

Научная статья
УДК 536.2.083
DOI: 10.34759/vst-2022-3-111-121

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ СРЕДНЕИНТЕГРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ В АКСИАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ

Никита Олегович Борщев

Физический институт им. С.А. Лебедева Российской академии наук (ФИАН),
Москва, Россия
www.moriarty93@mail.ru

Аннотация. При проектировании облика космического аппарата параллельно проектируется его система обеспечения теплового режима (СОТР). В статье рассматривается предложенный метод идентификации среднеинтегрального коэффициента теплоотдачи теплоносителя от аксиальной тепловой трубы (АТТ) к фитилю как функции от температуры. Цель аксиальных тепловых труб — отведение тепловой энергии от тепловыделяющего оборудования и перераспределение его по поверхности радиатора в обеспечение штатного функционирования целевой бортовой аппаратуры космического аппарата (КА). Таким образом, получение аналитической зависимости коэффициента теплоотдачи как функции от эксплуатационных температур является актуальной задачей в проектировании системы обеспечения теплового режима КА.

Ключевые слова: аксиальная тепловая труба, космический аппарат, свободная конвекция, системы теплового режима, коэффициентная обратная задача, метод итерационной регуляризации

Для цитирования: Борщев Н.О. Параметрическая идентификация среднеинтегрального коэффициента теплоотдачи в аксиальных тепловых трубах // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 3. С. 111-121. DOI: 10.34759/vst-2022-3-111-121

Original article

MEAN-INTEGRAL HEAT TRANSFER COEFFICIENT PARAMETRIC IDENTIFICATION IN COAXIAL HEAT PIPES

Nikita O. Borshchev

Leading Engineer of the Aerospace Center S.A. Lebedeva,
Moscow, Russia
www.moriarty93@mail.ru

Abstract

The article proposes a method for reconstructing the average integral heat transfer coefficient as a function of temperature for axial heat pipes. This method is based on the studied parameter representation in the form of its parameterized value, multiplied by the corresponding basis function that describes its dependence on the temperature. Linear-continuous function was selected as the basis one. Further, with the selected initial approximation of the heat transfer coefficient parameter, the “direct” problem of the theoretical temperature field determining is being solved under known initial-boundary conditions and thermo-physical properties of the material. Based on the flight thermal elaboration of the axial tube, the root-mean-square deviation between the theoretical and experimental temperature field at the sites of temperature sensors installation is being composed. The obtained functional is being minimized by the conjugate directions method, with preliminary selection of the descent step. The descent step is being selected from the condition of the residual functional minimum at all iterations, starting from the second one. Likewise, one of the most important tasks prior to minimization is finding the gradient component of this functional. For this purpose, the statement of the “direct” problem of heating the pipe is being solved again with a preliminary differentiation of this statement of the problem by the parameterized value of the heat transfer coefficient. The sum of errors, namely systematic, statement of the research problem, rounding and the set problem solving method, was selected as the iteration process termination criterion. Reaching the termination criterion assumes that the searched for parameterized value is found, otherwise the above described routine should be repeated again. To check the adequacy of the developed method, the obtained result was compared to the method for the heat transfer coefficient determining from the thermal resistances analysis based on the experimental temperature field. Analysis of relative errors shows good convergence in the case of this coefficient averaging over time with its experimental counterpart, otherwise, a greater number of considered time blocks and a more accurate thermal model of an axial heat pipe are required.

Keywords: axial heat pipe, spacecraft, natural convection, thermal mode systems, coefficient inverse problem, iterative regularization method

For citation: Borshchev N.O. Mean-Integral Heat Transfer Coefficient Parametric Identification in Coaxial Heat Pipes. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 111-121. DOI: 10.34759/vst-2022-3-111-121

Введение

При проектировании системы обеспечения теплового режима (СОТР) космических аппаратов зачастую применяются аксиальные тепловые трубы, устанавливаемые на радиаторах-излучателях. В настоящее время изучение тепловых процессов в аксиальных тепловых трубах отражено в работах [1–4]. Классический подход к определению коэффициента теплоотдачи базируется на решении критериального уравнения через коэффициенты подобия [5], а также на выводе коэффициента теплоотдачи из анализа полного термического сопротивления, получаемого экспериментальным путем [6–16].

Решение задачи

Первым шагом к решению задачи восстановления падающего на радиатор-излучатель теплового потока необходимо решить «прямую» задачу прогрева тепловой трубы (ТТ) при известном внешнем тепловом воздействии. Принципиальная схема аксиальной тепловой трубы представлена на рис. 1 и 2.

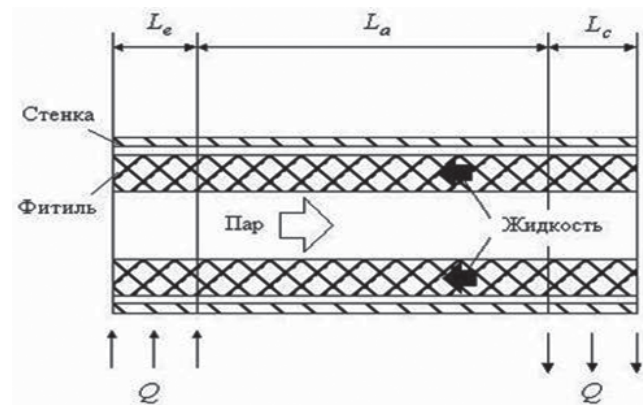


Рис. 1. Схема аксиальной тепловой трубы

По длине тепловой трубы можно выделить испарительный, адиабатический и конденсаторный участки, имеющие соответственно длины L_e , L_a , L_c . Испарительный участок ТТ связан с элементом конструкции или оборудования, от которого отводится тепло. При подведении теплового потока Q часть рабочей жидкости, заполняющей фитиль, испаряется и за счет разности давлений пара в испарителе и конденсаторе

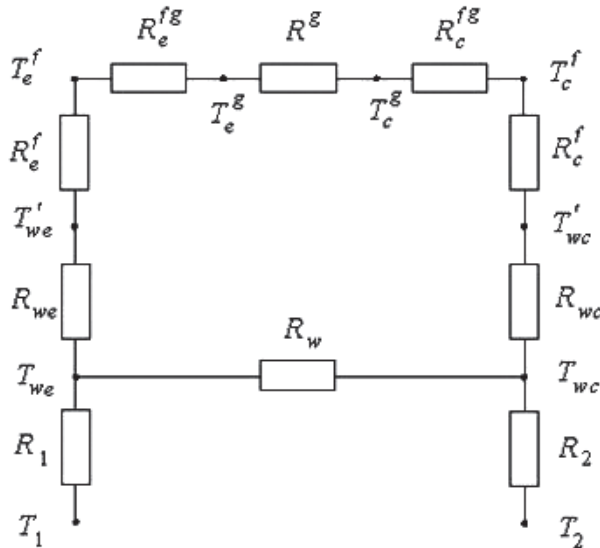


Рис. 2. Схема тепловой физико-математической модели

переносится в конденсатор. Участок конденсации связан с элементом конструкции, температура которого ниже температуры участка испарения и которому передается тепловой поток Q от конденсирующейся рабочей жидкости. На рис. 2 приведена тепловая схема ТТ. От нагретого до температуры T_1 элемента конструкции тепло переносится к наружной поверхности стенки испарительного участка, имеющего температуру T_{we} . Термическое сопротивление контакта R_1 . Далее часть теплового потока проходит к внутренней поверхности стенки испарителя, имеющего сопротивление R_{we} и температуру T_{we}^t , и через фитиль (сопротивление R_e^f) в зону испарения, а часть переносится вдоль стенки ТТ к участку конденсации (сопротивление R_w). С поверхности фитиля, имеющей температуру T_e^f , испаряется рабочая жидкость. Сопротивление фазового перехода R_e^{fg} . Далее пар переносит тепло в зону конденсации. Пар имеет температуры в зоне испарения и конденсации T_e^g и T_c^g соответственно, сопротивление транспортного участка R_g . В зоне конденсации тепло передается фитилю и затем через фитиль, стенку и контакт переходит к элементу конструкции с температурой T_2 . Цепочка термических сопротивлений на этом участке: R_c^{fg} , R_c^f , R_{wc} , R_2 .

Постановка задачи аналогична постановке задачи идентификации теплового потока.

Представим зависимость от температуры среднеинтегрального коэффициента теплоотдачи от фитиля к теплоносителю при аппроксима-

ции линейно-непрерывными базисными функциями в следующем виде [17–20]:

$$\alpha_{Bv}(T) \approx \sum_{m=1}^M \alpha_p N_m(T),$$

где

$$N_m(T) = \begin{cases} 0, & T < T_{m-1}; \\ \frac{T - T_{m-1}}{T_m - T_{m-1}}, & T_{m-1} \leq T \leq T_m; \\ \frac{T_{m+1} - T}{T_{m+1} - T_m}, & T_{m-1} \leq T \leq T_m; \\ 0, & T > T_m, \quad m = \overline{1, M}. \end{cases}$$

Тогда система изотермических узлов примет вид

$$\frac{\partial T_{re}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{C(T_{re}(\tau))\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + \frac{\delta}{\lambda h}} \left[(T_{re}(\tau) - T_{we}(\tau)) + \sum_{m=1}^M \alpha_p N_m(T) (T_{re}(\tau) - T_{rc}(\tau)) + q_r - \eta \varepsilon \sigma T_{re}(\tau)^4 \right] \right];$$

$$T_{re}(0) = T_0.$$

Для зоны испарения

$$\frac{\partial T_{we}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{C(T_{we}(\tau))\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + R_{con} + R_{ev} + R_{vap} + R_{gr}} \right] \times$$

$$\times [T_{wc}(\tau) - T_{we}(\tau)] + \frac{1}{C(T_{we}(\tau))\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + \frac{\delta}{\lambda h}} \right] \times$$

$$\times [T_{rc}(\tau) - T_{wc}(\tau)] + \frac{N}{C(T_{we}(\tau))\rho};$$

$$T_{we}(0) = T_0.$$

Для зоны конденсации

$$\frac{\partial T_{wc}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{C(T_{wc}(\tau))\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + R_{con} + R_{vap} + R_{gr}} \right] \times$$

$$\times [T_{we}(\tau) - T_{wc}(\tau)] + \frac{1}{C(T_{wc}(\tau))\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + \frac{\delta}{\lambda h}} \right] \times$$

$$\times [T_{wc}(\tau) - T_{rc}(\tau)];$$

$$T_{wc}(0) = T_0.$$

Для радиатора-конденсатора

$$\frac{\partial T_{rc}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{C\rho} \left[\frac{1}{R_{con} + \frac{\delta}{\lambda h}} \left[T_{rc}(\tau) - T_{wc}(\tau) \right] + \sum_{m=1}^M \alpha_p N_m(T) (T_{rc}(\tau) - T_{re}(\tau)) + q_r - \eta \epsilon \sigma T_{rc}(\tau)^4 \right];$$

$$T_{rc}(0) = T_0.$$

Данная система обыкновенных дифференциальных уравнений решается также методом Кутты 4-го порядка.

Сопряженная задача для поиска коэффициентов чувствительности материала будет, соответственно, иметь вид

$$\frac{\partial^2 T_{re}(\tau)}{\partial \tau \partial \alpha_p} = \frac{1}{C(T_{re}(\tau))\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + \frac{\delta}{\lambda h}} \left(\frac{\partial T_{re}(\tau)}{\partial \alpha_p} - \frac{\partial T_{we}(\tau)}{\partial \alpha_p} \right) + \sum_{m=1}^M \alpha_p N_m(T) \left(\frac{\partial T_{re}(\tau)}{\partial \alpha_p} - \frac{\partial T_{rc}(\tau)}{\partial \alpha_p} \right) + \sum_{m=1}^M N_m(T) (T_{re}(\tau) - T_{rc}(\tau)) + \sum_{m=1}^M \alpha_p \frac{\partial N_m(T)}{\partial T_{re}} \frac{\partial T_{re}(\tau)}{\partial \alpha_p} (T_{re}(\tau) - T_{rc}(\tau)) + q_r - 4\eta \epsilon \sigma T_{re}(\tau)^4 \frac{\partial T_{re}(\tau)}{\partial \alpha_p} \right];$$

$$\frac{\partial T_{re}(0)}{\partial \alpha_p} = 0.$$

Для зоны испарения

$$\frac{\partial^2 T_{we}(\tau)}{\partial \tau \partial \alpha_p} = \frac{1}{C(T_{we})\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + R_{con} + R_{ev} + R_{vap} + R_{gr}} \right] \times \left[\frac{\partial T_{wc}(\tau)}{\partial \alpha_p} - \frac{\partial T_{we}(\tau)}{\partial \alpha_p} \right] + \frac{1}{C(T_{we})\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + \frac{\delta}{\lambda h}} \right] \times \left(\frac{\partial T_{rc}(\tau)}{\partial \alpha_p} - \frac{\partial T_{we}(\tau)}{\partial \alpha_p} \right) + \frac{N}{C(T_{we})\rho};$$

$$\frac{\partial T_{we}(0)}{\partial \alpha_p} = 0.$$

Для зоны конденсации

$$\frac{\partial^2 T_{wc}(\tau)}{\partial \tau \partial \alpha_p} = \frac{1}{C(T_{we})\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + R_{con} + R_{vap} + R_{gr}} \right] \times \left[\frac{\partial T_{we}(\tau)}{\partial \alpha_p} - \frac{\partial T_{wc}(\tau)}{\partial \alpha_p} \right] + \frac{1}{C(T_{we})\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + \frac{\delta}{\lambda h}} \right] \left[\frac{\partial T_{wc}(\tau)}{\partial \alpha_p} - \frac{\partial T_{rc}(\tau)}{\partial \alpha_p} \right];$$

$$T_{wc}(0) = T_0.$$

Для радиатора-конденсатора

$$\frac{\partial^2 T_{rc}(\tau)}{\partial \tau \partial \alpha_p} = \frac{1}{C(T_{rc}(\tau))\rho} \left[\frac{1}{R_{con} + \frac{\delta}{\lambda h}} \right] \left[\frac{\partial T_{rc}(\tau)}{\partial \alpha_p} - \frac{\partial T_{wc}(\tau)}{\partial \alpha_p} \right] + \sum_{m=1}^M \alpha_p N_m(T) \left(\frac{\partial T_{re}(\tau)}{\partial \alpha_p} - \frac{\partial T_{rc}(\tau)}{\partial \alpha_p} \right) + \sum_{m=1}^M N_m(T) (T_{re}(\tau) - T_{rc}(\tau)) + \sum_{m=1}^M \alpha_p \frac{\partial N_m(T)}{\partial T_{re}} \frac{\partial T_{re}(\tau)}{\partial \alpha_p} (T_{rc}(\tau) - T_{re}(\tau)) + q_r - 4\eta \epsilon \sigma T_{re}(\tau)^4 \frac{\partial T_{re}(\tau)}{\partial \alpha_p};$$

$$\frac{\partial T_{rc}(0)}{\partial \alpha_p} = 0.$$

Алгоритм метода сопряженных направлений по восстановлению параметрического значения коэффициента теплоотдачи будет иметь вид

$$\alpha_p^{n+1} = \alpha_p^n + \Delta \alpha_p^{n+1},$$

где

$$\Delta \alpha_p^{n+1} = -\beta_k p^{(n)}.$$

Направление спуска определяется из выражений

$$\vec{p}^n = \text{grad}S(\alpha_p^n) + \beta_n \vec{p}^{n-1};$$

$$\beta_0 = 0, \quad p^{(0)} = \text{grad}S(\alpha_p^n);$$

$$\beta_n = \frac{|\text{grad}S(\alpha_p^n)|^2}{|\text{grad}S(\alpha_p^{n-1})|^2}.$$

Критерием останова итерационного процесса является выражение

$$\left| \text{grad}S(\alpha_p^{(0)}) \right| = \sqrt{\sum_{p=1}^3 \left[\frac{\partial S(\alpha_p^n)}{\partial \alpha_p} \right]^2} \leq \delta_{sum}.$$

Выражение для оценки глубины спуска в направлении антиградиента целевого функционала при решении задачи методом итерационной регуляризации будет иметь вид [7, 8]

$$\alpha^s = \int_0^{\tau_{max}} \left[T(\alpha_p, \tau) - \bar{T} \right] \frac{\alpha_0}{\Delta T(\alpha_p, \tau)} d\tau.$$

Для нахождения вариационного температурного поля возмутим параметрическую величину коэффициента теплоотдачи материала, на малую долю изменится соответствующее температурное поле. Возмущенная система уравнений тепловых балансов:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{re}(\tau) + \Delta T_{re}(\tau)}{\partial \tau} &= \frac{1}{C(T_{re}(\tau))\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + \frac{\delta}{\lambda h}} \right] \times \\ &\times [T_{re}(\tau) + \Delta T_{re}(\tau) - T_{we}(\tau) + \Delta T_{we}(\tau)] + \\ &+ (1 + \Delta) \sum_{m=1}^M \alpha_p \left[N_m(T) + \frac{\partial N_m(T_{re}(\tau))}{\partial T_{re}(\tau)} \Delta T_{re}(\tau) \right] \times \\ &\times [(T_{re}(\tau) + \Delta T_{re}(\tau) - T_{rc}(\tau) + \Delta T_{rc}(\tau)) + \\ &+ q_r - (\eta \epsilon \sigma T_{re}(\tau)^4 + 4\eta \epsilon \sigma T_{re}(\tau)^3 \Delta T_{re}(\tau))]; \end{aligned}$$

$$T_{re}(0) + \Delta T_{re}(0) = T_0.$$

Для зоны испарения

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{we}(\tau)}{\partial \tau} &= \frac{1}{C(T_{we})\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + R_{con} + R_{ev} + R_{vap} + R_{gr}} \right] \times \\ &\times [T_{wc}(\tau) + \Delta T_{wc}(\tau) - T_{we}(\tau) + \Delta T_{we}(\tau)] + \\ &+ \frac{1}{C(T_{we})\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + \frac{\delta}{\lambda h}} \right] [T_{rc}(\tau) + \Delta T_{rc}(\tau) - T_{wc}(\tau) + \\ &+ \Delta T_{wc}(\tau)] + \frac{N}{C(T_{we})\rho}; \end{aligned}$$

$$T_{we}(0) + \Delta T_{we}(0) = T_0.$$

Для зоны конденсации

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{wc}(\tau)}{\partial \tau} &= \frac{1}{C(T_{we})\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + R_{con} + R_{vap} + R_{gr}} \right] \times \\ &\times [T_{we}(\tau) + \Delta T_{we}(\tau) - T_{wc}(\tau) + \Delta T_{wc}(\tau)] + \\ &+ \frac{1}{C(T_{we})\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + \frac{\delta}{\lambda h}} \right] [T_{wc}(\tau) - T_{rc}(\tau)]; \end{aligned}$$

$$T_{wc}(0) + \Delta T_{wc}(0) = T_0.$$

Для радиатора-конденсатора

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{rc}(\tau) + \Delta T_{rc}(\tau)}{\partial \tau} &= \frac{1}{C\rho} \left[\frac{1}{R_{con} + \frac{\delta}{\lambda h}} \right] \times \\ &\times [(T_{rc}(\tau) + \Delta T_{rc}(\tau) - T_{wc}(\tau) + \Delta T_{wc}(\tau)) + (1 + \Delta) \times \\ &\times \sum_{m=1}^M \alpha_p \sum_{m=1}^M \alpha_p \left[N_m(T) + \frac{\partial N_m(T_{re}(\tau))}{\partial T_{re}(\tau)} \Delta T_{re}(\tau) \right] \times \\ &\times (T_{rc}(\tau) - T_{re}(\tau)) + q_r - \\ &- (\eta \epsilon \sigma T_{rc}(\tau)^4 + 4\eta \epsilon \sigma T_{rc}(\tau)^3 \Delta T_{rc}(\tau))]; \end{aligned}$$

$$T_{rc}(0) + \Delta T_{rc}(0) = T_0.$$

Теперь вычтем из возмущенной системы уравнений невозмущенную и получим систему вариационных изотермических узлов при отбросе членов второго порядка малости:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta T_{re}(\tau)}{\partial \tau} &= \frac{1}{C(T_{re}(\tau))\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + \frac{\delta}{\lambda h}} \right] \times \\ &\times \left[[\Delta T_{re}(\tau) - \Delta T_{we}(\tau)] + \sum_{m=1}^M \alpha_p \frac{\partial N_m(T_{re}(\tau))}{\partial T_{re}(\tau)} \Delta T_{re}(\tau) \right] \times \\ &\times (T_{re}(\tau) - T_{rc}(\tau)) \sum_{m=1}^M \alpha_p N_m(T) (\Delta T_{re}(\tau) - \Delta T_{rc}(\tau)) + \\ &+ q_r - 4\eta \epsilon \sigma T_{re}(\tau)^3 \Delta T_{re}(\tau); \end{aligned}$$

$$\Delta T_{re}(0) = 0.$$

Для зоны испарения

$$\frac{\partial T_{we}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{C(T_{we})\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + R_{con} + R_{ev} + R_{vap} + R_{gr}} \right] \times$$

$$\begin{aligned} & \times \left[\Delta T_{wc}(\tau) - \Delta T_{we}(\tau) \right] + \frac{1}{C(T_{we})\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + \frac{\delta}{\lambda h}} \right] \times \\ & \times \left[\Delta T_{rc}(\tau) - \Delta T_{wc}(\tau) \right] + \frac{N}{C(T_{we})\rho}; \\ & \Delta T_{we}(0) = 0. \end{aligned}$$

Для зоны конденсации

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{wc}(\tau)}{\partial \tau} &= \frac{1}{C(T_{we})\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + R_{con} + R_{vap} + R_{gr}} \right] \times \\ & \times \left[\Delta T_{we}(\tau) - \Delta T_{wc}(\tau) \right] + \\ & + \frac{1}{C(T_{we})\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + \frac{\delta}{\lambda h}} \right] \left[\Delta T_{wc}(\tau) - \Delta T_{rc}(\tau) \right]; \\ & \Delta T_{wc}(0) = 0. \end{aligned}$$

Для радиатора-конденсатора

$$\begin{aligned} & \frac{\partial T_{rc}(\tau) + \Delta T_{rc}(\tau)}{\partial \tau} = \\ & = \frac{1}{C(T_{rc}(\tau))\rho} \left[\frac{1}{R_{con} + \frac{\delta}{\lambda h}} \right] \left[\Delta T_{rc}(\tau) - \Delta T_{wc}(\tau) \right] + \\ & + \sum_{m=1}^M \alpha_p \frac{\partial N_m(T_{rc}(\tau))}{\partial T_{rc}(\tau)} \Delta T_{rc}(\tau) (T_{rc}(\tau) - T_{re}(\tau)) + \\ & + \sum_{m=1}^M \alpha_p N_m(T) (\Delta T_{rc}(\tau) - \Delta T_{re}(\tau)) + q_r - \\ & - \left(\eta \epsilon \sigma T_{rc}(\tau)^4 + 4 \eta \epsilon \sigma T_{rc}(\tau)^3 \Delta T_{rc}(\tau) \right); \\ & \Delta T_{rc}(0) = 0. \end{aligned}$$

Данная система уравнений также решается методом Кутта 4-го порядка.

В качестве рабочего тела в ТТ используется аммиак особой чистоты. Диапазон рабочих температур аммиака от -70 до +60 °С. Диапазон рабочих давлений от 0,5 до 20 кгс/см². Плотность теплового потока в зоне испарения не более 5·10⁴ Вт/м². Плотность теплового потока в зоне конденсации от 0,1 до 1 Вт/см².

Подвод тепла к тепловому элементу (ТЭ) обеспечивается за счет шести поверхностных электронагревателей, установленных на полках в испарительной зоне ТТ. Мощность каждой секции ЭН 25±1 Вт при напряжении питания посто-

янного тока U = 27±1 В. Отвод тепла от конденсационной зоны ТТ обеспечивается излучением с радиационной поверхности ТЭ.

Длина испарительной зоны ТТ не превышает 250 мм. Длина конденсационной зоны ТТ не превышает 1250 мм.

На полках испарительной и конденсационной зон ТТ установлены датчики температуры (рис. 3).

Экспериментальная летная тепловая обработка АТТ при известной циклограмме тепловыделений для первых двух термодпар целевого оборудования и параметров орбиты представлена на рис. 4.

Теперь рассмотрим полученные результаты идентификации среднеинтегрального коэффициента теплоотдачи как функции от температуры стенки фитиля. Промежуточные результаты по изменению температурного поля, нерегуляризуемой невязки и коэффициента теплоотдачи в зависимости от номера итерации в каждом временном блоке представлены на рис. 5—7.

Результаты изменения среднеинтегрального коэффициента теплоотдачи по поверхности АТТ, полученные в результате решения коэффициентной обратной задачи теплопроводности (ОЗТ) и на основе методики пересчета через полное термическое сопротивление конструкции представлены на рис. 8.

Интерес представляют относительные погрешности расчета данной задачи, определяемые по формуле

$$\delta = \left| \frac{\alpha_R - \alpha(\text{ОЗТ})}{\alpha_R} \right|.$$

Изменение относительной погрешности расчета в зависимости от температуры наглядно представлено на рис. 9.

Выводы

Если сравнить значения коэффициента теплоотдачи, полученные по двум рассмотренным методикам, то видно, что относительные погрешности расчета высокие, однако осредненные во времени коэффициенты теплоотдачи будут примерно равны. Высокие относительные погрешности расчета объясняются неточностью модели расчета, неоднозначностью зависимости коэффициента теплоотдачи от температуры, погрешностью метода решения задачи и другими факторами.

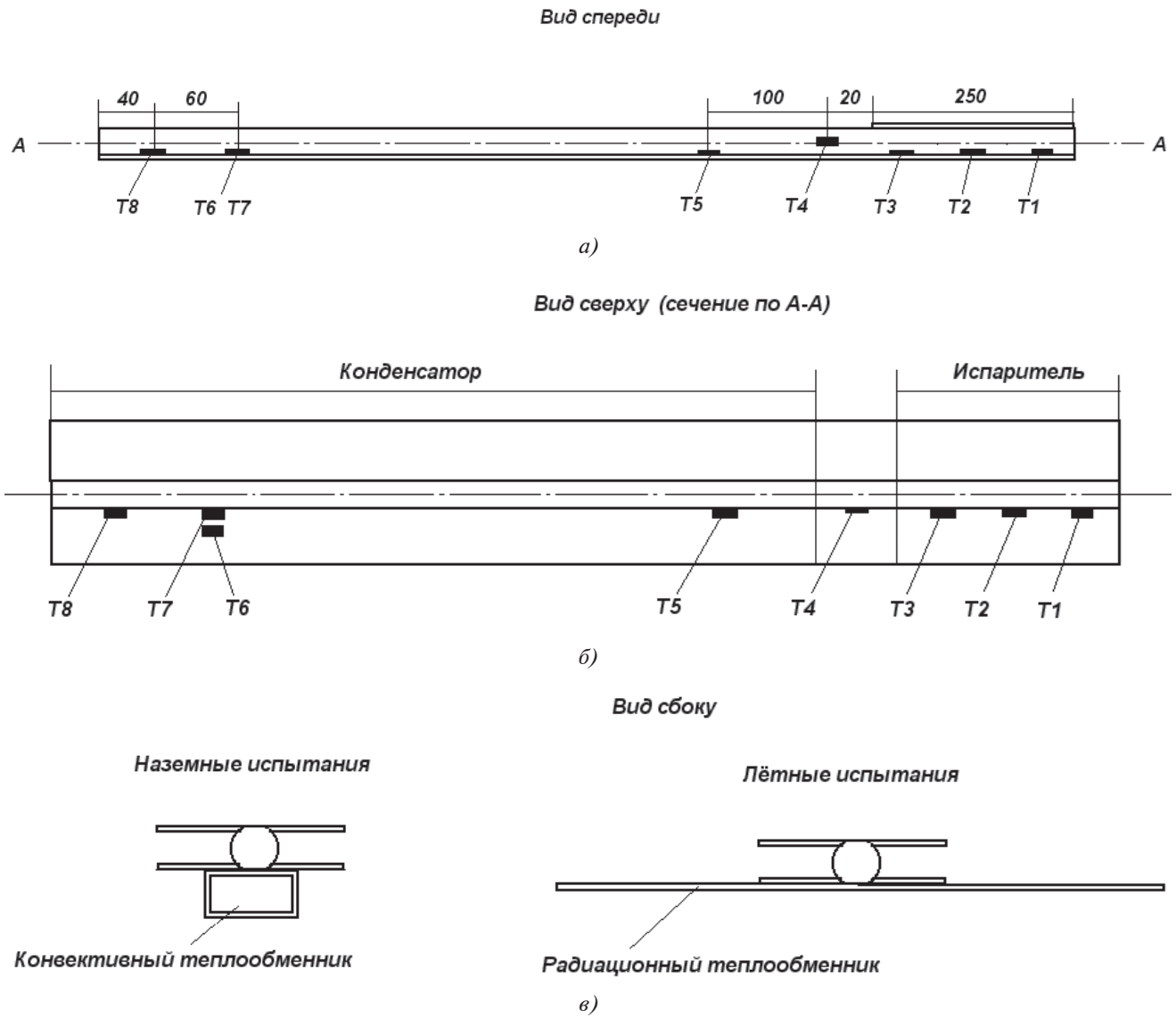


Рис. 3. Вид аксиальной тепловой трубы: а — спереди; б — сверху; в — сбоку

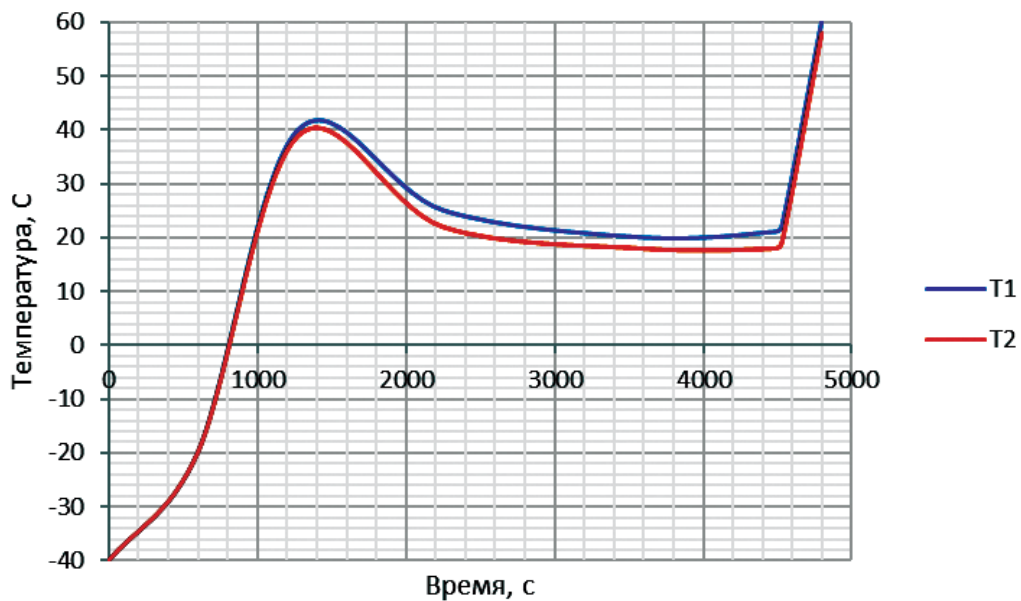


Рис. 4. Экспериментальная летная тепловая обработка АТТ

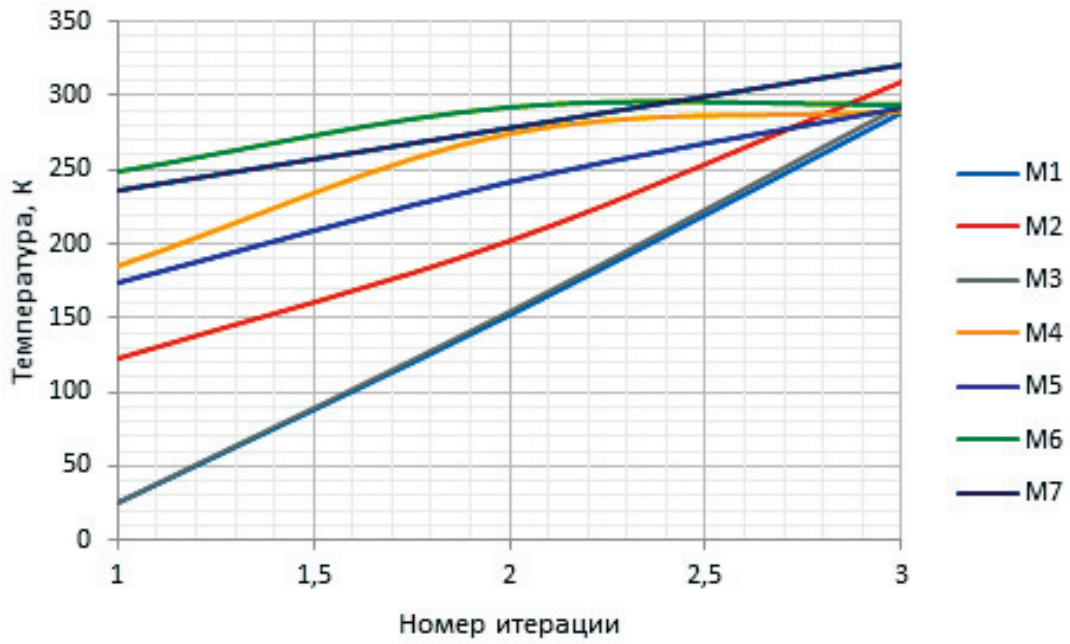


Рис. 5. Изменение температурного теоретического поля в каждом временном блоке в зависимости от номера итерации

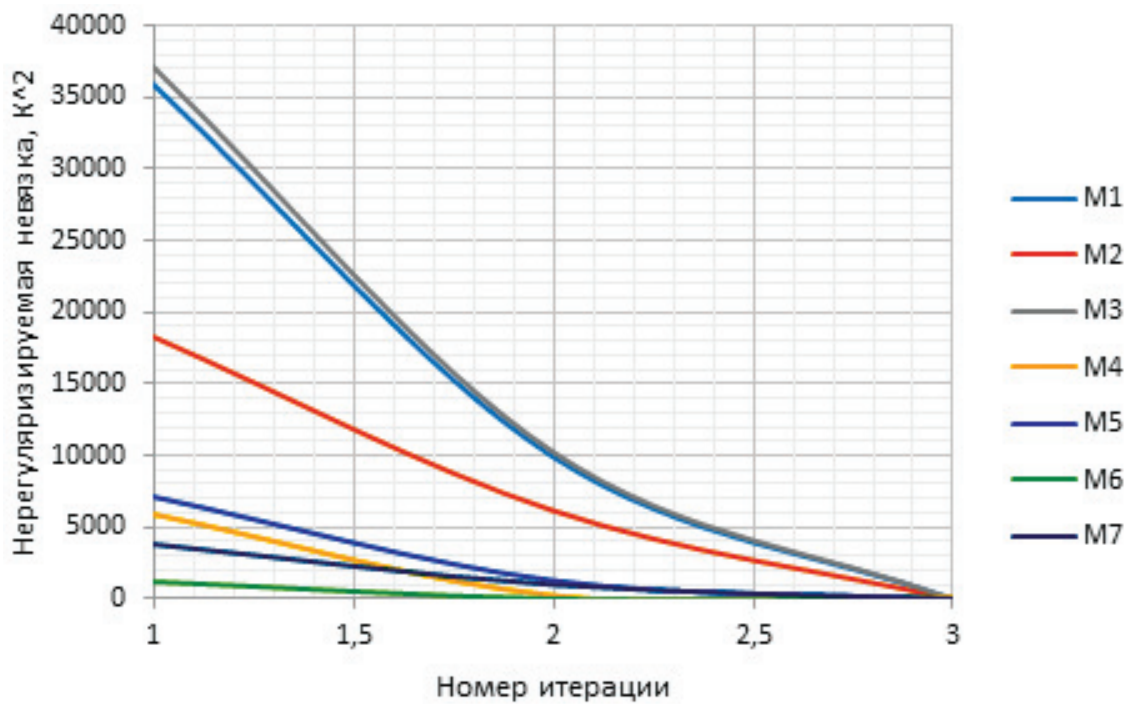


Рис. 6. Изменение нерегуляризуемой невязки в каждом временном блоке в зависимости от номера итерации

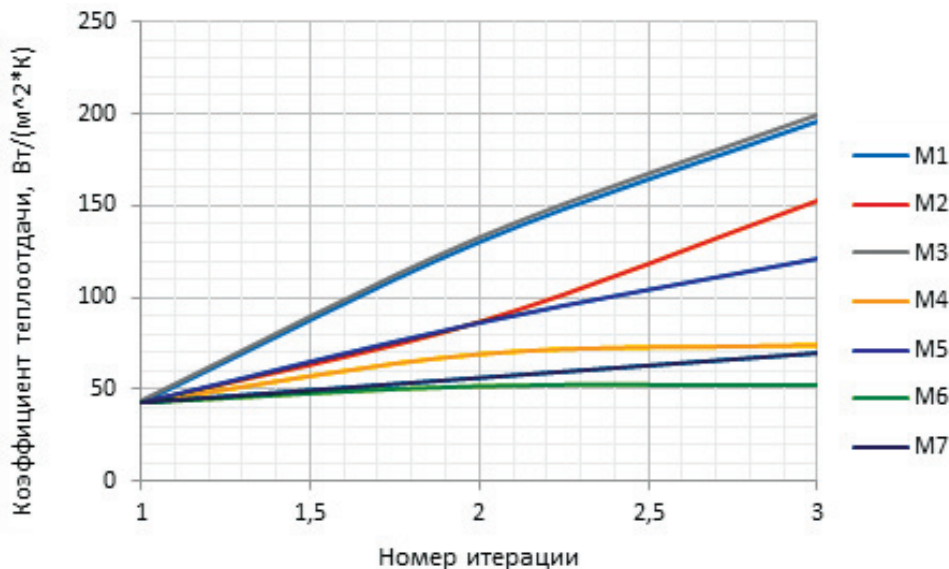


Рис. 7. Изменение коэффициента теплоотдачи в каждом временном блоке в зависимости от номера итерации

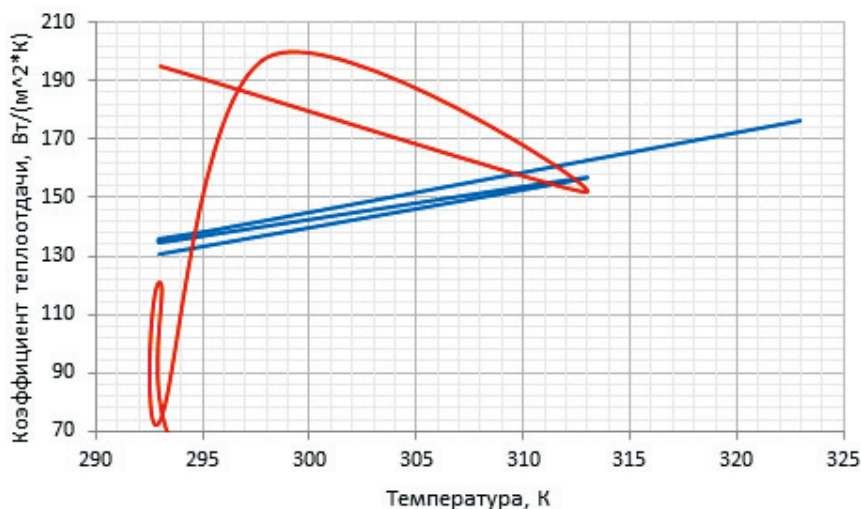


Рис. 8. Изменение коэффициента теплоотдачи в зависимости от температуры, рассчитанные по двум методикам (красная кривая — решение ОЗТ, синяя кривая — на основе полного термического сопротивления)

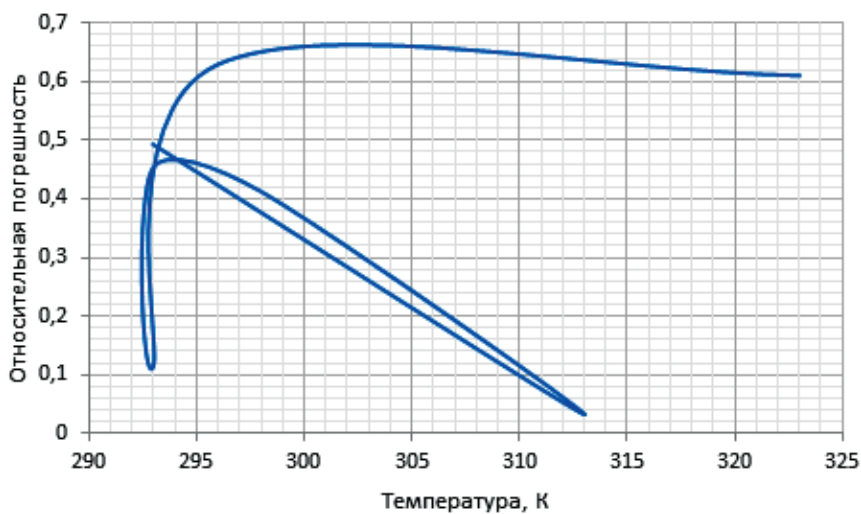


Рис. 9. Изменение относительной погрешности расчета в зависимости от температуры

Список источников

- Maidanik Yu.F., Fershtater Yu.G. Theoretical Basis and Classification of Loop Heat Pipes and Capillary Pumped Loops // 10th International Heat Pipe Conference (21–25 September 1997; Stuttgart, Germany).
- Kotlyarov E.Y., Serov G.P. Methods of Increase of the Evaporators Reliability for Loop Heat Pipes and Capillary Pumped Loops // 24th International Conference on Environmental Systems, Society of Automotive Engineers, 1994. Paper 941578.
- Вершинин С.В., Майданик Ю.Ф. Гибкие миниатюрные контурные тепловые трубы // Тепловые процессы в технике. 2012. № 12. С. 559–565.
- Zalmanovich S, Goncharov K. Radiators with LHP // International conference “Heat Pipes for Space Application” (15–18 September 2009; Moscow).
- Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М.О. Штейнберга. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1992. — 671 с.
- Альтов В.В., Гуля В.М., Копяткевич Р.М. и др. Тепловое проектирование и пофрагментная наземная обработка системы обеспечения теплового режима космического аппарата негерметичного исполнения на базе сотопанелей с тепловыми трубами // Космонавтика и ракетостроение. 2010. № 3(60). С. 33-41.
- Панин Ю.В., Антонов В.А., Балыкин М.А. К вопросу проектирования и эксплуатации ТТ в составе СТР посадочных модулей межпланетных станций для исследования тел солнечной системы // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2021. № 4(54). С. 31-38. DOI: 10.26162/LS.2021.54.4.005
- Гакал П.Г., Рузайкин В.И., Турна Р.Ю. и др. Экспериментальный стенд для исследования теплогидравлических процессов в системе терморегулирования телекоммуникационного спутника // Авиационно-космическая техника и технология. 2011. № 5(82). С. 21-30.
- Никонов А.А., Горбенко Г.А., Блинков В.Н. Теплообменные контуры с двухфазным теплоносителем для систем терморегулирования космических аппаратов. — М.: ЦНТИ «Поиск». Серия «Ракетно-космическая техника», 1991. — 302 с.
- Володин Ю.Г., Федоров К.С., Яковлев М.В. Коэффициент теплоотдачи в пусковом режиме энергетической установки // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2007. № 1. С. 26-28.
- Зудин Ю.Б. Влияния теплофизических свойств стенки на коэффициент теплоотдачи // Теплоэнергетика. 1998. № 3. С. 31-33.
- Князев В.А., Никулин К.С. Эффективный коэффициент теплоотдачи в плоских щелях с неоднородным обогревом // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2016. № 1. С. 56-64.
- Игнатъев С.А. Влияние параметров процессов охлаждения на коэффициент теплоотдачи при термопластичном упрочнении // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2009. № 2. С. 27-30.
- Минаков А.В., Гузей Д.В., Жигарев В.А. Турбулентная вынужденная конвекция наножидкостей в круглом канале // Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. 2015. Т. 157. № 3. С. 85-96.
- Аминов Д.М., Хафизов Ф.М. Экспериментальная оценка теплоотдачи инфракрасного нагревательного элемента // Инновационная наука. 2016. № 8-2. С. 16-18.
- Алифанов О.М., Иванов Н.А., Колесников В.А. Методика и алгоритм определения температурных зависимостей теплофизических характеристик анизотропных материалов из решения обратной задачи // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 5. С. 14-20.
- Алифанов О.М. Решение задачи нестационарной теплопроводности и её применение для исследования теплозащитных материалов // Исследование нестационарного конвективного тепло- и массообмена: Сб. статей. Минск: Наука и техника, 1971. С. 322–333.
- Карслоу У., Егер Д. Теплопроводность твердых тел / Пер. со 2-го англ. изд. под ред. проф. А.А. Померанцева. — М.: Наука. 1964. — 487 с.
- Алифанов О.М., Артохин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач и их приложения к обратным задачам теплообмена / С предисл. В. А. Мельникова. — М.: Наука, 1988. — 285 с.
- Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. — М.: Машиностроение, 1988. — 280 с.

References

- Maidanik Yu.F., Fershtater Yu.G. Theoretical Basis and Classification of Loop Heat Pipes and Capillary Pumped Loops. *10th International Heat Pipe Conference (21–25 September 1997; Stuttgart, Germany)*.
- Kotlyarov E.Y., Serov G.P. Methods of Increase of the Evaporators Reliability for Loop Heat Pipes and Capillary Pumped Loops. *24th International Conference on Environmental Systems, Society of Automotive Engineers, 1994. Paper 941578.*
- Vershinin S.V., Maidanik Yu.F. *Teplovye protsessy v tekhnike*, 2012, no. 12, pp. 559–565.
- Zalmanovich S, Goncharov K. Radiators with LHP. *International conference “Heat Pipes for Space Application” (15–18 September 2009; Moscow)*.
- Idel’chik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* (Handbook of hydraulic resistances), 3rd ed., Moscow, Mashinostroenie, 1992, 671 p.
- Al’tov V.V., Gulya V.M., Kopyatkevich R.M. et al. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2010, no. 3(60), pp. 33-41.

7. Panin Yu.V., Antonov V.A., Balykin M.A. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2021, no. 4(54), pp. 31-38. DOI: 10.26162/LS.2021.54.4.005
8. Gakal P.G., Ruzaikin V.I., Turna R.Yu. et al. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2011, no. 5(82), pp. 21-30.
9. Nikonov A.A., Gorbenko G.A., Blinkov V.N., *Teploobmennye kontury s dvukhfaznym teplonositelem dlya sistem termoregulirovaniya kosmicheskikh apparatov* (Heat exchange circuits with a two-phase coolant for spacecraft temperature-control systems), Moscow, Poisk. Series "Rocket and Space technology", 1991, 302 p.
10. Volodin Yu.G., Fedorov K.S., Yakovlev M.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 2007, no. 1, pp. 26-28.
11. Zudin Yu.B. *Teploenergetika*, 1998, no. 3, pp. 31-33.
12. Knyazev V.A., Nikulin K.S. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov*, 2016, no. 1, pp. 56-64.
13. Ignat'ev S.A. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*, 2009, no. 2, pp. 27-30.
14. Minakov A.V., Guzei D.V., Zhigarev V.A. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki*, 2015, vol. 157, no. 3, pp. 85-96.
15. Aminov D.M., Khafizov F.M. *Innovatsionnaya nauka*, 2016, no. 8-2, pp. 16-18.
16. Alifanov O. M., Ivanov N. A., Kolesnikov V. A. Methodology and algorithm determining the temperature dependence of thermal and physical characteristics for anisotropic materials basing on an inverse problem solution. *Aerospace MAI Journal*, 2012, vol. 19, no. 5, pp. 14-20.
17. Alifanov O.M. *Issledovanie nestatsionarnogo konvektivnogo teplo- i massoobmena. Sbornik statei*, Minsk, Nauka i tekhnika, 1971, pp. 322-333.
18. Carslaw H.S., Jaeger J.C. *Conduction of heat in solids*. 2nd Edition, Oxford University Press, 520 p.
19. Alifanov O.M., Artyukhin E.A., Rumyantsev S.V. *Ekstremal'nye metody resheniya nekorrektnykh zadach i ikh prilozheniya k obratnym zadacham teploobmena* (Extreme methods for solving ill-posed problems and their applications to the inverse heat transfer problems), Moscow, Nauka, 1988, 285 p.
20. Alifanov O.M. *Obratnye zadachi teploobmena* (Inverse problems of heat transfer), Moscow, Mashinostroenie, 1988, 280 p.

Статья поступила в редакцию 23.04.2022; одобрена после рецензирования 28.05.2022; принята к публикации 24.06.2022.

The article was submitted on 23.04.2022; approved after reviewing on 28.05.2022; accepted for publication on 24.06.2022.