

УДК 536.248.2

Динамика фазовых превращений в тепловом аккумуляторе системы терморегулирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры*

Е.Н. Васильев, В.А. Дервянко

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

E-mail: ven@icm.krasn.ru

Рассматривается тепловой аккумулятор, основанный на применении материалов с фазовым переходом «твердое тело–жидкость», для системы терморегулирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры периодического и кратковременного действия. Для интенсификации теплообмена в конструкции данного устройства использованы ребра, выполненные из гипертеплопроводящих пластин. На основе численного моделирования исследована динамика температурных полей и фазовых превращений в объеме теплового аккумулятора. Результаты расчетов показали, что применение ребер в виде гипертеплопроводящих пластин позволяет существенно снизить амплитуду температурных колебаний на посадочном месте блока радиоэлектронной аппаратуры.

Ключевые слова: тепловой аккумулятор, теплоаккумулирующий материал, гипертеплопроводящая пластина, терморегулирование, бортовая радиоэлектронная аппаратура.

Введение

Поддержание рабочей температуры радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космических аппаратов (КА) в оптимальном диапазоне является важнейшей задачей, определяющей надежность и ресурс КА. Даже кратковременный выход температуры РЭА за допустимые пределы может привести к потере ее работоспособности и выходу из строя всего КА. С целью решения задачи термостабилизации разрабатываются системы терморегулирования РЭА для условий реальной эксплуатации в космическом пространстве, которые достаточно сложно воспроизвести на Земле. Поэтому при разработке систем терморегулирования активно используются математические модели, которые позволяют адекватно описывать тепловой режим РЭА КА в условиях космоса с учетом воздействия целого комплекса взаимосвязанных теплофизических процессов, а также прогнозировать эффективность различных технических решений, используемых в системах терморегулирования [1–4].

* Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства РФ (Минобрнауки России) в ходе выполнения комплексного проекта № 02.G25.31.0182 от 01.12.2015.

Тепловыделение РЭА КА, выполняющих мониторинг или поддерживающих связь с определенными регионами или объектами, является кратковременным и периодическим, поскольку такая РЭА действует в течение относительно короткого времени по сравнению с периодом обращения КА по орбите. При этом для поддержания температуры РЭА в рабочем диапазоне требуется радиатор, обеспечивающий рассеивание в окружающее пространство тепловой мощности, соответствующей пиковому тепловыделению. Для мощных блоков РЭА потребуется значительная дополнительная площадь радиатора (примерно $2,5 \text{ м}^2$ на 1 кВт тепловой мощности). Увеличение площади радиатора для рассеивания пиковых нагрузок, во-первых, приведет к соответствующему увеличению веса и габаритов КА, во-вторых, возникнет проблема переохладения РЭА в периоды выключенного состояния.

Размеры радиатора могут быть минимизированы за счет использования теплового аккумулятора (ТА), работа которого основывается на теплоемкости фазовых превращений «твердое тело–жидкость». Такой ТА за счет чередующихся процессов плавления и затвердевания перераспределяет теплоту, выделяемую во время пиковых нагрузок, на весь период полета по орбите. Известно достаточно большое количество теплоаккумулирующих материалов (ТАМ), которые могут быть использованы для теплового аккумулярования [5–7]. Для обеспечения высокой надежности и эффективности работы ТА в космических приложениях используемые ТАМ должны обладать определенными свойствами. Основными требованиями при выборе оптимального ТАМ являются соответствие температуры фазового перехода рабочему диапазону РЭА, высокая удельная теплота фазового превращения, способность плавиться конгруэнтно с минимальным переохладением, химическая стабильность, отсутствие реакций с материалом контейнера и небольшие изменения объема при фазовых превращениях. Сравнение и анализ характеристик различных групп ТАМ показали, что для ТА бортовой РЭА в качестве ТАМ более других этим требованиям соответствуют органические вещества [8]. Однако органические ТАМ имеют низкую теплопроводность, что затрудняет теплопередачу в объем ТА. Преодоление этого недостатка требует специальных технических решений, позволяющих увеличить площадь и эффективность теплообмена. В работе [9] рассматривалась конструкция системы терморегулирования, в которой полость с ТАМ располагалась параллельно каналу тепловой трубы, обеспечивающей распределение теплоты в продольном направлении. В конструкции ТА, экспериментальные исследования которого были представлены в работе [10], для увеличения площади теплообмена использовались секции ребер шириной 144 мм , к каждой из которых подводилась теплота с помощью двух плоских тепловых труб, имеющих ширину 40 мм и состоящих из ряда прямоугольных каналов с внутренним поперечным сечением $2 \times 4 \text{ мм}^2$.

В настоящей работе для развития площади и интенсификации теплообмена в ТА применяются гипертеплопроводящие (ГТП) пластины, в которых высокая эффективность теплопередачи обеспечивается за счет движения теплоносителя в пористой среде и его фазовых превращений. Расчет основных интегральных параметров такого ТА был проведен в работе [8], где также была показана недостаточная теплопередающая способность медных ребер. Существенно более высокой теплопередающей способностью обладают ГТП-пластины, эффективный коэффициент теплопроводности которых в зависимости от параметров и условий подвода теплоты может достигать значений более $20000 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ [3]. При этом величина эффективного коэффициента теплопроводности зависит от температуры, свойств теплоносителя, конструкции ГТП-пластины и расположения источников и стоков теплоты [4]. Целью представляемой работы является численное моделирование процесса теплообмена в объеме ТА и проведение сравнительного анализа температурных полей и диапазонов изменения температуры посадочного места РЭА для ребер, выполненных из меди и ГТП-пластин.

1. Постановка задачи

Рассматриваемая конструкция системы терморегулирования с ТА представлена на рис. 1. Блок РЭА 1, выделяющий тепловую мощность Q , установлен на верхнее теплоподводящее основание (ТПО) 2, теплота отводится с нижнего теплоотводящего основания (ТОО) 3. Между ребрами 5 находится ТАМ 4, который плавится при постоянной температуре, поглощая выделяемую прибором теплоту. Конструкция ТА имеет повторяющуюся структуру из однотипных симметричных секций, поэтому в качестве расчетной области при моделировании рассматривалась половина объема такой секции, на рис. 1 она выделена штриховой линией. При этом расчет проводился отдельно для ребра и объема, включающего в себя оба основания и ТАМ.

В качестве ТАМ рассматривалось органическое соединение октадекан с 18 атомами углерода ($C_{18}H_{38}$). У октадекана температура изменения фаз соответствует диапазону «минимальная–максимальная рабочая температура электронных компонентов», и он имеет высокую скрытую теплоту. Кроме того, октадекан является химически стабильными по отношению к металлам и имеет малую разницу в плотностях твердой и жидкой фаз. Температура изменения фазы октадекана $T^* = 28,2$ °С, его скрытая теплота фазового перехода $q^* = 244$ кДж/кг, удельная теплоемкость $c = 2,3$ кДж/(кг·К) и плотность $\rho = 814$ кг/м³. Теплопроводность октадекана составляет в среднем $\lambda = 0,25$ Вт/(м·К) как для жидкой, так и для твердой фаз.

Для исследования динамики процесса теплообмена, протекающего в объеме ТА, используется математическая модель, основанная на численном решении уравнения теплопроводности. Процесс теплопередачи в общем случае описывается нестационарным уравнением теплопроводности с переменными коэффициентами

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

где c_s — суммарная удельная теплоемкость вещества, T — температура, t — время, x, y — пространственные координаты. Неоднородность c_s , ρ и λ связана с различием теплофизических свойств материалов и наличием фазового перехода. Уравнение (1) дополнено граничными условиями второго рода на внешних границах ТПО и ТОО и третьего рода — на границе ТАМ-ребро:

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

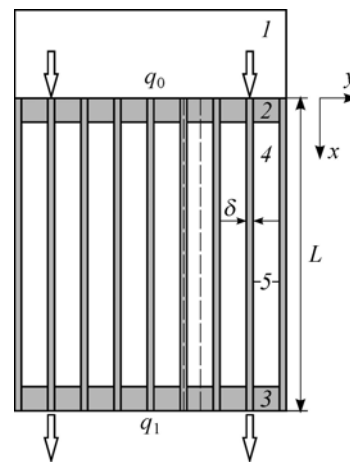
здесь α — коэффициент теплообмена, q — плотность теплового потока на границе. На границе, являющейся осью симметрии секции ТА, граничное условие имеет вид $\partial T/\partial y = 0$. Начальное условие записано в виде

$$T|_{t=0} = T_0(x, y). \quad (3)$$

Для численного решения (1)–(3) использован метод суммарной аппроксимации на основе расщепления задачи по пространственным координатам с применением неявной разностной схемы [11].

Рис. 1. Схема системы терморегулирования с ТА.

- 1 — блок РЭА, 2 — теплоподводящее основание,
3 — теплоотводящее основание,
4 — теплоаккумулирующий материал, 5 — ребра.



Для расчета распределения температурного поля вдоль ребра численно решается нестационарное уравнение теплопроводности с постоянными коэффициентами

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t} = \left(\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q_r(x, t) - \alpha_r(x, t)T \right) / \delta, \quad (4)$$

где q_r — плотность теплового потока, поступающего со стороны ТАМ, α_r — коэффициент бокового теплообмена ребра, δ — толщина ребра. Уравнение (4) дополняется граничными и начальными условиями, аналогичными (2) и (3).

При расчете температурного поля в объеме ТА учитывается влияние фазового перехода. Теплоемкость вещества, находящегося на границе раздела фаз при температуре T^* , имеет скачок, связанный с наличием скрытой теплоты фазового перехода q^* . Для учета q^* в теплоемкости используется δ -функция Дирака, при этом суммарная теплоемкость записывается как

$$c_s(T) = c(T) + q^* \delta(T - T^*).$$

При численном решении задачи разрывная δ -функция была заменена гладкой функцией $f(T)$, имеющей вид одного полупериода синусоидальной функции в интервале $(T^* - \Delta T, T^* + \Delta T)$ и удовлетворяющей условию нормировки [11]

$$\int_{T^* - \Delta T}^{T^* + \Delta T} f(T) dT = 1.$$

При проведении расчетов задавались длина $L = 220$ мм и толщина $\delta = 3$ мм ребра, толщина медных ТПО и ТОО равнялась 10 мм. При этом разностная сетка имела 221×51 узлов. Коэффициент теплопроводности меди принимался равным 390 Вт/(м·К), для ГТП пластины задавался эффективный коэффициент теплопроводности 9750 Вт/(м·К), превышающий в 25 раз теплопроводность меди и выбранный по данным работы [4] с учетом значения характерной температуры в ТА, равной температуре фазового перехода $28,2$ °С. Расчеты температурного поля в объеме ТА проведены для блока РЭА, выделяющего тепловую мощность периодически в течение 1 часа, период покоя составляет 9 часов, весь рабочий цикл составляет 10 часов. Плотность теплового потока q_0 , поступающего от блока РЭА на поверхность ТПО, задана равной 10 кВт/м², при этом предполагается его однородное распределение. С поверхности ТОО в течение всего рабочего цикла равномерно отводится постоянный во времени тепловой поток $q_1 = 1$ кВт/м². Начальная температура всей расчетной области задана равной 28 °С.

2. Результаты численного моделирования и их обсуждение

На основе математической модели проведены расчеты температурного поля в объеме ТА с ребрами из меди и ГТП-пластин. Распределения температуры для ТА с медными ребрами представлены на рис. 2 в виде изолиний с шагом ΔT , граница раздела жидкой и твердой фаз изображена жирной линией, на рисунке также отображены значения минимальной и максимальной температур в местах, соответствующих этим значениям. На приведенной расчетной области ТПО и ТОО соответствуют слои со значениями $x = 0-10$ мм и $x = 210-220$ мм, тепловой поток q_0 поступает на левую границу области ($x = 0$), с правой границы ($x = L$) отводится тепловая мощность q_1 , нижняя граница ($y = 0$) расположена в месте контакта поверхности с ребром, верхняя граница является осью симметрии секции ТА.

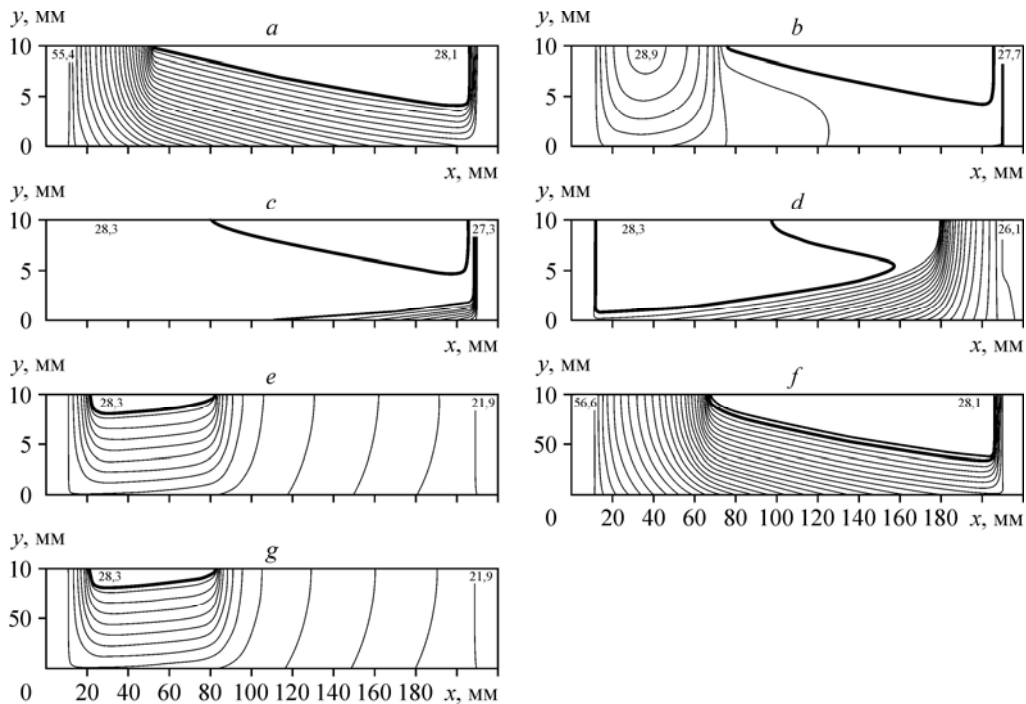


Рис. 2. Распределение температуры в объеме ТА с медными ребрами.

a — $\Delta t = 1$ ч, $\Delta T = 1$ °C; b — $\Delta t = 1,5$ ч, $\Delta T = 0,1$ °C; c — $\Delta t = 2$ ч, $\Delta T = 0,1$ °C; d — $\Delta t = 5$ ч, $\Delta T = 0,1$ °C; e — $\Delta t = 10$ ч, $\Delta T = 0,5$ °C; f — $\Delta t = 11$ ч, $\Delta T = 1$ °C; g — $\Delta t = 20$ ч, $\Delta T = 0,5$ °C.

К моменту времени $\Delta t = 1$ ч тепловыделение РЭА, обеспечивающее нагрев и плавление ТАМ, завершается (рис. 2а). В период нагрева теплота от ребра и оснований ТА поступает через слой расплавленного ТАМ к фазовой границе, где происходит ее поглощение, обусловленное плавлением нового слоя ТАМ. В области твердого ТАМ отсутствие изолиний является следствием малости температурных перепадов ($\approx 0,1$ °C) по сравнению с температурным шагом между изолиниями. Перепад температуры по длине ребра составляет около 20 °C. Это свидетельствует о том, что теплопроводности меди недостаточно для эффективного подвода теплоты по всей длине ребра. При этом температурные изолинии и граница раздела фаз имеют существенный наклон к плоскости ребра. Плавление ТАМ происходит наиболее интенсивно в области, примыкающей к ТПО, здесь фазовая граница достигает верхней границы расчетной области. Вблизи ТОО величина теплового потока, поступающего в объем ТАМ со стороны ребра, получается значительно ниже, здесь граница плавления продвинулась вглубь менее половины слоя ТАМ (≈ 4 мм). Температура внешней поверхности ТПО ($x = 0$), которая является посадочным местом блока РЭА, отличается от температуры плавления на величину температурного перепада на слое расплавленного ТАМ. Значение этого перепада температуры равно произведению подводимой тепловой мощности и интегрального термического сопротивления слоя вещества между ТПО и фазовым фронтом. В процессе нагрева толщина этого слоя увеличивается, что приводит к соответствующему росту температуры ТПО с течением времени. Средняя температура внешней поверхности ТПО к моменту времени $\Delta t = 1$ ч составляет примерно 55 °C.

После завершения периода нагрева изменение температурного поля происходит за счет отвода теплоты с ТОО и формирования второй фазовой границы (рис. 2b и 2c).

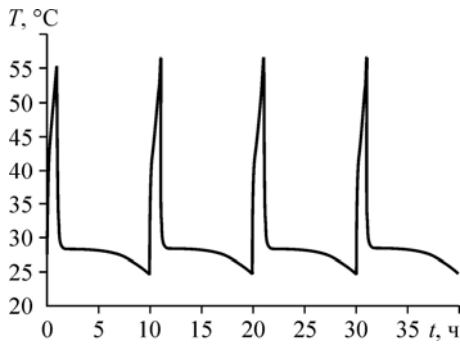


Рис. 3. Временные зависимости средней температуры внешней поверхности ТПО для ТА с медными ребрами.

К моменту времени $\Delta t = 5$ ч происходит объединение фазовых границ и формирование области расплавленного ТАМ, расположенной во внутренней части объема и примыкающей к ТПО (рис. 2d). У ребра и оснований образуется слой твердого ТАМ, при этом температура ребра и обоих оснований устанавливается ниже температуры плавления. В дальнейшем уменьшение размеров области расплавленного вещества и снижение температуры оснований продолжается, температурное поле, сформировавшееся в конце первого рабочего цикла ($\Delta t = 10$ ч), приведено на рис. 2e. Во втором и дальнейших рабочих циклах динамика процесса и характерные значения температуры не претерпевают значительных изменений (рис. 2f, $\Delta t = 11$ ч; рис. 2g, $\Delta t = 20$ ч).

Важной характеристикой, влияющей на рабочие характеристики и ресурс РЭА, является температурный диапазон, в котором работает РЭА. Тепловой режим блока РЭА определяется температурой посадочного места. Зависимость средней температуры внешней поверхности ТПО от времени для первых четырех рабочих циклов приведена на рис. 3. График температуры имеет повторяющийся и периодический характер, амплитуда температурных колебаний составляет примерно $30\text{ }^\circ\text{C}$. Растущие участки температурной зависимости соответствуют периодам подвода энергии, падающие ветви — временным интервалам, когда тепловыделение РЭА отсутствует.

Распределения температуры для ТА с ребрами на основе ГТП-пластин представлены на рис. 4a для моментов времени $\Delta t = 1, 2, 5$ и 10 ч. Основным отличием этих распределений от приведенных на рис. 2 является практически параллельное расположение значительных участков фазовой границы и изолиний к плоскости ребра. Такая форма изолиний обусловлена существенно более высокой теплопроводностью ГТП-пластин по сравнению с медными ребрами, что обеспечивает однородность по длине ребра распределений температуры и теплового потока, поступающего от ребра к ТАМ. К моменту времени $\Delta t = 1$ ч температура ТПО составляет примерно $41\text{ }^\circ\text{C}$.

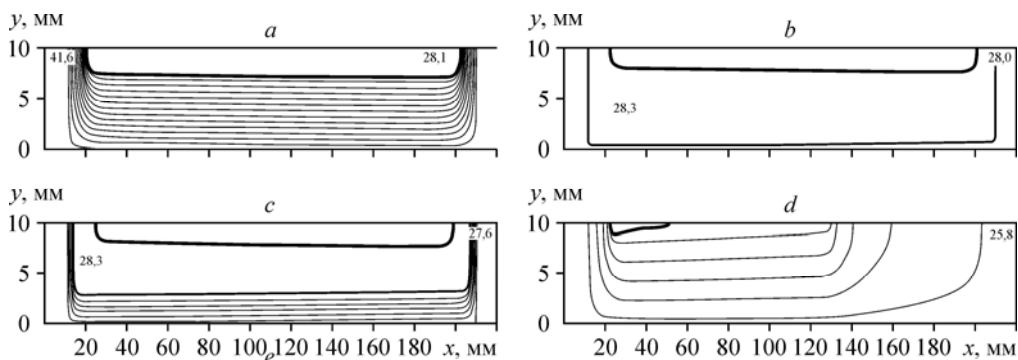
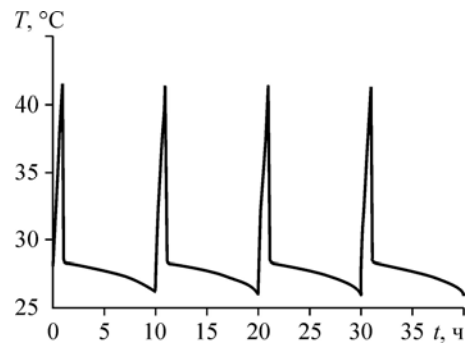


Рис. 4. Распределение температуры в объеме ТА с ребрами на основе ГТП-пластин. a — $\Delta t = 1$ ч, $\Delta T = 1\text{ }^\circ\text{C}$; b — $\Delta t = 2$ ч, $\Delta T = 0,1\text{ }^\circ\text{C}$; c — $\Delta t = 5$ ч, $\Delta T = 0,1\text{ }^\circ\text{C}$; d — $\Delta t = 10$ ч, $\Delta T = 0,5\text{ }^\circ\text{C}$.

Рис. 5. Временные зависимости средней температуры внешней поверхности ТПО для ТА с ребрами на основе ГТП-пластин.



Зависимость средней температуры $T(t)$ внешней поверхности ТПО для ТА с ГТП ребрами приведена на рис. 5. Здесь амплитуда температурных колебаний равна примерно $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, что вдвое ниже, чем для ТА с медными ребрами. Меньшая амплитуда колебаний обусловлена тем, что при однородном распределении температуры ребра обеспечивается равномерный подвод теплоты, соответственно, за счет этого снижается интегральное термическое сопротивление слоя ТАМ между ТПО и фронтом плавления.

Заключение

В работе исследован процесс теплообмена в объеме теплового аккумулятора с учетом влияния теплопередающей способности ребер. Для аккумулятора с ребрами из меди и гипертеплопроводящих пластин проведен сравнительный анализ температурных полей и временных зависимостей средней температуры посадочного места радиоэлектронной аппаратуры. Результаты расчетов показали, что увеличение теплопередающей способности ребра за счет применения гипертеплопроводящих пластин позволяет повысить равномерность подвода теплоты к теплоаккумулирующим материалам и значительно уменьшить амплитуду температурных колебаний посадочного места радиоэлектронной аппаратуры. Таким образом, тепловой аккумулятор с ребрами на основе гипертеплопроводящих пластин является перспективной пассивной системой обеспечения тепловых режимов бортовой радиоэлектронной аппаратуры периодического и кратковременного действия.

Список литературы

1. Бураков В.А., Елизаров В.В., Кожухов В.П., Корчагин Е.Н. Тепловая математическая модель негерметичного приборного отсека космических аппаратов // Теплофизика и аэромеханика. 2002. Т. 9, № 3. С. 431–443.
2. Семена Н.П., Коновалов А.А. Методы создания механизмов саморегулирования пассивных систем обеспечения теплового режима устройств космического применения // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14, № 1. С. 87–98.
3. Васильев Е.Н., Деревянко В.А., Нестеров Д.А., Косенко В.Е., Чеботарёв В.Е. Вычислительное моделирование процессов теплообмена в системах терморегулирования космических аппаратов // Вычислительные технологии. 2009. Т. 14, № 6. С. 19–28.
4. Деревянко В.А., Нестеров Д.А., Косенко В.Е., Звонарь В.Д., Чеботарёв В.Е., Фаткулин Р.Ф., Суңцов С.Б. Плоские тепловые трубы для отвода тепла от электронной аппаратуры в космических аппаратах // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 6(52). С. 111–116.
5. Алексеев В.А. Охлаждение радиоэлектронной аппаратуры с использованием плавящихся веществ. М.: Энергия, 1975. 88 с.
6. Grodzka P.G. Thermal control of spacecraft by use of solid-liquid phase-change materials // AIAA Paper. 1970. No. 70-12. P. 1–9.
7. Farid M.M., Khudhair A.M., Razack S.A., Al-Hallaj S. A review on phase change energy storage: materials and applications // Energy and Management. 2004. Vol. 45. P. 1597–1615.

8. **Васильев Е.Н., Деревянко В.А., Чеботарев В.Е.** Тепловой аккумулятор для системы терморегулирования мощных блоков радиоэлектронной аппаратуры кратковременного действия // Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, № 4. С. 930–935.
9. **Kim T.Y., Hyun B.S., Lee J.J., Rhee J.** Numerical study of the spacecraft thermal control hardware combining solid–liquid phase change material and a heat pipe // Aerospace Sci. and Technology. 2013. Vol. 27, No. 1. P. 10–16.
10. **Diao Y.H., Wang S., Zhao Y.H., Zhu T.T., Li C.Z., Li F.F.** Experimental study of the heat transfer characteristics of a new-type flat micro-heat pipe thermal storage unit // Applied Thermal Engng. 2015. Vol. 89. P. 871–882.
11. **Самарский А.А.** Теория разностных схем. М.: Наука, 1989. 656 с.

*Статья поступила в редакцию 27 июня 2017 г.,
после доработки — 26 января 2018 г.*