менее 6 Вт температура процессора не превышает допустимую. При значениях $W_{про}$ про-

цессора 15–20 Вт (класс легких ноутбуков) его максимальная температура $T_{про}$ составляет 150–200 °С (рис. 2). В то же время большая часть поверхности корпуса остается холодной и имеет температуру –50–60 °С. Несмотря на то, что температура процессора превышает допустимую, низкая температура корпуса создает предпосылки для отвода на него избыточной теплоты с последующим сбросом ее в космическое пространство.

Таблица 2

Теплофизические и оптические характеристики материалов

Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	Степень черноты ϵ
Стеклотекстолит	0,244	0,9
Кремний	148,0	0,9
Алмазные микрочастицы	8,0	–
Алюминиевый сплав	144,0	0,7
Углепластик	$\lambda_x = 0,5; \lambda_y = 6,0; \lambda_z = 4,0$	0,8

Table 2

Thermophysical and optical characteristics of materials

Material	Thermal conductivity coefficient λ , W/(m·K)	Emissivity ϵ
Fiberglass	0.244	0.9
Silicon	148.0	0.9
Diamond microparticles	8.0	-
Aluminium alloy	144.0	0.7
Carbon fiber reinforced plastic	$\lambda_x = 0.5; \lambda_y = 6.0; \lambda_z = 4.0$	0.8

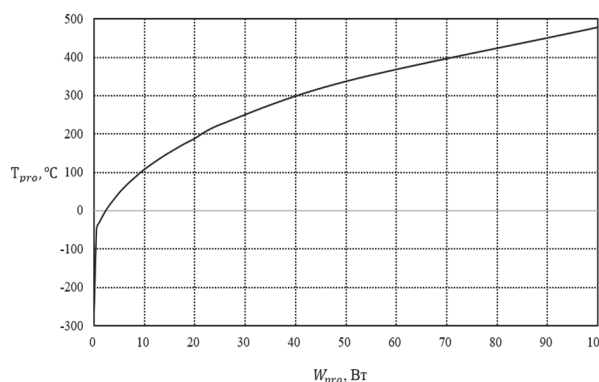


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры процессора от его тепловой мощности [Figure 2. The dependence of the processor maximum temperature on its thermal power]

Накопленный опыт использования КТТ позволяет с оптимизмом рассматривать возможность

их применения в пассивной системе терморегулирования наноспутников.

Применение процессоров с $W_{про}$ более 20 Вт в наноспутнике заданных размеров может быть затруднительно, поэтому при дальнейших расчетах был использован прототип процессора для ноутбуков Intelcore i 7-8650U мощностью 15 Вт.

Расчет теплоотвода с помощью контурных тепловых труб

Контурные тепловые трубы работают по замкнутому испарительно-конденсационному циклу и используют капиллярное давление для прокачки

теплоносителя. Устройство выполнено в виде замкнутого контура, который состоит из испарителя с капиллярно-пористой структурой и конденсатора, соединенными между собой трубопроводами для отдельного циркулирующего движения паровой (паропровод) и жидкостной (конденсаторопровод) фаз теплоносителя (рис. 3, табл. 3). Теплота, выделяемая процессором (3), через алюминиевую крышку (4) передается в медный интерфейс (2), внутри которого находится испаритель (1). Для увеличения площади контакта между конденсатором (7) тепловой трубы и внутренней поверхностью стенки корпуса наноспутника (9) применяется термопаста (8).

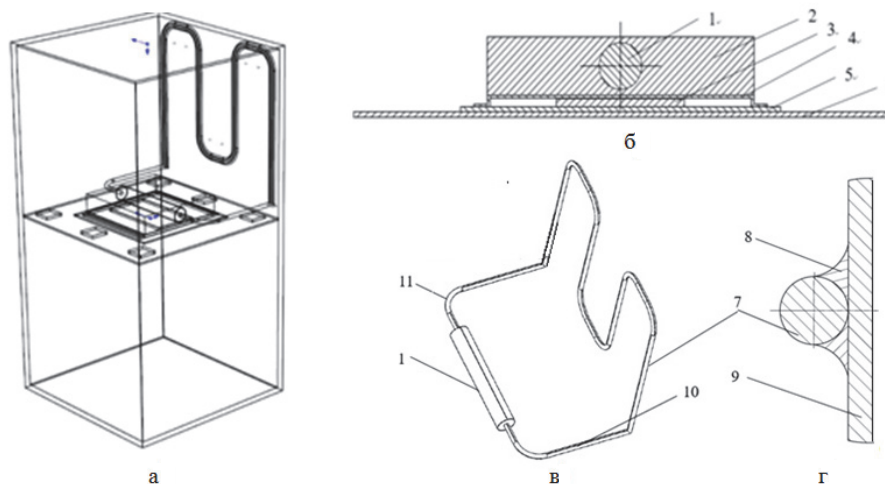


Рис. 3. Схема теплоотвода с помощью контурной тепловой трубы:

а – общий вид; б – сборка интерфейса испарителя; в – элементы КТТ; г – схема контакта конденсатора с поверхностью корпуса наноспутника; 1 – испаритель; 2 – интерфейс испарителя; 3 – процессор; 4 – крышка процессора; 5 – плата процессора; 6 – материнская плата; 7 – конденсатор; 8 – термопаста; 9 – корпус наноспутника; 10, 11 – трубопроводы (паропровод и конденсаторопровод соответственно)

[Figure 3. Processor cooling circuit using a loop heat pipe:

а – general view; б – assembly of the evaporator interface; в – loop heat pipe elements; г – contact diagram of the condenser with the surface of the nanosatellite case; 1 – evaporator; 2 – evaporator interface; 3 – processor; 4 – processor cover; 5 – processor board; 6 – motherboard; 7 – condenser; 8 – thermal grease; 9 – nanosatellite case; 10, 11 – pipelines (varopline and liquidline respectively)]

Таблица 3

Основные конструктивные параметры контурной тепловой трубы

Компонент	Характеристика	Значение, мм
Испаритель	диаметр	8,0
	длина	50,0
Конденсаторопровод	диаметр	3,0
	длина	68,5
Паропровод	диаметр	3,0
	длина	68,5
Конденсатор	диаметр	3,0
	длина	400,0
Интерфейс испарителя	длина	50,0
	ширина	50,0
	толщина	10,0

Table 3

Structural parameters of the loop heat pipe

Component	Characteristic	Value, mm
Evaporator	diameter	8.0
	length	50.0
Liquidline	diameter	3.0
	length	68.5
Varopline	diameter	3.0
	length	68.5
Condenser	diameter	3.0
	length	400.0
	length	50.0
Evaporator interface	width	50.0
	thickness	10.0

При построении конечно-элементной модели для корпуса, материнской платы, платы процессора, памяти, интерфейса, термопасты между процессором и крышкой применялся Hex Dominant Method, а для КТТ и слоя термопасты между конденсатором и корпусом наноспутника – Patch Conforming Method и Sweep Method соответственно (рис. 4). Полагалось, что КТТ – монолитное тело с коэффициентом эффективной теплопроводности λ_{ef} .

Точный расчет характеристик КТТ, в частности коэффициента эффективной теплопроводности λ_{ef} , представляет собой достаточно сложную инженерную задачу [13–19]. Анализ литературы показал, что значение λ_{ef} может превышать коэффициент теплопроводности алюминия в 10...100 раз. Так, коэффициент эффективной теплопроводности плоской тепловой трубы может изменяться от 10 000 до 17 000 Вт/(м·К) в зависимости от температуры области отвода теплоты [19].

В связи с неопределенностью λ_{ef} были проведены параметрические исследования его влияния на температурное состояние наноспутника. Исходные данные по геометрическим размерам наноспутника, теплофизическим и оптическим характеристикам материалов принимались такими же, как и в предыдущем примере (табл. 1, 2), а основные конструктивные параметры контурной тепловой трубы были, как в табл. 3.

При значениях λ_{ef} от 5000 до 20 000 Вт/(м·К) температура процессора изменяется незначительно и составляет 65 и 59 °С соответственно, что ниже его допустимой температуры (рис. 5). Температура элементов памяти, расположенных между интерфейсом и конденсатором КТТ, может превышать 100 °С, поэтому на дальнейших этапах проектирования наноспутника необходимо определить более рациональное место расположения элементов памяти на монтажной плате или изменить конструкцию интерфейса КТТ с целью обеспечения для них дополнительного теплоотвода.

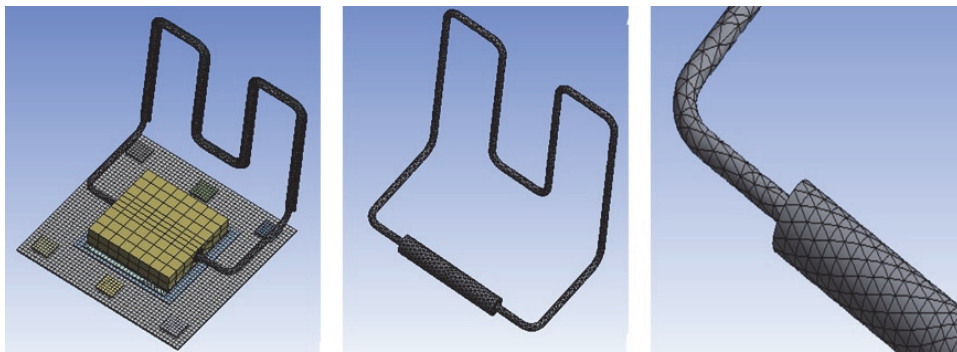


Рис. 4. Конечно-элементная модель в ANSYS
[Figure 4. Finite element model in ANSYS]

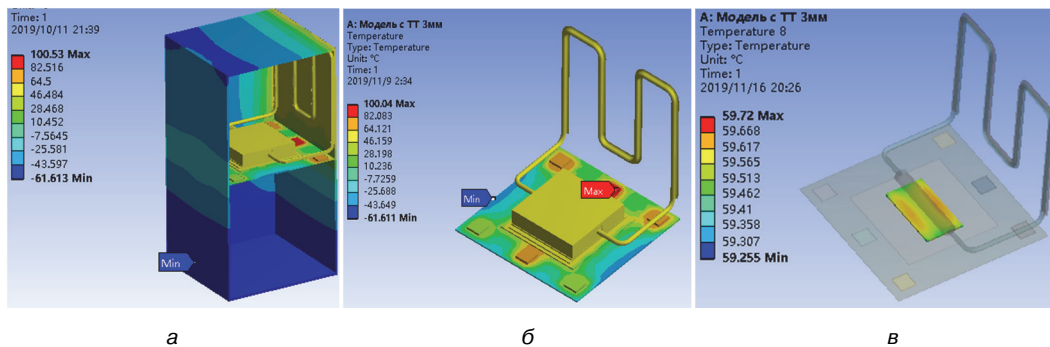


Рис. 5. Температурное состояние наноспутника при $\lambda_{ef} = 20\,000$ Вт/(м·К), $d = 3$ мм:
а – общий вид; б – элементы внутренней компоновки; в – процессор
[Figure 5. The temperature state of the nanosatellite at $\lambda_{ef} = 20\,000$ W/(m·К):
а – general view; б – interior elements; в – processor]

Для исследования возможности уменьшения массы КТТ проведен расчет температурного состояния процессора с различными диаметрами d

трубопроводов и конденсатора (рис. 6). При уменьшении значения d с 3 до 2 мм температура процессора возрастает примерно на 30 °С и может

превысить допустимую. Тепловые трубы с диаметром трубопроводов и конденсатора 2 мм и длиной конденсатора 400 мм могут обеспечить заданный тепловой режим процессора при значениях λ_{ef} , превышающих 10 000 Вт/(м·К).

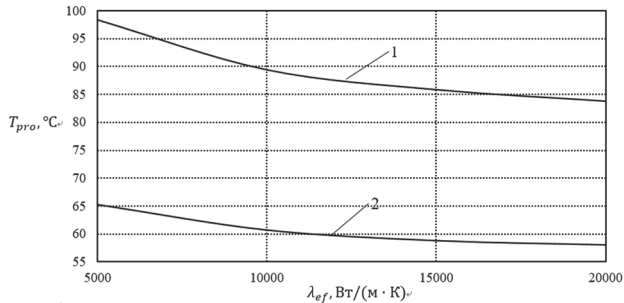


Рис. 6. Зависимость температуры процессора от размеров трубопроводов и конденсатора:
1 – $d_1 = 2$ мм; 2 – $d_2 = 3$ мм

[Figure 6. The dependence of the processor temperature on the size of the pipelines and condenser:
1 – $d_1 = 2$ mm; 2 – $d_2 = 3$ mm]

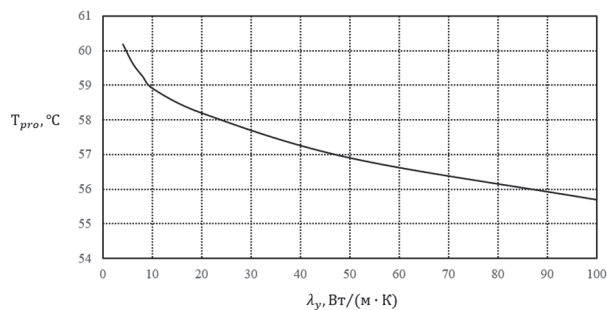


Рис. 7. Зависимость температуры процессора от коэффициента теплопроводности λ_y

[Figure 7. The dependence of the processor temperature on the thermal conductivity coefficient λ_y]

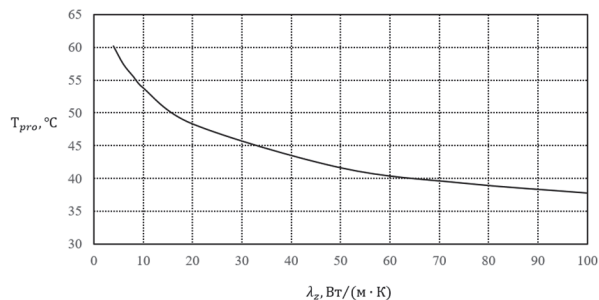


Рис. 8. Зависимость температуры процессора от коэффициента теплопроводности λ_z

[Figure 8. The dependence of the processor temperature on the thermal conductivity coefficient λ_z]

Исследовано влияние анизотропии коэффициента теплопроводности в плоскости армирова-

ния [20; 21] каждой грани углепластикового корпуса на температурное состояние наноспутника. Расчеты проводились для диаметра трубопроводов и конденсатора $d_2 = 3$ мм и $\lambda_{ef} = 20\,000$ Вт/(м·К) (рис. 7, 8). Установлено, что для рассмотренной конструкции λ_z оказывает более сильное влияние на температуру процессора, чем λ_y . Увеличение коэффициента теплопроводности в направлении Z каждой грани корпуса (рис. 1) с 4 до 100 Вт/(м·К) уменьшает температуру процессора на 22 °С, а в направлении Y, соответственно, на 5 °С. Следует отметить, что при изменении λ_z от 4 до 50 Вт/(м·К) процессор охлаждается на 18 °С, и дальнейшее двукратное увеличение λ_z до 100 Вт/(м·К) уменьшает его температуру всего на 4 °С.

Заключение

Теоретически обоснована возможность применения в наноспутниках контурных тепловых труб для охлаждения процессора с тепловой мощностью 15 Вт (класс легких ноутбуков). Установлено, что при диаметрах трубопроводов и конденсатора 3 мм температура процессора составляет примерно 60 °С в широком диапазоне значений эффективной теплопроводности КТТ. Для рассмотренной конструкции наноспутника желательно применять углепластики с более высоким коэффициентом теплопроводности в направлении Z плоскости армирования каждой грани корпуса, чем в направлении Y. Однако увеличение коэффициента теплопроводности λ_z с 50 до 100 Вт/(м·К) слабо влияет на изменение температуры процессора.

Благодарности

Авторы благодарят доктора технических наук, профессора П.В. Просунцова за советы и ценные замечания при работе над данной статьей.

Список литературы

1. Макриденко Л.А., Боярчук К.А. Микроспутники. Тенденция развития. Особенности рынка и социальное значение // Вопросы электромеханики. 2005. Т. 102. С. 12–27.
2. Анализ рынка наноспутников и микроспутников на 2019–2025 г. // Grand View Research. 2019. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/nanosatellite-microsatellite-market>
3. Блинов В.Н., Иванов Н.Н., Сеченов Ю.Н., Шалай В.В. Малые космические аппараты: в 3 кн. Кн. 3.

Миниспутники. Унифицированные космические платформы для малых космических аппаратов: справочное пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 348 с.

4. *Никольский В.В.* Проектирование сверхмалых космических аппаратов: учебное пособие. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2012. 59 с.

5. *Чеботаев В.Е., Косенко В.Е.* Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения: учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.

6. *Цаплин С.В., Большечев С.А.* Исследование тепловых режимов оптико-электронного телескопического модуля наноспутника в условиях эксплуатации // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18. № 2. С. 96–111. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-2-96-111.

7. Современные мобильные технологии. URL: https://www.notebook-center.ru/processor_tdp.html

8. *Дан П., Рей Д.* Тепловые трубы. М.: Энергия, 1979. 272 с.

9. *Майданик Ю.Ф.* Достижения и перспективы развития контурных тепловых труб // Труды 4-й конф. по тепломассообмену. М.: МЭИ, 2006. С. 84–92.

10. *Майданик Ю.Ф.* Контурные тепловые трубы – высокоэффективные теплопередающие устройства для охлаждения электроники // Электроника: НТБ. 2017. № 6. С. 122–130.

11. *Майданик Ю.Ф., Вершинин С.В., Чернышева М.А.* Разработка и исследование аммиачной миниатюрной контурной тепловой трубы при различных внешних условиях // Тепловые процессы в технике. 2016. № 7. С. 312–320.

12. *Михайловский К.В., Просунцов П.В., Резник С.В.* Разработка высокотеплопроводных полимерных композиционных материалов для космических конструкций // Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2012. № 9. С. 98–106.

13. *Ren Chuan, Wu Qing-Song, Hu Mao-Bin.* Heat transfer with flow and evaporation in loop heat pipe's wick at low or moderate heat fluxes // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2007. Vol. 50. No. 11–12. Pp. 2296–2308.

14. *Агеенко А.В., Мазюк В.В.* Метод расчета порошковой капиллярной структуры испарителя контурной тепловой трубы с перевернутым мениском // Вестник

БНТУ. Metallurgy. Metal Processing. Machine Building. 2011. № 4. С. 20–25.

15. *Николаев Г.П., Изотеева О.Ю.* Расчет рабочих характеристик контурных тепловых труб // Молодой ученый. 2012. № 3 (38). С. 17–25.

16. *Афанасьев В.Н., Недайвозов А.В., Якомаскин А.А.* Экспериментальное исследование процессов в «контурных» тепловых трубах // Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2014. № 2. С. 44–61.

17. *Пожилков А.А., Зайцев Д.К., Смирнов Е.М., Смирновский А.А.* Численное моделирование тепло-массопереноса в трехмерной модели испарителя контурной тепловой трубы // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2017. Т. 10. № 3. С. 52–61.

18. *Chernysheva M.A., Vershinin S.V., Maydanik Y.F.* Operating Temperature and Distribution of a Working Fluid in LHP // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2007. Vol. 50. No. 13–14. Pp. 2704–2713.

19. *Деревянко В.А., Нестеров Д.А., Косенко В.Е., Звонарь В.Д., Чеботарев В.Е., Фаткуллин Р.Ф., Суницев С.Б.* Плоские тепловые трубы для отвода тепла от электронной аппаратуры в космических аппаратах // Вестник СибГАУ. 2013. № 6 (52). С. 111–116.

20. *Резник С.В., Просунцов П.В., Денисов О.В., Петров Н.М., Шуляковский А.В., Денисова Л.В.* Расчетно-экспериментальное определение теплопроводности углепластика в плоскости армирования на основе бесконтактного измерения температуры // Тепловые процессы в технике. 2016. Т. 8. № 12. С. 557–563.

21. *Резник С.В., Просунцов П.В., Денисов О.В., Петров Н.М., Ли Вонхеонг.* Расчетно-экспериментальная методика определения теплопроводности композиционного материала корпуса наноспутника // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т. 18. № 3. С. 345–352.

Для цитирования

Ван Юй, Денисов О.В., Денисова Л.В. Моделирование охлаждения процессора в наноспутнике с помощью контурных тепловых труб // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 3. С. 211–219. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-3-211-219>

Simulation of cooling of a processor in nanosatellite using the loop heat pipes

Wang Yu, Oleg V. Denisov, Liliana V. Denisova

Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology),
5 2-ya Baumanskaya St., bldg. 1, Moscow, 105005, Russian Federation

Article history:

Received: August 05, 2019

Revised: October 18, 2019

Accepted: October 25, 2019

Keywords:

nanosatellite, loop heat pipes, composite materials, carbon fiber reinforced plastic, anisotropy of thermal conductivity coefficient, math modeling

One of the key problems in the development of nanosatellites is to provide a given temperature range for the operation of electronic equipment, the heat transfer of which can be tens of watts. Thermoregulation systems traditional for large spacecraft are not suitable for nanosatellites due to limitations on their mass and size characteristics. The indicated thermal regime of nanosatellites can be achieved using remote heat removal systems – miniature loop heat pipes. In recent years, their mass production has been established in Russia, but they have not yet found wide application in nanosatellites. The aim of the paper is to substantiate the possibility of using miniature loop heat pipes to remove excess heat from the on-board computer processor to the carbon-plastic case of the nanosatellite. Parametric modeling of the influence of geometric dimensions and the values of the effective thermal conductivity coefficient of loop heat pipes on the processor temperature was carried out in the ANSYS program. Calculations showed that the use of contour heat pipes will reduce the processor temperature to acceptable values. The anisotropy of the thermal conductivity coefficient in the reinforcement plane of the composite material of the nanosatellite case can have a significant effect on the temperature of the processor. This opens up prospects for the use of anisotropic composite materials to ensure the thermal regime of the nanosatellite.

Acknowledgements

The writers would like to express their gratitude to the Doctor of Engineering Sciences, Professor P.V. Prosuntsov for advice and valuable comments when working on this article.

References

1. Makridenko LA, Boyarchuk KA. Mikrosputniki. Tendentsii razvitiya. Osobennosti rynka i sotsial'noe znachenie [Microsatellites. Development trend. Market features and social significance]. *Voprosy elektromekhaniki*. 2005;102:12–27. (In Russ.)
2. San Francisco: Nanosatellite and Microsatellite Market Analysis Report By Mass, By End Use (Defense & Security), By Application (Communication & Navigation, Scientific Research), And Segment Forecasts, 2019–2025.

Grand View Research. Available from: www.grandviewresearch.com/industry-analysis/nanosatellite-microsatellite-market (Accessed May 2019).

3. Blinov VN, Ivanov NN, Sechenov YuN, Shal' VV. *Malye kosmicheskie apparati: v 3 kn. Kn. 3. Minisputniki. Unifitsirovannye kosmicheskie platformy dlya malykh kosmicheskikh apparatov* [Small space vehicles: in 3 books. Book 3. Minisatellite. Unified space platforms for small space vehicles]: reference book. Omsk: OmSTU Publishing Office; 2010. (In Russ.)

4. Nikolskii VV. *Proektirovanie sverhmalih kosmicheskikh apparatov* [Designing of ultra-small spacecrafts]: training manual. Saint Petersburg: Baltic State Technical University; 2012. (In Russ.)

5. Chebotarev VE, Kosenko VE. *Osnovi proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [The basics of designing a spacecraft information support]: tutorial. Krasnoyarsk; 2011. (In Russ.)

6. Tsaplin SV, Bolychev SA. Issledovanie teplovih rezhimov optiko-elektronnogo teleskopicheskogo modulya v usloviyah ekspluatatsii [Investigation of the thermal conditions of the optoelectronic telescopic module of a nanosatellite in operating conditions]. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019;(2): 96–111. (In Russ.)

Wang Yu, master student of the Department SM13 “Rocket and Space Composite Structures” of the Bauman MSTU.

Oleg V. Denisov, associate professor of the Department SM13 “Rocket and Space Composite Structures” of the Bauman MSTU, Candidate of Technical Sciences; denisov.sm13@mail.ru; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7320-0201>, AuthorID: 176625, eLIBRARY SPIN-code: 6884-6227.

Liliana V. Denisova, associate professor of the Department SM13 “Rocket and Space Composite Structures” of the Bauman MSTU, Candidate of Technical Sciences; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4748-5351>, eLIBRARY SPIN-code: 3508-7617.

7. *Modern mobile technology*. Available from: https://www.notebook-center.ru/processor_tdp.html
8. Dunn PD, Reay DA. *Heat Pipes*. Oxford – New York – Toronto – Sydney – Paris – Braunschweig: Pergamon Press; 1976.
9. Maydanik YuF. Dostizheniya i perspektivi razvitiya konturnih teplovih trub [Achievements and development prospects of loop heat pipes]. *Proc. of 4th Conf. on Heat Mass Transfer*. Moscow. 2006. p. 84–92. (In Russ.)
10. Maydanik YuF. Konturnie teplovie trubi – visokoeffektivnie teploperedayushie ustroystva dlya ohlazhdeniya elektroniki [Loop Heat Pipes: highlyefficient heat transfer devices for cooling systems of electronics]. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2017;(6):122–130. (In Russ.)
11. Maydanik YuF., Vershinin SV, Chernysheva MA. Razrabotka i issledovanie ammiachnoi miniaturnoi konturnoi teplovoi trubi pri razlichnih vneshnih uslovieah [Development and Research of Ammonia Miniature Loop Heat Pipe under Various External Conditions]. *Journal of Thermal Processes in Engineering*. 2016;(7):312–320. (In Russ.)
12. Mikhailovskii KV, Prosuntsov PV, Reznik SV. Razrabotka visokoteploprovodnih polimernih kompozitsionnih materialov dlya kosmicheskikh konstruksii [Development of high-conductivity polymer composite materials for space structures]. *Vestnik MGTU imeni N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie*. 2012;(9):98–106. (In Russ.)
13. Ren Chuan, Wu Qing-Song, Hu Mao-Bin. Heat transfer with flow and evaporation in loop heat pipe's wick at low or moderate heat fluxes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007;50(11–12):2296–2308.
14. Ageenko AV, Maziuk VV. Metod rascheta poroshkovoi kapillyarnoi strukturi isparatelya konturnoi teplovoi trubi s perevernutim meniskom [Theoretical Calculation Method for Powder Capillary Structure of Loop Heat Pipe with Inverted Meniscus]. *Science & Technique*. 2011;(4):20–25. (In Russ.)
15. Nikolaev GP, Izoteeva OYu. Raschet rabochih harakteristik konturnih teplovih trub [Calculation of performance characteristics of loop heat pipes]. *Molodoi Ucheniy*. 2012;3(38):17–25. (In Russ.)
16. Afanas'ev VN, Nedaivozov AV, Yakomaskin AA. Eksperimental'noe issledovanie protsessov v konturnih teplovih trubah [Experimental Study of Processes in Loop Heat Pipes]. *Vestnik MGTU imeni N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie*. 2014;(2):44–61. (In Russ.)
17. Pozhilov AA, Zaitsev DK, Smirnov EM, Smirnovsky AA. Chislennoe modelirovanie tepломassopere-nosa v trehmernoi modeli isparatelya konturnoi teplovoi trubi [Numerical simulation of heat and mass transfer in a 3D model of a loop heat pipe evaporator]. *Saint Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics*. 2017;10(3):52–61. DOI: 10.18721/JPM.10305. (In Russ.)
18. Chernysheva MA, Vershinin SV, Maydanik YF. Operating Temperature and Distribution of a Working Fluid in LHP. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007;50(13–14):2704–2713.
19. Derevyanko VA, Nesterov DA, Kosenko VE, Zvonar VD, Chebotarev VE, Fatkulin RF, Suntsov SB. Ploskie teplovie trubi dlya otvoda tepla ot elektronnoi apparatury v kosmicheskikh apparatah [Flat heat pipes for heat removal from electronic equipment in space vehicles]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2013; 6(52):111–116. (In Russ.)
20. Reznik SV, Prosuntsov PV, Denisov OV, Petrov NM, Shulyakovskiy AV, Denisova LV. Raschetno-eksperimental'noe opredelenie teploprovodnosti ugleplasti-ka v ploskosti armirovaniya na osnove beskontaktnogo izmereniya temperature [Numerical and experimental estimation of heat conductivity of carbon plastic in a reinforcement plane on the basis of contactless measurement of temperature]. *Journal of Thermal Processes in Engineering*. 2016;(12):557–563. (In Russ.)
21. Reznik SV, Prosuntsov PV, Denisov OV, Petrov NM, Vonheong Lee. Raschetno-eksperimental'naya metodika opredeleniya teploprovodnosti kompozitsionnogo materiala korpusa nanosputnika [Nanosatellite body composite material thermal conductivity determination computational and theoretical method]. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2017;18(3):345–352. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-345-352. (In Russ.)

For citation

Wang Yu, Denisov OV, Denisova LV. Simulation of cooling of a processor in nanosatellite using the loop heat pipes. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(3):211–219. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-3-211-219>. (In Russ.)