

Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 7. С. 323–333
Thermal processes in engineering, 2024, vol. 16, no. 7, pp. 323–333

Научная статья
УДК 536.21

Децентрализованная система термостабилизации космического аппарата

М.В. Бунтов¹, Н.П. Семена¹, Д.М. Гамков^{1✉}, Д.В. Сербинов¹, А.М. Присташ¹,
В.А. Липилин¹, Е.Б. Гурова¹

¹Институт космических исследований (РАН), Москва, Россия
buntov@cosmos.ru, semena@cosmos.ru, ✉danila_gamkov@cosmos.ru, serbinov@cosmos.ru, pristash1973@mail.ru, lipilin@cosmos.ru, egurova@cosmos.ru

Аннотация. Представлена децентрализованная активная система обеспечения теплового режима космического аппарата (СОТР КА), на базе саморегулируемых нагревательных элементов (СНЭ). Данная система по сравнению с классической централизованной системой, имеющей единый блок управления, обладает более высокой надежностью за счет распределения функции управления тепловым режимом объекта термостабилизации по многим независимым элементам. Необходимую для саморегулирования обратную пропорциональность между генерируемым СНЭ теплом и его температурой обеспечивают тепловая и электрическая связь двух транзисторов – измерителя температуры и генератора теплового потока. Тепловое математическое и экспериментальное моделирование трехэлементной децентрализованной СОТР на базе СНЭ продемонстрировало работоспособность системы в различных переменных тепловых условиях и корректность математической модели, предложенной для описания теплового состояния такой системы.

Ключевые слова: Пропорциональный регулятор, тепловые системы с обратной связью, тепловое математическое моделирование, теплофизический эксперимент, терморегулирование космических аппаратов

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ № 075-15-2024-647.

Для цитирования. Бунтов М.В., Семена Н.П., Гамков Д.М., Сербинов Д.В., Присташ А.М., Липилин В.А., Гурова Е.Б. Децентрализованная система термостабилизации космического аппарата // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 7. С. 323–333. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=182788>

Original article

Decentralized spacecraft thermal stabilization system

M.V. Buntov¹, N.P. Semena¹, D.M. Gamkov^{1✉}, D.V. Serbinov¹, A.M. Pristash¹,
V.A. Lipilin¹, E.B. Gurova¹

¹Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

buntov@cosmos.ru, semena@cosmos.ru, ✉danila_gamkov@cosmos.ru, serbinov@cosmos.ru,
pristash1973@mail.ru, lipilin@cosmos.ru, egurova@cosmos.ru

Abstract. A decentralized active thermal control system for a spacecraft (ATCS), consisting of self-regulating heating elements (SRHE), is presented. This system, in comparison with the classical centralized system with a single control unit, has higher reliability due to the distribution of the function of controlling the thermal mode of the thermal stabilization object over many independent elements. The inverse proportionality between the heat generated by the SRHE and its temperature, necessary for self-regulation, is provided by the thermal and electrical connection of two transistors - a temperature meter and a heat flow generator. Thermal mathematical and experimental modeling of a three-element decentralized ATCS based on the SRHE demonstrated the performance of the system under different variable thermal conditions and the correctness of the mathematical model proposed to describe the thermal state of such a system.

Keywords: proportional controller, thermal systems with feedback, thermal mathematical modeling, thermophysical experiment, spacecraft thermal control

Funding. The work was supported by the grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 075-15-2024-647.

For citation. M.V. Buntov, N.P. Semena, D.M. Gamkov, D.V. Serbinov, A.M. Pristash, V.A. Lipilin, E.B. Gurova. Decentralized spacecraft thermal stabilization system. *Thermal processes in engineering*. 2024, vol. 16, no. 7, pp. 323–333. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=182788>

Введение

Тепловые условия в космосе являются гораздо более экстремальными по сравнению с земными условиями. Отсутствие основного механизма теплообмена, конвекции, делает космические системы обеспечения теплового режима гораздо более сложными, неустойчивыми и менее предсказуемыми по сравнению с аналогичными наземными системами. Для любого космического аппарата система обеспечения теплового режима является критически важной частью, от которой зависит само существование миссии.

В настоящее время есть устоявшаяся схема обеспечения теплового режима космических аппаратов. Она имеет пассивную часть, основанную на излучении генерируемого аппаратурой тепла внешними радиаторами – излучателями, тепловой поток к которым подводится от источников тепла по конструкции или по специаль-

ным теплопроводам. А также имеет активную часть, основанную на нагревателях и используемую для компенсации колебаний температуры, возникающих из-за нестабильности внутреннего тепловыделения или внешних тепловых условий, воздействующих на радиатор.

При этом в космос выводятся все более сложные приборы, для функционирования которых требуется поддержание их температуры на более точном и стабильном уровне [1]. Это приводит к ужесточению требований, как к параметрам, так и к надежности активной части системы термостабилизации, поскольку ее отказ или некорректная работа равносильна отказу всей системы обеспечения теплового режима.

Классическая активная система термостабилизации космического прибора состоит из набора нагревателей, термодатчиков и единого блока управления, регулирующего мощность каждого

нагревателя по показаниям соответствующему ему термодатчику. Данную систему условно будем называть централизованной. В централизованной системе выход из строя одного или нескольких нагревателей ухудшает качество терморегулирования, но, как правило, не приводит к выходу из строя всей системы. Однако её слабым звеном является блок управления, выход из строя которого представляет собой катастрофическое событие для этой системы, а значит и для всего космического аппарата. Некоторое повышение надёжности обеспечивает резервирование блока управления, но ценой этого является увеличение массы и сложности как самой системы термостабилизации, так и связанных с ней других систем КА.

Существенно повысить надёжность системы термостабилизации можно за счёт распределения функции стабилизации теплового режима по многим независимым элементам. Систему, организованную из таких элементов, будем называть децентрализованной.

В данной статье представлен вариант конструкции саморегулируемого нагревательного элемента (СНЭ) и построенной на её основе децентрализованной системы термостабилизации. Дана математическая модель, описывающая реакцию системы из таких элементов на внешние переменные тепловые условия. Представлены результаты экспериментов по определению характеристик СНЭ в климатической камере и по поведению системы, состоящей из трех СНЭ, при воздействии переменных внешних тепловых факторов в термовакуумной экспериментальной установке.

Саморегулируемый нагревательный элемент децентрализованной системы термостабилизации

Саморегулируемый нагревательный элемент (СНЭ) представляет собой компактную сборку из полупроводниковых элементов на теплопередающей конструкции-корпусе, генерирующую тепловой поток в посадочную поверхность, уровень которого обратно пропорционален разнице между заданной температурой (уставкой) и измеренной температурой этой поверхности.

Упрощенная комбинированная электротепловая схема такого устройства представлена на рис. 1. Его чувствительным элементом высту-

пает р-п переход база-эмиттер транзистора-измерителя VT1, который управляет напряжением на затворе транзистора-нагревателя VT3, выделяющего тепло за счёт протекающего через него тока. Для ограничения тока через VT3 служит шунт Rш и транзистор VT2. Конструкция устройства обеспечивает необходимую обратную (тепловую) связь между нагревателем VT3 и измерителем VT1, а также является защитным корпусом. Температура регулирования (уставка) определяется напряжением на базе VT1, которое задается соотношением делителя R1 и R2. Таким образом, все устройство представляет собой саморегулируемый нагревательный элемент.

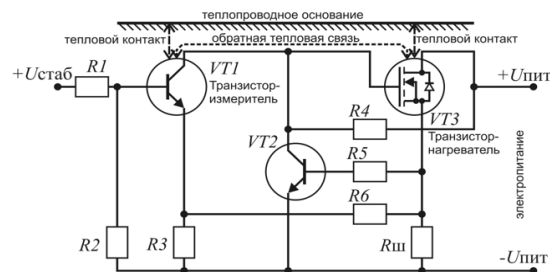


Рис. 1. Упрощенная электро-тепловая схема СНЭ

В этом устройстве в направлении от измерителя к нагревателю используется электрическая связь, а в обратном – тепловая связь. Данное сочетание электрической и тепловой, в качестве обратной отрицательной, связи обеспечивает в некотором ограниченном температурном диапазоне обратную пропорциональность тепловыделения СНЭ от температуры его корпуса. Таким образом, в этой области устройство работает как классический П-регулятор.

На рис. 2 показана физическая характеристика реального СНЭ. Сплошной линией на графике $q(t)$ изображена зависимость тепловыделения такого устройства от его температуры в районе посадочного места, прикрепленного к объекту терморегулирования.

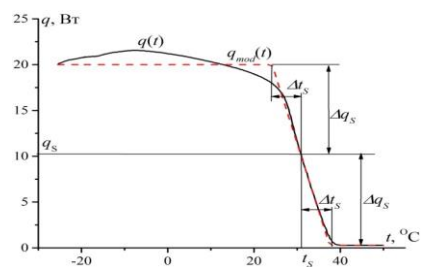


Рис. 2. Вариант физической и соответствующей ей модельной термобалансировочной характеристики СНЭ

Эту зависимость будем называть термобалансировочной характеристикой. Она может быть описана следующей упрощённой математической моделью, графическая интерпретация которой показана прерывистой линией q_{mod} на рис. 2:

$$q(t) \approx q_{mod}(t) = \begin{cases} q_s + \Delta q_s, & \text{при } t \leq t_s - \Delta t_s \\ q_s - Kp \cdot (t - t_s), & \text{при } t_s - \Delta t_s < t < t_s + \Delta t_s, \\ q_s - \Delta q_s, & \text{при } t \geq t_s + \Delta t_s \end{cases} \quad (1)$$

где q, t – текущие тепловыделение нагревателя и температура измерителя; t_s, q_s, Kp – температурная уставка измерителя, соответствующее ей тепловыделение нагревателя и коэффициент пропорциональности зависимости $q(t)$ в рабочем диапазоне температур (далее называемый температурным угловым коэффициентом); $\pm \Delta q_s$ – диапазон отклонения мощности от значения q_s при отклонении температуры на $\pm \Delta t_s$ от значения t_s . При этом:

$$\Delta t_s = \Delta q_s / Kp. \quad (2)$$

Задаваемый параметр СНЭ – температурная уставка t_s . Настраиваемые характеристики СНЭ: $q_s, Kp, \Delta q_s$.

Работа СНЭ в диапазоне $t_s \pm \Delta t_s$ близка к работе классического П-регулятора, включая все его достоинства и недостатки [2]. Как известно, пропорциональный регулятор, в отличие от ПИД-регулятора не может обойтись без колебания температуры около уставки.

Децентрализованная система термостабилизации КА будет представлять собой набор таких СНЭ, размещённых в тех местах конструкции, стабилизация температуры которых является критически важной для функционирования КА.

По сравнению с централизованной такая система будет обладать существенно более высокой надёжностью из-за отсутствия центрального блока управления, имеющего критическую значимость для работоспособности классической системы, и отсутствия электрических и информационных связей между элементами системы. Важным свойством электронной схемы СНЭ является то, что она исключает отказ типа «неконтролируемый нагрев», т.е. при любом отказе одного элемента СНЭ не представляет опасности перегрева для термостабилизируемого объекта. В таком случае повышение надёжности системы достигается простым добавлением необходи-

мого количества СНЭ, работающих по схеме нагруженного (горячего) резервирования.

Существенным преимуществом системы на основе СНЭ является аналоговый режим работы его схемы, который исключает генерацию электромагнитных помех и помех по цепям питания, и полностью автономный режим работы каждого элемента системы, требующего только наличие электропитания (два провода).

Математическая модель децентрализованной системы термостабилизации

С математической точки зрения рассматриваемую децентрализованную систему термостабилизации космического аппарата можно представить как набор точечных тепловых тепловыделяющих узлов и тепловых связей между ними. При этом количество тепловых узлов модели может быть больше числа СНЭ, но обязательно каждый СНЭ должен быть совмещён с отдельным тепловым узлом. Площади и массы узлов определяются параметрами примыкающей конструкции.

Тепловые связи между узлами включают теплопроводность через конструкцию аппарата и радиационные связи за счет излучения относящихся к тепловым узлам фрагментов конструкции друг на друга. Некоторые тепловые узлы (находящиеся на радиаторах или других внешних открытых поверхностях) имеют радиационный интерфейс с внешним пространством в виде собственного излучения в «холодный чёрный космос» и поглощения внешних потоков от планеты и Солнца.

Для математического описания подобной системы наиболее подходящей является узловая модель [3]. В основе этой системы лежит разбиение объекта на составные части (тепловые узлы) и определение параметров данных узлов и связей между ними.

Узловая математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений, составленных на базе элементарных тепловых балансов каждого узла. Отдельное уравнение для произвольного (i -того) теплового узла определяет изменение температуры узла от времени $T(\tau)$:

$$C_i \cdot \frac{dT(\tau)_i}{d\tau} = q(\tau)_i + B'(\tau)_i, i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

где n – количество тепловых узлов модели; C_i , $q(\tau)_i$ – теплоёмкость и внутреннее тепловыделение i -того узла, $B'(\tau)_i$ – элементарный баланс входящих в узел и выходящих из него тепловых потоков, T и t – обозначения температуры в шкалах Кельвина и Цельсия ($T \approx t + 273.15$).

Величина $B'(\tau)_i$ в общем случае содержит теплообмен i -того узла с окружающим пространством и с другими тепловыми узлами. Теплообмен в условиях космического пространства предполагает, что узел должен иметь поверхность теплообмена с окружающим пространством и поверхность теплообмена с другими тепловыми узлами. Первая поверхность имеет площадь – F_i , коэффициент поглощения солнечного излучения – As_i , и степень черноты – ε_i . Вторая поверхность имеет площадь – F'_i и степень черноты – ε'_i .

Тепловой интерфейс поверхности теплообмена с окружающим пространством определен поверхностной плотностью поглощённого теплового потока – $Es(\tau)_i$, от падающего на эту поверхность внешнего излучения, а также угловым коэффициентом видимости этой поверхностью космического пространства – φ_{F_i-C} .

Теплообмен узлов друг с другом определяется кондуктивными тепловыми сопротивлениями конструкции между i -тым и j -тым тепловыми узлами – $R_{i,j}$ и угловыми коэффициентами видимости этими узлами друг друга – $\varphi_{F'_i-F'_j}$, $\varphi_{F'_j-F'_i}$.

При таком представлении выражение для $B'(\tau)_i$ имеет вид:

$$B'(\tau)_i = (Ea(\tau)_i - \varphi_{F_i-C} \cdot \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot T(\tau)_i^4) \cdot F_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{T(\tau)_j - T(\tau)_i}{R_{i-j}} + F'_i \cdot \sigma \cdot \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{(T(\tau)_j^4 - T(\tau)_i^4) \cdot \varphi_{F'_i-F'_j}}{1 + \varphi_{F'_i-F'_j} \cdot (\varepsilon_i'^{-1} - 1) + \varphi_{F'_j-F'_i} \cdot (\varepsilon_j'^{-1} - 1)}, \quad (4)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана; τ – время; индекс “ i ” – означает принадлежность параметра i -тому, а “ j ” – j -тому узлу модели.

В космическом пространстве в общем случае величина $Ea(\tau)_i$, определяется облучённостью падающих на поверхность F_i , потоков: прямого солнечного излучения – $Es(\tau)_i$, отражённого от планеты солнечного излучения – $Esp(\tau)_i$ и собственного излучения планеты – $Ep(\tau)_i$:

$$Ea(\tau)_i = As_i \cdot (Es(\tau)_i + Esp(\tau)_i) + \varepsilon_i \cdot Ep(\tau)_i. \quad (5)$$

Начальным условием для решения системы (3) является набор начальных температур узлов T_{0i} .

При делении на тепловые узлы объекта терморегулирования, в котором установлены СНЭ, целесообразно сгруппировать тепловые узлы с СНЭ, например, поставив их в начало тепловой модели. Таким образом, если первые n' ($n' \leq n$) узлов модели совпадают с СНЭ, то в диапазоне температур $T_s \pm \Delta T_s$ в этих узлах имеется обратная связь тепловыделения с температурой (см (1)):

$$q(\tau)_i = q_{si} - Kp_i \cdot (T(\tau)_i - T_{si}), i = 1, \dots, n'. \quad (6)$$

Это уравнение позволяет адаптировать модель (3) к применению для объекта терморегулирования с децентрализованной системой термостабилизации. Полученную систему можно использовать, во-первых, для выбора требуемых для системы термостабилизации параметров СНЭ (q_{si} , T_{si} , Kp_i), а, во-вторых, для расчета зависимости температуры тепловых узлов от времени после выбора этих параметров.

Выбор параметров q_{si} , T_{si} , и Kp_i может осуществляться следующим образом. Температура стабилизации i -того теплового узла T_{si} , является задаваемым параметром. Условие задания постоянного уровня этих температур $T(\tau)_i = T_{si} = \text{Const}$ соответствует $dT(\tau)_i/d\tau = 0$ при $i = 1, \dots, n'$. Тогда n' первых уравнений системы (3) с можно записать в виде:

$$q(\tau)_i = -B'(\tau)_i. \quad (7)$$

Эти уравнения позволяют на рассматриваемом промежутке времени ($0 \dots \tau_k$) найти диапазон изменения мощности нагрева i -того узла $q(\tau)_i \in [q_{MINi} \dots q_{MAXi}]$, обеспечивающие поддержание стационарной температуры i -того узла $T_{si} = \text{Const}$. Таким образом, средний уровень мощности, от которого осуществляется регулирование составит $q_{si} = (q_{MINi} + q_{MAXi})/2$, а диапазон регулирования – $\Delta q_{si} = (q_{MAXi} - q_{MINi})/2$.

Для определения наклона этой зависимости, задаваемого коэффициентом Kp_i , необходимо отказаться от строгой модели термостабилизации ($T_{si} = \text{Const}$) и допустить ограниченное отклонение стабилизируемой температуры от заданного уровня ($T_{si} \pm \Delta T_{si}$), тогда $Kp_i = \Delta q_{si} / \Delta T_{si}$.

После определения параметров термобалансировочной характеристики могут быть рассчитаны зависимости температуры узлов децентрализованной системы от времени. Для этого

применяется система уравнений (3), в которой тепловыделение узлов, совмещенных с саморегулируемыми нагревателями, заменяются выражениями (6).

В предложенной модели необходимо отметить следующие уточнения. Во-первых, реальные колебания температуры узлов системы будут меньше ΔT_{si} , из-за тепловой инерционности (теплоёмкости узлов). Во-вторых, очевидно, что физические ограничения на повышение температурного углового коэффициента Kp отсутствуют вплоть до применения П-регулятора СНЭ в «релейном» режиме. Поэтому для обоснованного выбора коэффициента Kp и максимального тепловыделения СНЭ: $q_{max} = q_s + \Delta q_s$ необходимо учитывать свойства узла, как объекта управления, с учетом динамики процесса управления П-регулятором. От этого непосредственно зависит точность термостабилизации.

Экспериментальные характеристики децентрализованной системы термостабилизации

На основании изложенных выше схематических и теоретических положений был изготовлен экспериментальный образец СНЭ, внешний вид которого показан на рис. 3.



Рис. 3. Экспериментальный образец СНЭ

Этот образец является реальным прототипом СНЭ космического исполнения. В его состав входят только высоконадёжные комплектующие с устойчивостью к радиационным воздействиям и вакууму космического пространства.

В общем случае децентрализованная система термостабилизации должна включать набор СНЭ, установленных в тепловых узлах. В процессе термостабилизации объекта каждый СНЭ должен компенсировать неравномерные внешние тепловые потоки на соответствующий

тепловой узел. При этом надо учитывать, что СНЭ влияют друг на друга.

Для опытной оценки характеристик такой системы был проведён специальный эксперимент. Основной его задачей было определение возможности поддержания заданной температуры многоэлементной конструкции с помощью децентрализованной системы при воздействии индивидуальных переменных тепловых потоков на каждый элемент конструкции и при наличии теплового влияния элементов друг на друга.

Таким объектом регулирования в эксперименте являлась изображенная на рис. 4 конструкция, названная термостабилизируемым тепловым макетом (ТТМ).



Рис. 4. Общий вид ТТМ: 1, 2, 3 – радиаторы; 1а, 2а, 3а – СНЭ

Макет ТТМ изготовлен из цельного листа меди толщиной 1,3 мм, что позволяет исключить контактные термические сопротивления при расчёте параметров кондуктивных связей между его элементами. ТТМ состоит из трёх плоских квадратных граней размером 150x150 мм каждая. Две крайних грани отогнуты под прямым углом от центральной, как показано на рис. 9. Центральная грань имеет тепловую связь с двумя соседними, с одной стороны непосредственную по всей кромке, с другой – через перемычку шириной 10 и длиной 20 мм. Внешняя поверхность граней покрыта эмалью ЭКОМ-2 с известными термооптическими характеристиками. На внутренней стороне каждой грани установлен СНЭ. Над СНЭ уложена экрано-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ), изолирующая внутренние поверхности граней от излучения друг на друга, а также от внешних тепловых потоков.

Для эксперимента требовалось воспроизведение тарированных переменных внешних потоков в условиях вакуума индивидуально на каждую грань ТТМ. Для этого макет помещался на теплоизолирующих подвесах в термовакуумную установку ТВУ-0.2 как показано на рис. 5.

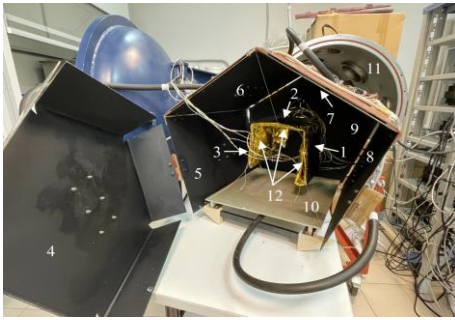


Рис. 5. Экспериментальная установка с объектом исследования: 1–3 – радиаторы ТТМ; 4–10 – Имитатор тепловых потоков (4–9 – охлаждаемые панели; 10 – охлаждаемая посадочная плита); 11 – вакуумная камера, в которую помещается имитатор тепловых потоков; 12 – ЭВТИ на внутренней поверхности ТТМ

Данная установка подробно описана в работе [4]. Она включает вакуумную камеру с системой вакуумирования и имитатор тепловых потоков (ИТП), установленный внутри вакуумной камеры.

Имитатор тепловых потоков состоит из шести тепловых панелей и посадочной плиты, теплоизолированных друг от друга и от стенок вакуумной камеры, и охлаждаемых термоэлектрическими модулями (Пельтье). Температура каждой панели регулируется независимо автоматически в соответствии с заданным профилем. Поверхность панелей, ориентированная во внутренний объём камеры, покрыта чёрной эмалью ЭКОМ-2, имеющей степень черноты близкую к 0.9. Между панелями и стенками камеры установлена однослойная стеклотекстолитовая теплоизоляция. Такая система позволяет охлаждать панели и плиту до температуры около «минус» 30 °С.

Эксперимент состоял из трёх этапов. На первом этапе для каждого СНЭ была снята термобалансировочная характеристика. Для каждого СНЭ она имела некоторый разброс, обусловленный допусками параметров электронных компонентов (в соответствии с рис. 6).

Второй этап состоял в воздействии заданной циклограммы переменных внешних тепловых условий на ТТМ с выключенными СНЭ. Для реализации этой циклограммы был разработан программно-аппаратный комплекс на базе компьютера с реализацией модифицированного алгоритма ПИД регулирования [5]. Такой комплекс позволяет выполнять заданную циклограмму изменения температуры панелей ИТП по показаниям установленных на них датчиков температуры.

Третий этап заключался в воздействии такой же циклограммы на ТТМ с включёнными СНЭ. Циклограмма изменения температуры панелей ИТП была сформирована таким образом, чтобы определить возможность стабилизации температуры с помощью СНЭ связанных тепловым образом граней ТТМ при существенно различающихся тепловых воздействиях на разные грани. Продолжительность циклограммы теплового воздействия на ТТМ на втором этапе составляла 5 ч 53 мин, на третьем этапе – 6 ч 48 мин. Циклограмма изменения температуры панелей ИТП на втором и третьем этапе эксперимента представлена на рис. 7.

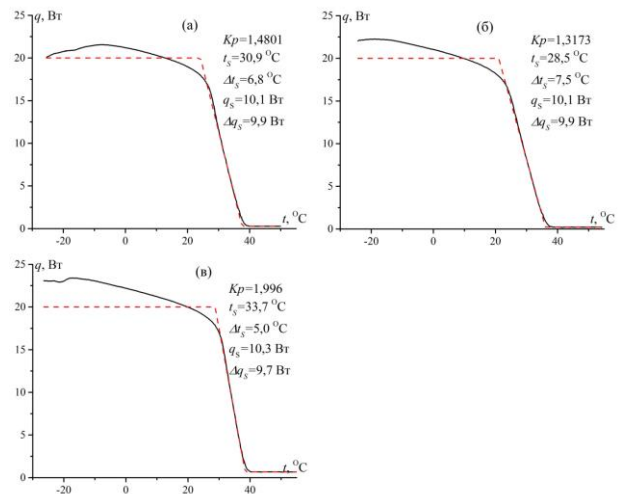


Рис. 6. Параметры термобалансировочных характеристик СНЭ в ТТМ: (а) – СНЭ №1, (б) – СНЭ №2, (в) – СНЭ №3. Нумерация СНЭ соответствует рис. 5

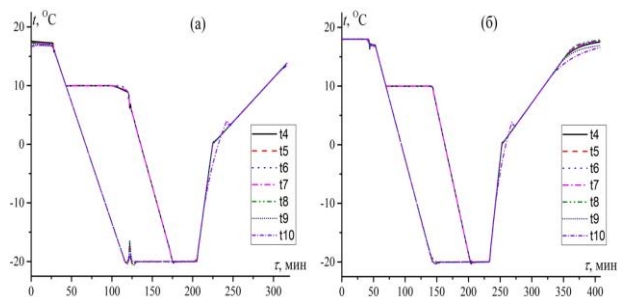


Рис. 7. Изменения температуры панелей ИТП в процессе второго (а) и третьего (б) этапа эксперимента. Нумерация панелей соответствует рис. 5

Для использования системы уравнений (3) при обработке результатов второго и третьего этапов эксперимента должен быть определён поглощённый гранями ТТМ тепловой поток – $Ea(\tau)_i$.

Опыт эксплуатации данной установки показывает, что этот поток хорошо описывается следующим выражением:

$$Ea(\tau)_i = \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot \sum_{j=1}^7 \varphi_{F_i-F_j}'' \cdot \varepsilon_j'' \cdot (T^*(\tau)_j + \Delta T_j'')^4. \quad (8)$$

в котором $\varphi_{F_i-F_j}''$ – угловой коэффициент поверхности внешнего теплообмена i -того узла ТТМ относительно j -той панели ИТП, T_j , ΔT_j – измеренная температура и отклонение эффективной радиационной температуры j -той панели ИТП от измеренной (температурная невязка), возникающая из-за неравномерности температуры по поверхности охлаждаемых панелей ИТП.

Величины $\Delta T_j \approx 10.4$ К определены на основании решения обратной тепловой задачи с использованием данных, полученных на втором этапе эксперимента в качестве исходных данных. Подробно данная методика описана в статье [6]. Значения угловых коэффициентов $\varphi_{F_i-F_j}''$ представлены в табл. 1.

Таблица 1. Значения угловых коэффициентов (нумерация панелей ИТП (F''₄–F''₁₀)) в соответствии с рис. 5)

i	$\varphi_{F_i-F_4}''$	$\varphi_{F_i-F_5}''$	$\varphi_{F_i-F_6}''$	$\varphi_{F_i-F_7}''$	$\varphi_{F_i-F_8}''$	$\varphi_{F_i-F_9}''$	$\varphi_{F_i-F_{10}}''$
1	0.065474	0	0.24994	0.50671	0.042786	0.090077	
2	0.055821	0	0.49869	0.38159	0	0.035142	0
3	0.03975	0.63187	0.2224	0	0	0.02464	0.03981

Результаты 2-го и 3-го этапов эксперимента представлены на рис. 8.

Для наглядности графики, соответствующие изменению параметров на одном этапе расположены в одном столбце друг под другом. Графики, относящиеся ко второму этапу, представлены в а), в), д); к третьему в б), г), е).

Анализ полученных результатов показывает, что предлагаемая схема СНЭ выполняет функцию стабилизации температуры конструкции ТТМ при изменении внешних тепловых условий.

Так, при изменении плотности поглощённого гранями теплового потока от 343 до 193 Вт/м² (см. рис. 8 – а) и при отключённых СНЭ на этапе 2 (см. рис. 8 – д) температура граней ТТМ изменялась от 18° С до –17°С (см. рис. 8 – в). При включённых СНЭ на этапе 3 в аналогичных внешних тепловых условиях температура граней была стабилизирована для каждой на уровне: 35.1±1.3 °С; 33.0±1.3 °С; 35.0±1.4 °С (см. рис. 8 – г). Саморегулирование теплового потока этих СНЭ

осуществлялось в диапазонах от 2.8 до 7.0 Вт; от 1.4 до 5.32 Вт; от 3.36 до 7.28 Вт (см. рис.8 – е).

Некоторое различие средних температур и тепловых потоков объясняется разбросом параметров электрических элементов, используемых в СНЭ. Данный фактор показывает, что для получения точной термостабилизации конструкции с помощью СНЭ требуется предварительная настройка на этапе изготовления.

Эксперимент также показал, что набор СНЭ способен успешно термостабилизировать многоэлементную тепловую систему с разноуровневыми внутренними тепловыми связями при неодинаковых переменных тепловых условиях, воздействующих на разные элементы системы.

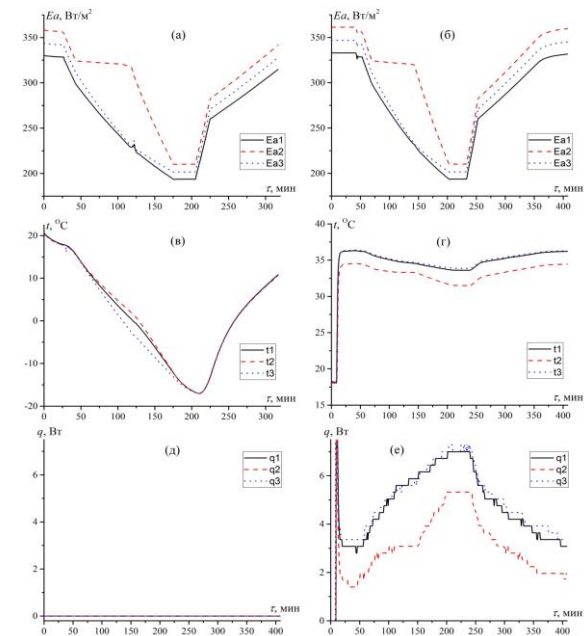


Рис. 8. Результаты второго и третьего этапов эксперимента: (а), (б) – плотность поглощённого гранями ТТМ теплового потока на втором и третьем этапах эксперимента; (в), (г) – температура граней ТТМ – на втором и третьем этапах эксперимента; (д), (е) – тепловой поток, генерируемый СНЭ, установленными на гранях ТТМ на втором и третьем этапах эксперимента

Математическая интерпретация результатов эксперимента

Для обоснования корректности предлагаемой математической модели, было проведено моделирование теплового состояния ТТМ, находящегося в условиях, воспроизводимых в процессе эксперимента и сравнение результатов эксперимента и расчёта.

При планировании эксперимента для обеспечения максимально возможной сравнимости экс-

периментальных и расчётных данных была разработана такая конфигурация ТТМ, которая может быть описана простой и предельно достоверной узловой тепловой моделью. Ее достоверность обеспечивается тем, что для расчёта всех её параметров имеются однозначные классические расчётные формулы. Это достигается за счёт изготовления всех граней-радиаторов из единой медной плиты, что обеспечивает отсутствие недостоверных параметров контактных тепловых сопротивлений; использовании для граней покрытия с паспортизованными термооптическими характеристиками; исключения из модели наименее достоверно определяемого радиационного теплообмена между гранями ТТМ за счёт его устранения с помощью ЭВТИ.

В результате узловая модель ТТМ включает три тепловых узла, в состав каждого из которых входит грань-радиатор и установленный на ней СНЭ. Центральный узел имеет кондуктивные связи с двумя крайними. Структура и ненулевые параметры узловой тепловой модели ТТМ представлены на рис. 9.

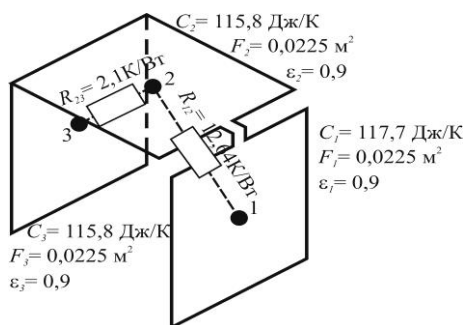


Рис. 9. Узловая тепловая модель ТТМ

Равномерность температуры по радиатору обеспечивается его малыми размерами и высокой теплопроводностью меди. Кондуктивные тепловые сопротивления однозначно определяются исходя из геометрических характеристик прямоугольных медных теплопроводов между центрами радиаторов. Теплоёмкость узлов также однозначно определяется массой и материалом радиаторов и СНЭ.

Результаты математического моделирования теплового состояния ТТМ при внешних тепловых условиях, соответствующих условию проведения эксперимента (см. рис. 10 – а, б) при отключенных СНЭ представлены на рис. 10 – а, в; при включенных СНЭ – на рис. 10 – б, г.

Сравнение результатов расчёта (см. рис. 10) с аналогичными результатами эксперимента (в соответствии с рис. 8 – е) демонстрирует достаточно хорошее совпадение. Количественные показатели этого сравнения представлены в табл. 2 (из сравнения исключён первый пятиминутный участок, на котором проявлялись сильные флуктуации потока и резкое возрастание температуры).

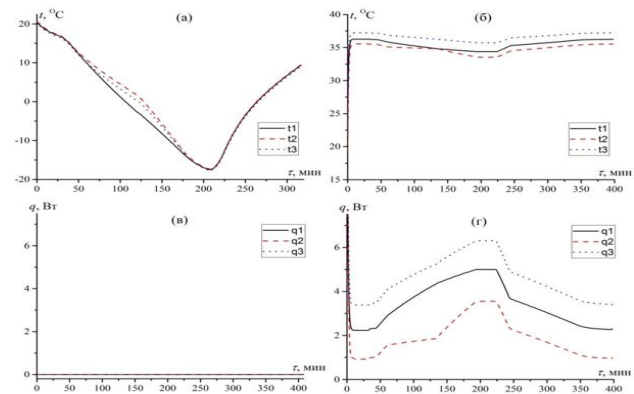


Рис. 10. Результаты математического моделирования теплового состояния ТТМ при внешних условиях, соответствующих условиям проведения эксперимента: (а), (б) – расчётная температура граней ТТМ при отключённых и включённых СНЭ; (в), (г) – тепловой поток, генерируемый СНЭ, установленными на гранях ТТМ на отключённых и включённых СНЭ

Таблица 2. Сравнение экспериментальных и расчетных значений

Параметр	Ед. изм.	Модуль отклонения расчетных значений от экспериментальных	
		Средн.	Макс.
При отключенных СНЭ:			
Температура грани 1	°C	1.022	2.004
Температура грани 2	°C	1.011	1.842
Температура грани 3	°C	1.404	2.431
При включенных СНЭ:			
Температура грани 1	°C	0.361	1.02
Температура грани 2	°C	1.514	2.333
Температура грани 3	°C	1.368	2.06

Качественно расчётные зависимости полностью соответствуют экспериментальным. Имеющееся незначимое количественное отклонение вызвано отклонением упрощённых моделей термобалансных характеристик СНЭ от реальных. Точность расчёта можно повысить за счёт усложнения этих моделей. Однако такое усложнение вряд ли целесообразно с учётом того, что реальные диапазоны термостабилизации близки к точности упрощённого расчета.

Экспериментальное подтверждение корректности математической модели позволяет ис-

пользовать ее для исследования влияния параметров СНЭ на точность стабилизации. Единственным параметром, который может иметь такое влияние, является температурный угловой коэффициент Kp , поскольку параметры t_s , Δt_s , q_s , Δq_s , определяют только температурный и энергетический диапазоны, в которых работает СНЭ.

Объектом расчётного исследования являлся ТТМ, в СНЭ которого температурные угловые коэффициенты Kp менялись от 0.65 до 9. При этом рассчитывалась средняя температура радиаторов ТТМ – t_{mid} (уровень стабилизации температуры) и текущее отклонение от уровня стабилизации $\Delta t(\tau) = |t_{mid} - t(\tau)|$. Точность стабилизации определялась как максимальное отклонение от среднего уровня стабилизации: $\Delta t_{max} = \pm \max(\Delta t(\tau))$ (см. рис. 11). Результаты исследования оказались несколько неожиданными. При изменении Kp менялась не только точность стабилизации температуры Δt_{max} , но и уровень, на котором температура стабилизируется t_{mid} . При этом точность стабилизации температуры Δt_{max} тем выше, а уровень ее стабилизации t_{mid} тем ближе к температурной уставке t_s , чем выше значение Kp . Например, при $Kp = 4$ стабилизируемая температура выше температурной уставки на ~ 1.83 °С, а точность стабилизации составляет $\Delta t_{max} \approx \pm 0.35$ °С. При $Kp = 10$ эти параметры составляют $(t_{mid} - t_s) \approx 0.7$ °С., $\Delta t_{max} \approx \pm 0.15$ °С.

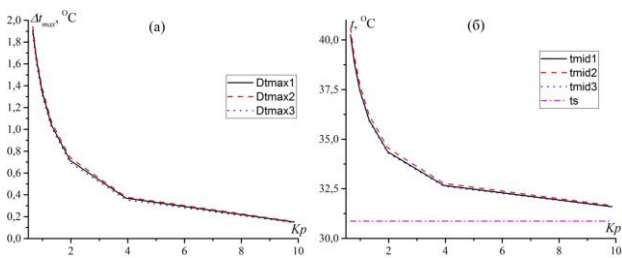


Рис. 11. Результаты расчетного исследования влияния параметра Kp на точность стабилизации температуры Δt_{max} (а) и на среднюю температуру стабилизации t_{mid} (б)

Дальнейший анализ показал, что отклонение средней температуры стабилизации граней ТТМ t_{mid} от тепловой уставки t_s объясняется некорректным выбором параметров q_{si} . Использование методики, представленной после уравнения (7), позволяет обеспечить равенство $t_{mid} \approx t_s$, даже при малых значениях Kp .

Таким образом, для уменьшения диапазона Δt_{max} отклонения температуры узла от ее сред-

него значения t_{mid} необходимо использовать СНЭ с высокими значениями коэффициента Kp . Однако увеличение его приводит к уменьшению рабочего температурного диапазона $\pm \Delta t_s$ (см. (2)), что повышает требование к точности предварительного теплового расчёта системы. Поэтому при больших значениях коэффициента Kp целесообразно увеличить максимальную мощность СНЭ q_{max} , что расширит рабочий температурный диапазон в сторону увеличения температуры. При этом термобалансировочная характеристика СНЭ утратит симметрию относительно t_s и q_s : $i(\tau) \in [t_s - \Delta t_s' \dots t_s + \Delta t_s'']$ и $q(\tau) \in [q_s - \Delta q_s'' \dots q_s + \Delta q_s']$, где $\Delta t_s' \gg \Delta t_s''$ и $\Delta q_s' \gg \Delta q_s''$. Другим нежелательным последствием повышения коэффициента Kp и увеличения мощности СНЭ является появление и усиление колебаний температуры регулируемого объекта, что является неотъемлемым эффектом работы П-регулятора.

Заключение

В системах обеспечения теплового режима космических аппаратов предлагается использовать децентрализованную систему термостабилизации на базе саморегулируемых нагревательных элементов. Такой элемент основан на взаимодействии двух транзисторов, один из которых выполняет функцию измерителя температуры, а другой нагревателя. Сочетание электрической и тепловой связи между ними обеспечивает обратную пропорциональность тепловыделения транзистора-нагревателя от температуры транзистора-измерителя в ограниченном температурном диапазоне. Размещение таких элементов в тех местах космического аппарата, стабилизация температуры которых критически важна, позволяет создать надёжную распределённую систему термостабилизации, которая, в отличие от централизованной системы, не подвержена критическому отказу из-за выхода из строя одного или нескольких элементов.

Была создана математическая модель подобной многоэлементной системы и проведён эксперимент с системой, содержащей три связанных объекта, термостабилизируемых саморегулируемыми нагревательными элементами. Эти объекты имели неодинаковые взаимные тепловые связи и находились под воздействием разных переменных тепловых потоков.

Данный эксперимент, во-первых, показал, что предложенная система термостабилизации способна стабилизировать температуру сложного многоэлементного объекта при воздействии на его элементы неодинаковых переменных внешних тепловых условий, а, во-вторых, подтвердил корректность математической модели, предлагаемой для распределённой системы термостабилизации.

Экспериментально проверенная математическая модель позволила провести численное исследование зависимости точности стабилизации температуры объекта с помощью саморегулируемых нагревательных элементов от их параметров. Данное исследование показало, что чем выше температурный угловой коэффициент саморегулируемого нагревательного элемента, тем более высокое качество термостабилизации с помощью него обеспечивается. Одновременно с этим целесообразно повышать максимальную мощность нагрева СНЭ, что позволит расширить рабочий температурный диапазон СНЭ.

При этом, конечно, необходимо учитывать характеристики самого объекта терморегулирования, с точки зрения устойчивости системы регулирования, чтобы, с одной стороны, минимизировать колебательный процесс П-регулятора, а с другой стороны обеспечить необходимую реакцию и запас устойчивости системы.

Список источников

1. **Семена Н.П.** Значимость тепловых режимов астрофизических приборов для решения задач внеатмосферной астрономии // *Космические исследования*. 2018. Т. 56. No 4. С. 311–326. URL: <https://doi.org/10.31857/S002342060000349-1>.
2. **Astrom K., Hagglund T.** PID Controllers: Theory, Design and Tuning. Instrument Society of America. Research Triangle Park, North Carolina. 1995. 343 P.
3. **Козлов Л. В., Нусинов М. Д., Акишин А. И.** Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / под редакцией Академика Г.И. Петрова. Москва: Машиностроение, 1971. 380 с.

4. **Семена Н.П., Сербинов Д.В.** Математическая интерпретация теплового эксперимента, имитирующего условия космического пространства // *Тепловые Процессы в Технике*. 2016. Т. 8. No 9. С. 423–431.
5. **Денисенко В.В.** ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // *Современные Технологии Автоматизации*. 2006. No 4. С. 66.
6. **Semena N.P., Dobrolenskiy Yu.S., Serbinov D.V., Vyazovetskiy N.A., Martynovich F.G.** Thermal Conductivity of Multilayer Insulation in the Martian Atmosphere. *Instruments and Experimental Techniques*. 2024. V. 67. No. 1. P. 132. <https://doi.org/10.1134/S0020441224700258>.

References

1. **Semena N.P.** The Importance of Thermal Modes of Astrophysical Instruments in Solving Problems of Extra-Atmospheric Astronomy. *Cosmic Research*, 2018, vol. 56, no. 4, pp. 293–305. URL: <https://doi.org/10.1134/S0010952518040032>.
2. **Astrom K., Hagglund T.** PID Controllers: Theory, Design and Tuning. Instrument Society of America. Research Triangle Park, North Carolina, 1995, 343 P.
3. **Kozlov L. V., Nusinov M. D., Akishin A. I.** Modelirovanie teplovykh rezhimov kosmicheskogo apparata i okruzhayushchei ego sredy [Modeling of thermal conditions of a spacecraft and its environment]. Moskva, Mashinostroenie Publ., 1971, 380 p.
4. **Semena N.P., Serbinov D.V.** Matematicheskaya interpretatsiya teplovogo ehksperimenta, imitiruyushchego usloviya kosmicheskogo prostranstva [Mathematical interpretation of a thermal experiment simulating cosmic space conditions]. *Teplovye Protsessy v Tekhnike* [Thermal Processing In Engineering], 2016, vol. 8. no 9, pp. 423–431.
5. **Denisenko V.V.** PID-regulyatory: printsipy postroeniya i modifikatsii [PID-controllers: principles of construction and modification]. *Sovremennye Tekhnologii Avtomatizatsii* [STA Modern Automation Technologies], 2006, vol. 4, pp. 66–74.
6. **Semena N.P., Dobrolenskiy Yu.S., Serbinov D.V., Vyazovetskiy N.A., Martynovich F.G.** Thermal Conductivity of Multilayer Insulation in the Martian Atmosphere. *Instruments and Experimental Techniques*, 2024, vol. 67, no. 1, pp. 132–142, URL: <https://doi.org/10.1134/S0020441224700258>.