

УДК 536.248.2

Экспериментальное исследование динамики фазовых превращений в тепловом аккумуляторе системы терморегулирования радиоэлектронной аппаратуры*

Е.Н. Васильев, В.А. Дервянко, М.И. Корхова

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

E-mail: ven@icm.krasn.ru

Экспериментально исследован тепловой аккумулятор, использующий скрытую теплоту фазового перехода «твердое тело–жидкость». Для интенсификации теплообмена в его конструкции использованы гипертеплопроводящие пластины. В ходе экспериментов измерялись значения температуры и изменялся объем рабочего вещества (гексадекана). Проведен анализ теплового баланса и фазовых превращений в объеме теплового аккумулятора. Подтверждена работоспособность рассматриваемой конструкции теплового аккумулятора и высокая теплораспределяющая способность гипертеплопроводящих пластин.

Ключевые слова: тепловой аккумулятор, теплоаккумулирующий материал, гипертеплопроводящая пластина, теплота плавления, коэффициент теплопроводности.

Введение

Системы охлаждения и терморегулирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) предназначены для решения задачи поддержания рабочей температуры в оптимальном диапазоне, обеспечивающем максимальную надежность и ресурс устройства. Для охлаждения РЭА, работающей в режиме кратковременных и периодических пиковых тепловых нагрузок, перспективным направлением является использование тепловых аккумуляторов (ТА), использующих скрытую теплоту фазового перехода [1–4]. За счет чередующихся процессов плавления и затвердевания такие ТА перераспределяют теплоту, выделяемую во время пиковых нагрузок, на период выключенного состояния РЭА. Органические вещества (углеводороды различного состава) наиболее соответствуют требованиям, предъявляемым к теплоаккумулирующим материалам (ТАМ) для терморегулирования РЭА. Они имеют температуру изменения фазы, соответствующую оптимальному рабочему диапазону РЭА, сравнительно высокую удельную теплоту фазового перехода, химическую стабильность и не вступают в реакции с материалом контейнера. Однако органические ТАМ имеют низкие значения коэффициента теплопроводности,

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-47-242005.

что затрудняет теплопередачу в объем ТАМ. Для повышения эффективности теплопередачи используют технические решения, позволяющие увеличить площадь поверхности теплообмена с ТАМ. В экспериментальном исследовании [2] для этого применялись алюминиевые штыревые теплообменники. Штыри, погруженные в объем парафина, имели высоту 20 мм и квадратное поперечное сечение с размерами 1, 2 и 3 мм. Возможность развития поверхности теплообмена в таком теплообменнике препятствует сравнительно низкая теплопроводность металла. Для распределения теплоты в конструкциях ТА с рабочими веществами октадекан [3] и стеариновая кислота [4] использовались линейные тепловые трубы, которые имеют эффективную теплопроводность, превышающую показатели металлов в десятки и сотни раз, что позволяет распределять теплоту от локальных источников в одном направлении. В работах [5, 6] был предложен ТА для системы терморегулирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов, работающей с пиковым периодическим тепловыделением. Применение ТА позволяет перераспределить теплоту, выделяемую во время пиковых нагрузок, на более длительный период за счет чередующихся процессов плавления–затвердевания ТАМ и минимизировать массу и габариты радиатора, рассеивающего теплоту в окружающее пространство. Конструкция предложенного ТА имеет повторяющуюся структуру и состоит из однотипных секций, разделенных гипертеплопроводящими (ГТП) пластинами. ГТП-пластины значительно повышают эффективность теплообмена с ТАМ по всей поверхности контакта. По своей сути ГТП-пластины являются плоскими тепловыми трубами, в которых высокая теплопередающая способность обеспечивается за счет движения теплоносителя в пористой среде и его фазовых превращений [7]. При этом в работе [5] было проведено обоснование выбора в качестве ТАМ октадекана ($C_{18}H_{38}$) с температурой плавления $T^* = 28,2$ °С, а также выполнен расчет основных интегральных параметров ТА с ГТП-пластинами, в работе [6] на основе численного моделирования исследовался процесс теплообмена в объеме отдельной секции ТА и был проведен сравнительный анализ температурных полей и диапазонов изменения температуры посадочного места РЭА при использовании ребер из меди и ГТП-пластин.

В настоящей работе экспериментально исследуется динамика фазовых превращений на основе измерения температуры и изменения объема ТАМ, проводится анализ теплового баланса.

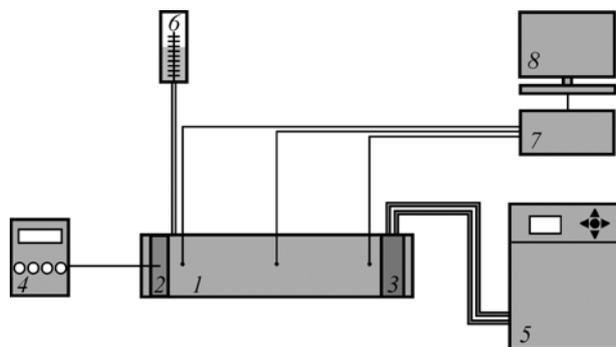


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — секция ТА, 2 — нагреватель, 3 — жидкостной теплообменник,
4 — источник питания, 5 — термостат, 6 — компенсационный
резервуар, 7 — модуль измерительной системы, 8 — компьютер.

1. Постановка эксперимента

Исследование фазовых превращений ТАМ проводилось на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1. Установка состоит из одной секции ТА 1, теплота к которой подводится со стороны нагревателей 2, а отводится медными жидкостными теплообменниками 3. В качестве нагревателей использовалось 6 транзисторов IRFP064N, установленных в линию на внешней поверхности обеих ГТП-пластин. Для обеспечения хорошего теплового контакта каждая линейка транзисторов сверху прижималась металлической планкой. Источник стабилизированного питания GW INSTEK SPS-3610 4 обеспечивал транзисторам одинаковое тепловыделение. Жидкостные теплообменники охлаждались теплоносителем, поступающим из термостата LAUDA VC2000 5. Мерная емкость 6 выполняла функцию компенсационного резервуара и позволяла отслеживать изменение объема ТАМ в секции ТА. Система измерения температуры включала в себя 12 термодатчиков, размещенных на обеих ГТП-пластинах, на жидкостных теплообменниках и их входных и выходных патрубках. Регистрация значений температуры производилась автоматизированным вычислительным комплексом на базе модульной измерительной системы L-Card E-270 7 и персонального компьютера 8.

На рис. 2а и 2б приведены соответственно общий вид и схема экспериментальной секции ТА. В конструкции секции в качестве боковых стенок использовались две никелевые ГТП-пластины 1, заправленные водой. ГТП-пластины были установлены в пазы верхнего и нижнего оснований 2, изготовленных из оргстекла толщиной 8 мм, торцевые стенки 3 были выполнены из оргстекла толщиной 16 мм. Все стыки конструкции проклеивались герметиком. ГТП-пластины имели длину $L_0 = 320$ мм, ширину $H_0 = 78$ мм и толщину $\delta = 2,5$ мм. Масса заправленной ГТП-пластины составляла 216 г. Одна поверхность ГТП-пластин была зачернена (см. рис. 3) для обеспечения тепловизионного контроля над полем температур, проводившегося на этапе отладки эксперимента. Внутренние размеры секции ТА составляли: длина $L_1 = 270$ мм, высота $H_1 = 75$ мм, ширина $h = 20$ мм, при этом рабочий объем составлял $V_0 = 405$ см³. Для снижения термического сопротивления тепловых контактов нагревателей 4 и жидкостных теплообменников 5 с ГТП-пластинами использовалась термопаста. Во время экспериментов секция ТА укрывалась теплоизолирующим материалом.

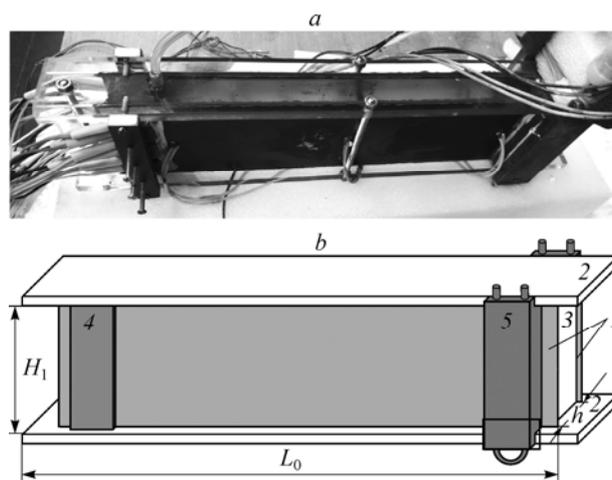


Рис. 2. Фотография (а) и схема (б) секции ТА.

1 — ГТП-пластины, 2 — основания, 3 — торцевые стенки,
4 — нагреватели, 5 — жидкостные теплообменники.

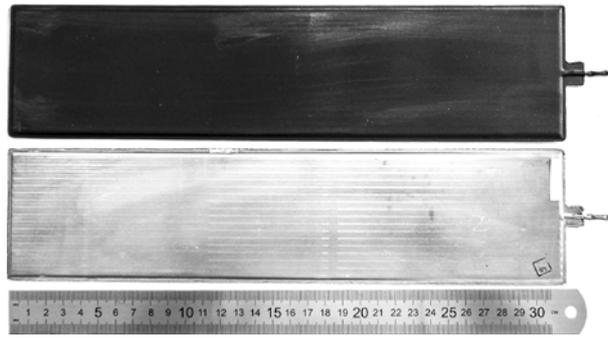


Рис. 3. Две стороны ГТП-пластины.

В отличие от работ [5, 6] в настоящих экспериментах в качестве ТАМ было выбрано органическое соединение гексадекан с 16 атомами углерода ($C_{16}H_{34}$) с температурой плавления $T^* = 18,2$ °С и теплотой фазового перехода $q^* = 236$ кДж/кг. Это вещество при комнатной температуре находится в жидком состоянии, что обеспечивает благоприятные условия для работы компенсационного резервуара. Температурные зависимости удельной теплоемкости c_p , плотности ρ и коэффициента теплопроводности λ гексадекана приведены в [8]. При проведении экспериментов использовался эталонный гексадекан (ГОСТ 12525-85) с массовой долей чистого вещества не менее 98,0 %.

2. Результаты измерений и их обсуждение

В экспериментах рабочий цикл начинался с нагрева ТАМ, изначально находящегося в твердом состоянии. Продолжительность одного рабочего цикла «плавление–замораживание» равнялась 6 часам. В период нагрева были включены нагреватели с фиксированной суммарной мощностью Q при отключенной циркуляции теплоносителя в контуре охлаждения. В момент полного перехода ТАМ в жидкое состояние проводилось одновременное отключение нагревателей и включение циркуляции теплоносителя с заданной температурой. В ходе экспериментов системой измерений фиксировались значения температур через 800 равных интервалов в течение каждых 6 часов. Уровень жидкости в мерной емкости отслеживался визуально, кроме того, периодически открывался верхний слой термоизоляции и выполнялись наблюдение и фотосъемка состояния ТАМ в рабочем объеме секции ТА.

Динамика фазовых превращений в ТА при мощности тепловыделения $Q = 46$ Вт иллюстрируется фотоизображениями состояния ТАМ на различных стадиях процесса (рис. 4) и временной температурной зависимостью $T(t)$ для двух рабочих циклов (рис. 5, линия 1). В месте контакта транзисторов, имеющих площадь теплоотвода по 2 см², плотность теплового потока составляла $3,8$ Вт/см². В начальный момент времени ТАМ находился в замороженном состоянии при температуре $T_0 = 17$ °С, и на рис. 4а, который соответствует этому моменту, просматривается игольчатая кристаллическая структура твердого гексадекана. При включении нагревателя начинался рост температуры поверхности ГТП-пластины, приводящий к плавлению прилегающего слоя ТАМ (рис. 4б). Следует отметить, что при первом плавлении гексадекана наблюдалось обильное образование газовых пузырей, которые отводились по трубке в компенсационный резервуар, в последующих циклах плавления интенсивность образования пузырей последовательно снижалась.

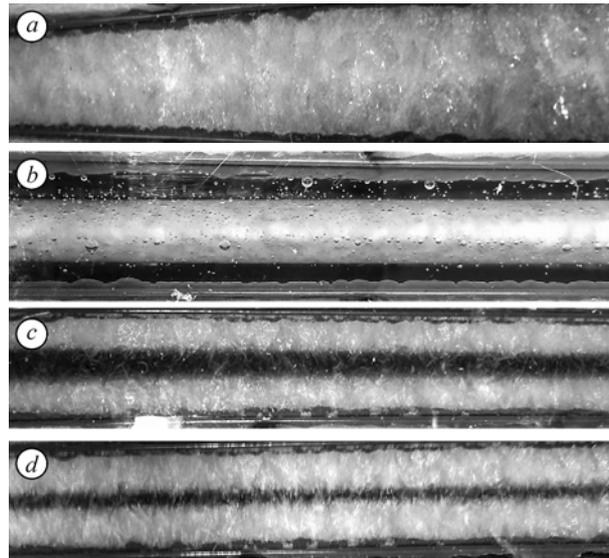


Рис. 4. Состояние ТАМ на различных стадиях процесса в секции ТА.

$t = 0$ (a), 20 (b), 210 (c), 330 (d) мин.

Температурная зависимость $T(t)$ (линия 1) и график тепловыделения нагревателей (линия 2) представлены на рис. 5. Приведенная температурная зависимость соответствует показаниям термопары, установленной на внешней поверхности ГТП-пластины вблизи нагревателя, поэтому она фактически отражает температурный режим посадочного места нагревателя. На стадии подвода теплоты значение T монотонно растет по мере продвижения зоны расплава вглубь ТА. Следует отметить, что в объем ТАМ поступает не вся выделяемая нагревателями тепловая мощность, значительная ее часть идет на повышение температуры внешних элементов конструкции ТА. В каждый момент времени значение температуры T в этой точке связано с положением фазовой границы соотношением $T = T^* + \lambda q / \Delta h$, где q — плотность теплового потока, поступающего в объем ТАМ, Δh — толщина слоя ТАМ между внутренней поверхностью ГТП-пластины и фазовой границей. На заключительном этапе нагрева под действием силы тяжести тонкий слой изначально кристаллического ТАМ размягчался и постепенно оплывал до образования жгута, лежащего вдоль оси нижнего основания. Нагрев продолжался до полного плавления ТАМ, для этого потребовалось 50 мин. Максимальная температура в момент завершения нагрева достигла величины $T_{\max} = 45,5$ °С, перепад температуры по длине ГТП-пластины не превышал 0,5 °С.

В момент завершения подвода теплоты одновременно с отключением нагревателей была включена циркуляция теплоносителя, температура которого задавалась постоянной в течение всего периода теплоотвода и на входе в теплообменник составляла $T_c = 15$ °С. Величина отводимой тепловой

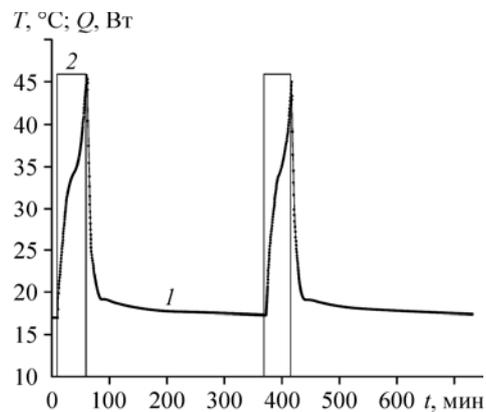


Рис. 5. Временные зависимости температуры поверхности ГТП-пластины (1) и тепловой мощности, выделяемой нагревателями (2), для двух рабочих циклов.

мощности определяется разностью температур $T - T_c$, поэтому сначала скорость снижения температуры является максимальной (см. рис. 5), а с течением времени график становится все более пологим. При этом в течение первых 26 мин процесса теплоотвода происходило охлаждение ТАМ до температуры затвердевания, затем начиналась кристаллизация ТАМ. Начало кристаллизации визуально отслеживается на внутренней, изначально блестящей, поверхности ГТП-пластины в виде потемневшей матовой области, которая сначала образуется вблизи жидкостных теплообменников, и далее с течением времени эта область расширяется в сторону расположения нагревателей. На температурном графике $T(t)$ моменту начала кристаллизации соответствует переход от монотонного снижения зависимости к небольшому практически горизонтальному участку, протяженность которого равна длительности расширения зоны кристаллизации по поверхности ГТП-пластины. В дальнейшем происходит нарастание слоя ТАМ, затвердевшего на поверхности ГТП-пластины (рис. 4с и 4d), и формирование на нем температурного перепада, приводящего к последующему плавному снижению температуры (рис. 5). Проведенный в ходе эксперимента второй рабочий цикл «плавление–замораживание» в целом повторил по характеристикам первый цикл. Таким образом, график температуры имеет повторяющийся и периодический характер, амплитуда температурных колебаний составляет около 28 °С.

Следует отметить, что границы раздела фаз практически параллельны боковым стенкам секции ТА (рис. 4b–4d), что соответствует результатам численного моделирования [6] и подтверждает очень высокую теплораспределяющую способность ГТП-пластин. Изменение величины подводимой мощности влияет на такие количественные параметры процесса, как длительность нагрева до полного плавления ТАМ и амплитуда температурных колебаний, при этом характерный вид зависимости $T(t)$ сохраняется.

Колебания температуры и фазовые превращения сопровождаются изменением плотности и объема ТАМ. Величина изменения объема ΔV , которая фиксировалась по уровню жидкого ТАМ в компенсационном резервуаре, приведена для первого рабочего цикла в виде зависимости $\Delta V(t)$ на рис. 6 (кривая 1), нулевой уровень жидкости на графике соответствует состоянию до включения нагревателей. При этом рабочий цикл можно условно разделить на три периода: Δt_1 , Δt_2 и Δt_3 (рис. 6). Подвод теплоты осуществляется в течение первого периода Δt_1 , в ходе которого объем в резервуаре увеличился до уровня $\Delta V_1 = 62 \text{ см}^3$. Следующий период Δt_2 продолжается с момента включения теплоотвода до начала кристаллизации, здесь уменьшение объема происходит только за счет изменения температуры, общее изменение ΔV_2 составило примерно $9,5 \text{ см}^3$. В третьем периоде Δt_3 идет процесс кристаллизации ТАМ, при этом, как следует из результатов численного моделирования процесса [6], в объеме жидкой фазы распределение температуры является практически однородным и ее значение близко к T^* . Изменение объема на этой стадии, обусловленное только фазовыми превращениями ТАМ, составляет $\Delta V_3 = 52,5 \text{ см}^3$, величина относительного изменения $\Delta V_3/V_0 = 13 \%$.

Динамика фазовых переходов в ТА сопровождается изменением объемных долей жидкой и твердой фаз ТАМ во времени. Расчет долевого соотношения фаз

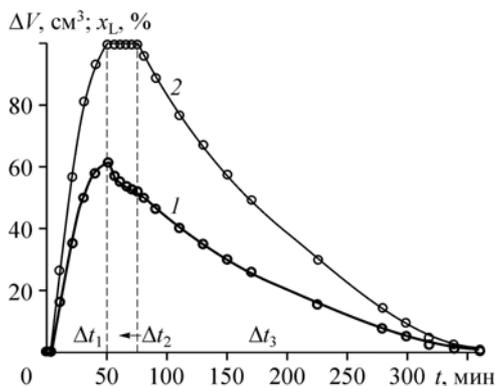


Рис. 6. Временные зависимости изменения объема ТАМ в компенсационном резервуаре (1) и объемной доли жидкой фазы ТАМ (2).

был произведен на основе временных зависимостей температуры и изменения объема. Выполнение расчета начинается с третьего временного периода, в котором изменение объема происходит за счет перехода ТАМ из жидкого в твердое состояние. В момент начала кристаллизации изменение объема $\Delta V(t) = \Delta V_1 - \Delta V_2 = \Delta V_3$, доля жидкой фазы равна единице, затем она монотонно снижается в соответствии с выражением $x_L(t) = \Delta V(t) / \Delta V_3$. Коэффициент изменения объема за счет фазового превращения был определен как $k_V = \Delta V_3 / (hS)$, где $hS = hL_1H_1$ — внутренний объем секции ТА. Во втором периоде рабочего цикла в объеме ТА присутствует только жидкая фаза ($x_L = 1$), температура которой имеет неоднородное распределение. В начале второго периода температура в объеме изменяется от T_{\max} на поверхности ГТП пластины до T^* на оси нижнего основания, где закончилось плавление твердого ТАМ. Для этого момента значение средней температуры принималось равным $0,5(T_{\max} + T^*)$. В конце периода температура в объеме секции выравнивается и ее среднее значение приближается к T^* . Температурный коэффициент изменения объема оценивался по разности средних температур ТАМ за период и рассчитывался как $k_T = \Delta V_2 / (0,5hS(T_{\max} - T^*))$. В первом периоде изменение объема ТАМ обусловлено совместным влиянием роста температуры и процесса плавления: $\Delta V(t) = 0,5k_T h_L S(T(t) - T^*) + k_V h_L S$, где h_L — суммарная толщина двух слоев жидкого ТАМ, прилегающих к ГТП-пластинам. Суммарный объем жидкого ТАМ был определен из соотношения

$$V_L(t) = h_L S = \frac{\Delta V(t)}{k_T 0,5(T(t) - T^*) + k_V},$$

доля жидкой фазы составляла $x_L(t) = V_L(t) / V_0$. Рассчитанная с учетом измеренных зависимостей температуры $T(t)$ и изменений объема $\Delta V(t)$ для всех трех периодов рабочего цикла зависимость доли жидкой фазы $x_L(t)$ приведена на рис. 6 (кривая 2).

В ходе дополнительных экспериментов был определен температурный коэффициент изменения объема $k_{T0} = \Delta V / (V_0 \Delta T)$ при однородном распределении температуры в объеме ТА в диапазоне 20–46 °С. Значение температуры ТАМ задавалось соответствующим уровнем температуры теплоносителя в жидкостном теплообменнике, измерения проводились после установления стационарного состояния. По данным измерений относительное изменение объема составило $k_{T0} = 0,91 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. По данным работы [8] относительное изменение плотности жидкого гексадекана описывается соотношением $\rho = -0,6617T + 966,7185$ и в рассматриваемом температурном диапазоне составляет $0,86 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Для анализа теплового баланса проведена оценка вклада каждой из составляющих его величин. Выделенная нагревателями теплота затрачивается на плавление ТАМ, изменение внутренней энергии ТАМ и элементов конструкции ТА, а также уходит в виде тепловых потерь в окружающее пространство. В течение 50 мин при мощности тепловыделения $Q = 46$ Вт нагревателями было выделено 138 кДж, из них 82,8 кДж было затрачено непосредственно на плавление ТАМ. При расчете изменения внутренней энергии $\Delta U = c_p \rho V_0 \Delta T$ учитывалась неоднородность распределения температуры в момент окончания нагрева с использованием определенного выше температурного коэффициента k_{T0} . Изменение средней температуры за период нагрева составило $\Delta T = \Delta V_2 / (V_0 k_{T0}) = 25,8$ °С, внутренней энергии — $\Delta U = 17,9$ кДж при значении $c_p = 2,23$ кДж/(кг·К). Суммарная величина теплоты, поглощенная ТАМ за счет плавления и изменения внутренней энергии, составила 100,7 кДж или примерно 73 % от тепловыделения нагревателей. Температура ГТП-пластины и других элементов конструкции в процессе нагрева изменялась от T_0 до T_{\max} , а их внутренние энергии изменялись следующим образом: ГТП-пластины — $\Delta U = 5,6$ кДж, $m = 432$ г; стенки из оргстекла — $\Delta U = 13,3$ кДж, $m = 374$ г;

жидкостные теплообменники — $\Delta U = 9,9$ кДж, $m = 910$ г; крепежные элементы — $\Delta U = 1,1$ кДж, $m = 84$ г. Суммарная величина теплоты, поглощенной ТАМ и конструкцией ТА, составила 130,6 кДж, разница между этой величиной и тепловыделением нагревателей равна 7,4 кДж (5,4 %) и обусловлена тепловыми потерями в окружающее пространство.

Заключение

Результаты проведенных экспериментов показали, что в течение рабочего цикла секция ТА сначала эффективно поглощает теплоту, выделяемую нагревателями, а затем перенаправляет ее во внешний контур охлаждения. В экспериментах установлена высокая теплораспределяющая способность ГТП-пластин, которая обеспечивает однородность подвода и отвода теплоты к ТАМ. Полученные результаты подтверждают перспективность применения ТА для терморегулирования мощной бортовой радиоэлектронной аппаратуры, работающей в режиме пиковых периодических нагрузок. Вместе с тем установлено, что процесс в ТА сопровождается значительным изменением объема ТАМ как за счет фазовых превращений, так и вследствие температурных колебаний, также при плавлении ТАМ наблюдается выделение газовых пузырей. При практическом применении ТА в системах терморегулирования потребуются, очевидно, выполнение условия герметичности объема, поэтому возникает необходимость предварительной дегазации ТАМ и использовании в конструкции компенсаторов сильфонного типа.

Список литературы

1. Алексеев В.А. Охлаждение радиоэлектронной аппаратуры с использованием плавящихся веществ. М.: Энергия, 1975. 88 с.
2. Arshad A., Ali H.M., Ali M., Manzoor S. Thermal performance of phase change material (PCM) based pin-finned heat sinks for electronics devices: effect of pin thickness and PCM volume fraction // Applied Thermal Engng. 2017. Vol. 112. P. 143–155.
3. 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.
4. Шарков А.В., Кораблев В.А., Герасютенко В.В. Система охлаждения на основе тепловой трубы с устройством поглощения теплоты от мощных источников // Научно-технич. вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18, № 1. С. 133–139.
5. 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.
6. Васильев Е.Н., Деревянко В.А. Динамика фазовых превращений в тепловом аккумуляторе системы терморегулирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 3. С. 481–488.
7. Васильев Е.Н., Деревянко В.А., Нестеров Д.А., Косенко В.Е., Чеботарев В.Е. Вычислительное моделирование процессов теплообмена в системах терморегулирования космических аппаратов // Вычислительные технологии. 2009. Т. 14, № 6. С. 19–28.
8. Vélez C., Khayet M., Ortiz de Zárate J.M. Temperature-dependent thermal properties of solid/liquid phase change even-numbered n-alkanes: n-Hexadecane, n-octadecane and n-icosane // Applied Energy. 2015. Vol. 143. P. 383–394.

*Статья поступила в редакцию 4 декабря 2018 г.,
после переработки — 13 марта 2019 г.,
принята к публикации 4 июня 2019 г.*