

Е.Н. Васильев<sup>1</sup>, В.А. Деревянко<sup>1</sup>, В.Е. Косенко<sup>2</sup>, В.Е. Чеботарев<sup>2</sup>

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия (1)

НПО Прикладной механики, Железногорск, Россия (2)

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОСТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ПАНЕЛИ****АННОТАЦИЯ**

Проведено численное моделирование работы термостабилизированной панели, предназначенной для обеспечения оптимального теплового режима функционирования радиоэлектронной аппаратуры. Стабилизация температуры обеспечивается наличием в составе панели теплового аккумулятора, работающего на фазовом переходе «жидкость-твердое тело». В результате моделирования получены форма фазовой границы и распределение температуры на радиаторе и в объеме панели. Показано, что использование термостабилизированной панели позволяет поддерживать заданную температуру посадочного места прибора с точностью нескольких сотых долей градуса даже при существенно нестационарных внешних условиях.

**1. ВВЕДЕНИЕ**

Одним из необходимых условий надежной работы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) на борту космического аппарата является обеспечение оптимального теплового режима. Причем функционирование отдельных блоков РЭА по техническим условиям должно осуществляться в узком температурном диапазоне ( $\pm 0.1$  °С). Поддержание температуры в таких границах при изменении внешних тепловых потоков является достаточно сложной технической задачей. Применение теплового аккумулятора на фазовом переходе и жалюзи позволяет решить задачу стабилизации температуры посадочного места блока РЭА. Для определения оптимальных конструктивных параметров данной системы терморегулирования была разработана теплофизическая математическая модель.

**2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ****2.1. Физическое описание процесса**

На рис. 1 приведена схема рассматриваемого устройства термостабилизации, которое имеет следующий принцип работы. Тепловая энергия, выделяющаяся при работе блоков РЭА, передается механизмом теплопроводности через тепловой аккумулятор на радиатор, с которого она излучается в окружающее пространство. При этом площадь радиатора определяется условиями теплового баланса, исходя из заданной температуры стабилизации, мощности тепловыделения прибора и излучательной способности поверхности. В тепловом аккумуляторе рабочее вещество должно одновременно находиться как в твердом, так и в жидком состоянии. Фазовая граница при этом служит своеобраз-

ным экраном, препятствующим проникновению возмущений внешнего теплового потока. Граница раздела фазовых состояний чистых веществ, а также эвтектик, характеризуется постоянным значением температуры, выполняющимся с высокой точностью (0.01°С и выше). Это свойство фазовой границы лежит в основе работы рассматриваемой термостабилизированной панели.

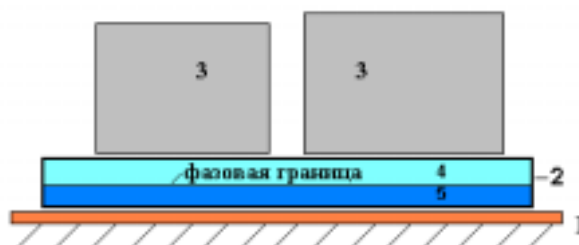


Рис.1. Схема термостабилизированной панели: 1 – радиатор с жалюзи, 2 – тепловой аккумулятор, 3 – блоки РЭА, 4 – жидкое состояние вещества, 5 – твердое состояние.

Стабильность поддержания температуры в данном устройстве зависит от следующих факторов. Колебание величины внешних или внутренних тепловых потоков вызывает изменение соотношения твердой и жидкой фаз и соответствующее перемещение фазовой границы. Изменение толщины слоя жидкого вещества приводит к соответствующему изменению на нем перепада температуры

$$\Delta T = \frac{q \Delta x}{\lambda}, \quad (1)$$

что вызывает, в конечном итоге, отклонение температуры посадочных мест блоков РЭА. Кроме того, неоднородность распределения температуры радиатора приводит к искривлению пространственной формы фазовой границы. В зависимости от формы границы толщина жидкого слоя меняется по площади панели, что приводит к соответствующей неоднородности распределения температуры посадочного места. Особенно важно, чтобы фазовая граница не выходила на нижнюю или верхнюю поверхность панели, т.к. это приводит к утрате ее экранирующей способности.

Для уменьшения амплитуды перемещения фазовой границы и снижения колебаний температуры посадочных мест терморегуляция осуществляется с помощью жалюзи, которые позволяют изменять эффективный коэффициент черноты радиатора. Из-

вестно, что при плавлении (кристаллизации) большинство веществ меняют свой объем. В данном устройстве этот эффект используется для управления работой жалюзи. При относительном уменьшении доли жидкой фазы в аккумуляторе створки жалюзи прикрываются, приводя к уменьшению эффективного коэффициента черноты радиатора и величины энергопотерь, что позволяет восстановить соотношение жидкой и твердой фаз.

Требование стабильности температуры накладывает условия на выбор рабочего вещества теплового аккумулятора. Очевидно, что повышению стабильности способствует высокое значение теплоты фазового перехода, т.к. изменение величины теплового потока приводит к меньшему перемещению фазовой границы. В свою очередь использование вещества с высоким коэффициентом теплопроводности, согласно выражению (1), обеспечивает меньшее изменение перепада температуры на жидком слое вещества в аккумуляторе при движении границы раздела фаз. В наибольшей степени отвечают этим требованиям металлы и их сплавы. Так как чистых металлов с температурой плавления  $\approx 293\text{K}$  нет, то в качестве рабочего вещества рассматривались эвтектические сплавы.

## 2.2. Математическая формулировка задачи

Для исследования динамики тепловых процессов, протекающих в термостабилизирующей панели, была разработана математическая модель, основанная на численном решении системы нестационарных уравнений теплопроводности. Процесс теплопередачи в тепловом аккумуляторе описывался трехмерным уравнением теплопроводности с переменными коэффициентами

$$c_m(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial z} \right], \quad (2)$$

где  $c_m$  — удельная объемная теплоемкость материала, включающая в себя теплоту фазового перехода;  $T$  — температура;  $\lambda$  — теплопроводность;  $t$  — время;  $x, y, z$  — пространственные координаты. Неоднородность  $c_m$  и  $\lambda$  связана с различием теплофизических свойств рабочего вещества в жидком и твердом состоянии. Моделирование теплопередачи в радиаторе выполнялось с помощью двумерного уравнения теплопроводности

$$c_m \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_v(x, y, t) - \alpha_v(x, y, t)T, \quad (3)$$

слагаемые объемной плотности источников  $q_v$  и стоков теплоты  $\alpha_v T$  учитывают боковой теплообмен радиатора с тепловым аккумулятором и окружающей средой.

Уравнения (1)-(2) дополнены граничные условиями третьего рода

$$\left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial l} + \alpha T \right]_{l=0,L} = q|_{l=0,L}, \quad \text{где } l = x, y, z$$

и начальным условием вида

$$T|_{t=0} = T_0(x, y, z) = \text{const}.$$

На границе раздела фаз температура постоянна, а теплоемкость имеет скачок, связанный с теплотой фазового перехода. Для учета теплоты фазового перехода в теплоемкости использовалась  $\delta$ -функция Дирака, при этом суммарная теплоемкость записывалась как

$$c_{\text{eff}}(T) = c(T) + q_{\text{faz}} \delta(T - T_{\text{faz}}).$$

При численном решении задачи разрывная  $\delta$ -функция заменялась некоторой гладкой функцией  $f(T)$ , отличной от нуля только в интервале  $(T_{\text{faz}} - \Delta T, T_{\text{faz}} + \Delta T)$  и удовлетворяющей условию нормировки

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

Для численного решения рассмотренной выше системы уравнений был выбран метод суммарной аппроксимации [1], в котором используется расщепление задачи по пространственным координатам.

## 2.3. Обсуждение результатов

Расчет теплового режима термостабилизированной платформы проводился для алюминиевого радиатора размерами  $0.4 * 0.4 * 0.008 \text{ м}^3$ , который через стык с коэффициентом теплообмена  $\alpha = 300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  имеет тепловой контакт с аккумулятором теплоты размерами  $0.25 * 0.1 * 0.01 \text{ м}^3$ . В качестве рабочего вещества теплового аккумулятора рассматривался калий-натриевый сплав с весовым соотношением 56%Na+44%K. Теплофизические параметры данного сплава следующие: плотность  $\rho = 838 \text{ кг}/\text{м}^3$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda = 68,9 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , теплоемкость  $C = 1050 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , температура фазового перехода  $T_{\text{faz}} = 292 \text{ К}$ , теплота фазового перехода  $Q_{\text{faz}} = 89,5 \text{ кДж}/\text{кг}$ .

На аккумуляторе расположен прибор с размерами посадочного места  $0.25 * 0.1 \text{ м}^2$ , причем полагалось, что тепловой поток от прибора по всей площади распределен равномерно. Суммарное тепловыделение от прибора задавалось равным 15 Вт. Тепловой поток от прибора через тепловой аккумулятор поступает на радиатор, кроме того на поверхности радиатора был задан внешний тепловой поток, изменяющийся во времени от 0 до  $50 \text{ Вт}/\text{м}^2$  по синусоидальному закону с периодом 30 мин. С радиатора уходит поток, соответствующий по величине излучению в открытое космическое пространство. Коэффициент черноты поверхности  $\epsilon$  является величиной переменной и зависит от степени раскрытия жалюзи. В данной модели величина  $\epsilon$  задавалась линейной функцией с изменением от 0.15 до

0.45 при изменении относительной доли твердой фазы рабочего вещества от 0.25 до 0.75, соответственно.

В начальный момент времени на радиаторе было задано однородное распределение температуры. В тепловом аккумуляторе начальное распределение температуры однородно по площади, по толщине оно меняется по линейному закону так, что градиент соответствует величине теплового потока от прибора, при этом фазовая граница равноудалена от верхней и нижней поверхностей.

При включении механизмов теплопроводности и излучения на радиаторе формируется куполообразное распределение температуры, имеющее максимальные значения в месте контакта с тепловым аккумулятором (рис.2).

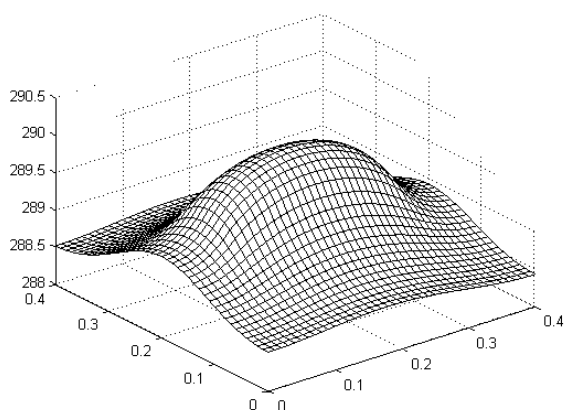


Рис.2. Распределение температуры поверхности радиатора.

Неоднородность распределения температуры радиатора вызывает снижение температуры на краях теплового аккумулятора, что в свою очередь приводит к искривлению пространственной формы фазовой поверхности (рис.3).

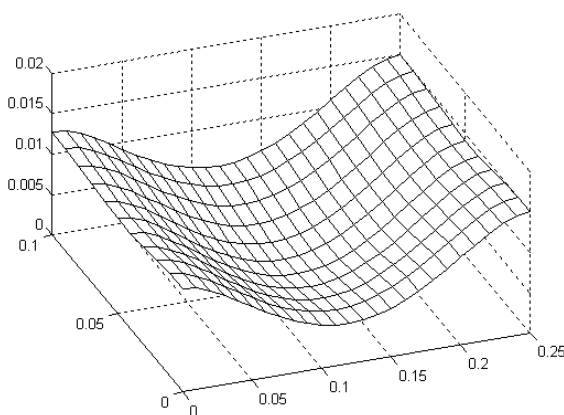


Рис.3. Пространственная форма границы раздела жидкой и твердой фаз в тепловом аккумуляторе.

Система терморегуляции должна обеспечивать как стабильность температуры во времени, так и однородность распределения по площади посадочного места. На рис. 4 приведены временные зависимости средней температуры посадочного места  $T_s$ , максимальной  $T_{max}$  и минимальной температур  $T_{min}$  и их разности  $T_{max} - T_{min}$ . На начальной стадии процесса ( $t < 60$  мин) изменение средней температуры посадочного места связано, прежде всего, с перестройкой температурного поля радиатора. В дальнейшем периодические колебания  $T_s$  с амплитудой  $\sim 0,01$  К являются откликом на воздействие внешнего нестационарного потока.

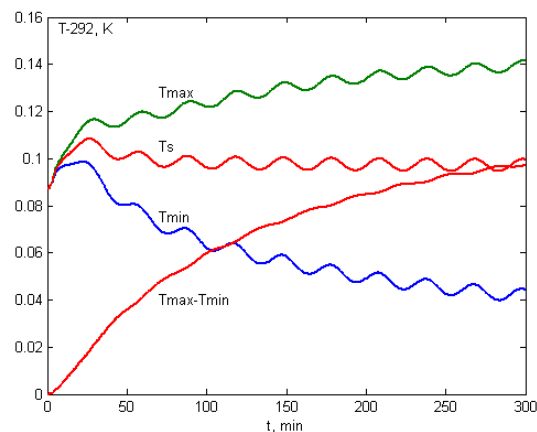


Рис.4. Динамика изменения температуры посадочного места прибора.

Максимальное отклонение температуры по площади посадочного места достигает величины  $\sim 0,1$  К, причем характерное время установления температурного профиля достигает нескольких часов. Это связано с тем, что неоднородность температурного поля определяется пространственной формой фазовой границы, а теплоемкость фазового превращения достаточно велика. Уменьшить влияние неоднородности поля температуры можно, установив между термостабилизированной панелью и прибором пластину из материала с высокой теплопроводностью.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный вычислительный эксперимент показал, что применение термостабилизированной панели позволяет поддерживать заданную температуру посадочного места прибора с точностью нескольких сотых долей градуса, даже при существенно нестационарных внешних условиях. Для выравнивания температуры по площади посадочного места желательна установка дополнительной прокладки из материала с высокой теплопроводностью между термостабилизированной панелью и прибором.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самарский А.А. Теория разностных схем.- М.: Наука, 1989, 616 с.