

Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 3. С. 138–145
Thermal processes in engineering, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 138–145

Научная статья
УДК 536.2.083
DOI: 10.34759/tpt-2023-15-3-138-145

Параметрическая идентификация падающего интегрального удельного теплового потока на аксиальные тепловые трубы методом итерационной регуляризации

Н.О. Борщев¹✉, А.Р. Денискина²

¹ *Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия*

² *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия*

✉ www.moriarty93@mail.ru

Аннотация. Рассматривается метод идентификации удельного падающего теплового потока на элементы аксиальной тепловой трубы, которая является теплоотводящим элементом системы теплового режима космических аппаратов. Данная задача решается методом минимизации среднеквадратичной ошибки с помощью оптимизации алгоритма сопряженных направлений. Регуляризация осуществляется на предположении минимума целевого функционала на следующих итерациях. В качестве регуляризируемого параметра выступает номер итерации. Минимизация осуществляется методом сопряженных направлений до выполнения критерия останова итерационного процесса по поиску искомым величин. Критерием останова является суперпозиция погрешностей: систематической, случайной и др.

Ключевые слова: тепловая труба, лучисто-кондуктивный теплообмен, свободная конвекция, системы теплового режима, обратная задача, регуляризация

Для цитирования. Борщев Н.О., Денискина А.Р. Параметрическая идентификация падающего интегрального удельного теплового потока на аксиальные тепловые трубы методом итерационной регуляризации // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 3. С. 138–145. DOI: 10.34759/tpt-2023-15-3-138-145

Original article

Parametric identification of the incident integral specific heat flux on axial heat pipes by iterative regularization method

N.O. Borshchev¹✉, A.R. Deniskina²

¹ *Federal State Budgetary Institution of Science P.N. Lebedev Institute, Moscow, Russia*

² *Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

✉ www.moriarty93@mail.ru

Annotation. The presented work considers the proposed method for the specific incident heat flux on the axial heat pipe elements identifying, which is heat sink element of the spacecraft thermal mode system. The said problem is being solved by the root-mean-square error minimization method by the conjugate directions method. Iteration number is the regularizable parameter. Minimization is exercised by the conjugate directions

method, until the iteration process stoppage criterion on the sought quantities searching is met. The stoppage criterion is a superposition of errors: systematic, random, etc.

Keywords: heat pipe, radiant-conductive heat transfer, free convection, thermal regime systems, inverse problem, regularization

For citation. Borshchev N.O., Deniskina A.R. Parametric identification of the incident integral specific heat flux on axial heat pipes by iterative regularization method. *Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 138–145. (In Russ.). DOI: 10.34759/tpt-2023-15-3-138-145

Введение

При проектировании теплового режима аксиальных тепловых труб следует учитывать подводимые тепловые мощности для предотвращения пересыхания капиллярно-пористой структуры изделия. Для решения этой задачи требуется рассчитать теплообмен внутри аксиальной тепловой трубы [1–4].

По длине тепловой трубы можно выделить испарительный, адиабатический и конденсаторный участки, имеющие соответственно длины L_e , L_a , и L_c . Испарительный участок ТТ связан с элементом конструкции или оборудования, от которого отводится тепло [5]. За счет подводимого теплового потока Q часть рабочей жидкости, заполняющей фитиль, испаряется. Таким образом, из-за разности давлений пара в испарителе и конденсаторе переносится в конденсатор. Участок конденсации связан с элементом конструкции, температура которого ниже температуры участка испарения. К участку конденсации передается тепловой поток Q от конденсирующейся рабочей жидкости. На рис. 1 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} , с температурой T_{we}^f , 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_f^e , происходит испарение рабочей жидкости [6–9]. 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: $R_c^{fg} - R_c^f - R_w - R_2$.

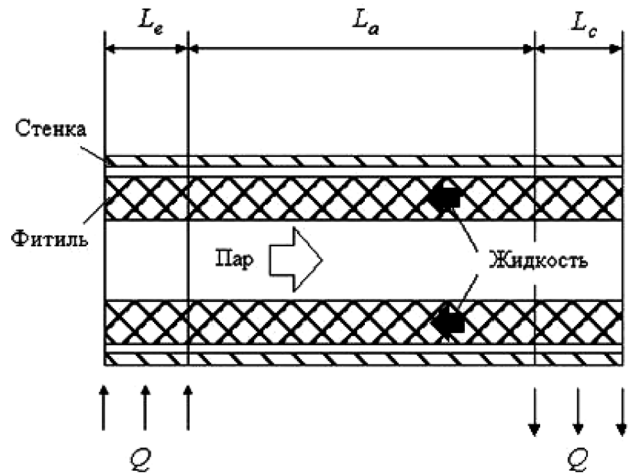


Рис. 1. Схема тепловой трубы

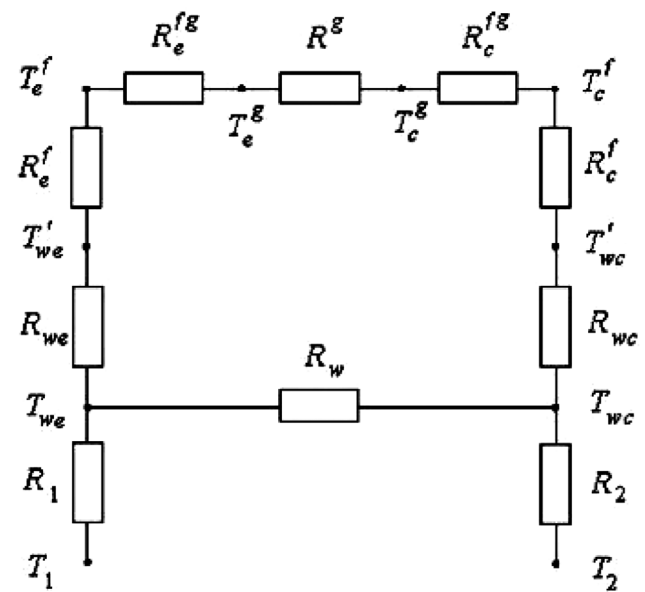


Рис. 2. Схема тепловой физико-математической модели

Таким образом, тепловая физико-математическая модель будет иметь следующий вид:

– для радиатора испарителя

$$\frac{\partial T_{re}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{C\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + \frac{\delta}{\lambda h}} \right] \times$$

$$\times \left[(T_{re}(\tau) - T_{we}(\tau)) + \alpha_{ev}(T_{re}(\tau) - T_{rc}(\tau)) + q_r - \varepsilon \sigma T_{re}(\tau)^4 \right];$$

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

– для зоны испарения

$$\frac{\partial T_{we}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{C(T_{we})\rho} \times$$

$$\times \left[\frac{1}{R_{wev} + R_{con} + R_{ev} + R_{vap} + R_{gr}} \right] \times$$

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

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

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

– для зоны конденсации

$$\frac{\partial T_{wc}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{C(T_{wc})\rho} \times$$

$$\times \left[\frac{1}{R_{wev} + R_{con} + R_{vap} + R_{gr}} \right] \left[T_{we}(\tau) - T_{wc}(\tau) \right] +$$

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

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

– для радиатора-конденсатора:

$$\frac{\partial T_{rc}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{C\rho} \left[\frac{1}{R_{con} + \frac{\delta}{\lambda h}} \right] \times$$

$$\times \left[\left[(T_{rc}(\tau) - T_{wc}(\tau)) + \alpha_{ev}(T_{rc}(\tau) - T_{re}(\tau)) \right] + \right.$$

$$\left. + q_{r-} - \varepsilon \sigma T_{rc}(\tau)^4 \right];$$

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

где

$$R_{we} = R_{wc} = \frac{\ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right)(d_1 + d_2)}{2\lambda(T)};$$

$$R_w = \frac{L_a + \frac{L_e + L_c}{2}}{\lambda(T)};$$

d_1, d_2 – наружный и внутренний диаметры стенки, м.

Сопротивления R_{con} и R_{vap} определяются по эффективной теплопроводности фитиля λ_ϕ . Выражение для определения λ_ϕ имеет следующий вид:

$$\lambda_\phi = \frac{\beta - \varepsilon}{\beta + \varepsilon} \lambda_{ж}(T);$$

$$\beta = \frac{1 + \frac{\lambda_{тв}(T)}{\lambda_{ж}(T)}}{1 - \frac{\lambda_{тв}(T)}{\lambda_{ж}(T)}};$$

$\lambda_{ж}$ – теплопроводность жидкой фазы Вт/мК;

$\lambda_{тв}$ – теплопроводность твердой фазы Вт/мК;

Оценочную формулу для определения оптимальной глубины (шага) спуска в направлении, определяемом методом сопряженных градиентов, можно получить, если воспользоваться известным подходом, основанным на линеаризации зависимости целевой функции от шага спуска в направлении антиградиента, и нахождения минимума этой линеаризованной зависимости [4]. Для реализации такого подхода необходимо решить задачу о приращении поля температур. В данном случае параметру теплового падающего потока в каждом временном блоке по времени дается возмущение, пропорциональное компоненте градиента функционала. Обозначим этот коэффициент пропорциональности через α_0 . Тогда малые возмущения, даваемые обобщенному вектору теплопроводности и объемной теплоемкости при решении задачи о приращении поля температур, определяются следующим выражением:

$$\Delta q_r^m = \alpha_0 L'(\vec{\lambda}).$$

Важным является вопрос о выборе коэффициента α_0 , обеспечивающего малость. Пусть эта малость определяется числом ω , составляющим малую долю от q_r . Тогда, учитывая соотношения, получим:

$$\alpha_0 = \frac{\omega q_r}{L'(q_r)}$$

Чтобы получить оценочную формулу для α^s [6–8], введем в рассмотрение скалярную функцию F аргумента α^s , характеризующую изменение величины целевого функционала $L'(\bar{\lambda})$ в направлении антиградиента в точке q_r :

$$F(\alpha^s) = L(q_r^m - \alpha^s L'(q_r)).$$

Будем считать α^s малой величиной, квадратом и высшими степенями которой можно пренебречь. Тогда, используя разложение функции в ряд Тейлора по степеням $\alpha^s L'(q_r)$ и пренебрегая нелинейными членами в этом разложении, получим:

$$F(\alpha^s) = \int_0^{\tau_{\max}} \left[T(q_r, \tau) + \frac{\partial T(q_r)}{\partial q_r} \alpha^s L'(q_r) - \tilde{T} \right]^2 d\tau.$$

Величины частных производных $\frac{\partial T}{\partial q_r}$ заменим их конечно-разностными аналогами:

$$\frac{\partial T(q_r)}{\partial q_r} = \frac{\Delta T(q_r, \tau)}{\alpha_0 L'(\bar{\lambda}, C)}$$

где ΔT – решение задачи для приращения температуры.

Дифференцируя полученное выражение для $F(\alpha^s)$ по α^s и приравнявая производную к нулю, а также разрешая его относительно α^s , получим следующее выражение для оценки глубины спуска в направлении антиградиента целевого функционала:

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

Для отыскания вариации температурного поля возьмем искомым параметр на бесконечно малую величину Δq_r , и таким же образом возмущаются среднеинтегральные температуры в соответствующих изотермических узлах.

Получим следующую систему возмущенных уравнений тепловых балансов [1,2,6,7]:

– для радиатора испарителя

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

$$+ q_r + \Delta q_r - [\varepsilon \sigma T_{re}(\tau)^4 + 4\varepsilon \sigma T_{re}(\tau)^3 \Delta T_{re}(\tau)];$$

– для зоны испарения

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

– для зоны конденсации

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

– для радиатора-конденсатора

$$\frac{\partial T_{rc}(\tau) + \Delta T_{rc}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{C(T_{rc})\rho} \times \\ \times \left[\frac{1}{R_{con} + \frac{\delta}{\lambda h}} \right] [(T_{rc}(\tau) + \Delta T_{rc}(\tau) - T_{wc}(\tau))] + \\ + q_r + \Delta q_r - \varepsilon \sigma [T_{rc}(\tau)^4 + 4T_{rc}(\tau)^3 \Delta T_{rc}(\tau)].$$

При вычитании из возмущенной системы уравнений тепловых балансов невозмущенной получим систему уравнений относительно вариации температур в соответствующих изотермических узлах [8–12]:

– для радиатора испарителя

$$\frac{\partial \Delta T_{re}(\tau)}{\partial \tau} = +\Delta q_r - 4\varepsilon \sigma T_{re}(\tau)^3 \Delta T_{re}(\tau); \\ \Delta T_{re}(\tau) = 0;$$

– для зоны испарения

$$\frac{\partial \Delta T_{we}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{C(T_{we})\rho} \times$$

$$\times \left[\frac{1}{R_{wev} + R_{con} + R_{ev} + R_{vap} + R_{gr}} \right] \times$$

$$\times [T_{wc}(\tau) + \Delta T_{wc}(\tau) - T_{we}(\tau) + \Delta T_{we}(\tau)] +$$

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

$$\times [(T_{rc}(\tau) + \Delta T_{rc}(\tau) - T_{wc}(\tau) + \Delta T_{wc}(\tau)) +$$

$$+ \frac{N}{C(T_{we})\rho}; \Delta T_{we}(\tau) = 0;$$

– для зоны конденсации

$$\frac{\partial \Delta T_{wc}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{C(T_{wc})\rho} \times$$

$$\times \left[\frac{1}{R_{wev} + R_{con} + R_{vap} + R_{gr}} \right] \Delta T_{we}(\tau);$$

$$\Delta T_{wc}(0) = 0;$$

– для радиатора-конденсатор

$$\frac{\partial \Delta T_{rc}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{C(T_{rc})\rho} \times$$

$$\times \left[\frac{1}{R_{con} + \frac{\delta}{\lambda h}} \right] \Delta T_{rc}(\tau) + \Delta q_r - 4\varepsilon\sigma T_{rc}(\tau)^3 \Delta T_{rc}(\tau);$$

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

Алгоритм метода сопряженных градиентов

В качестве численного метода минимизации целевого функционала применим метод сопряженных градиентов как наиболее точного метода первого порядка точности, позволяющего достичь требуемой сходимости за минимальное число итераций [5–8].

Применительно к рассматриваемой задаче для обобщенного вектора теплопроводности имеем следующий итерационный алгоритм численного решения:

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

где

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

Направление спуска определяется из выражений:

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

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

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

Критерием останова итерационного процесса является выражение

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

Коэффициент чувствительности

Для решения задачи по итерационному уточнению выбранного параметра необходимо найти градиент рассматриваемого функционала, который имеет вид [13]:

$$\text{grad}S(q_r) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M \int_0^{\tau_{max}} [T(q_r^m, \tau) - \tilde{T}] \frac{\partial T(q_r^m, \tau)}{\partial q_r} dt.$$

Компоненты градиента можно найти, просто продифференцировав искомую постановку «прямой» задачи теплообмена по q_r . Получим сопряженную систему дифференциальных уравнений относительно компоненты градиента функционала $\frac{\partial T(q_r, \tau)}{\partial q_r}$.

Для радиатора испарителя:

$$\frac{\partial \dot{T}_{re}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{C\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + \frac{\delta}{\lambda h}} \right] \times$$

$$\times [(\dot{T}_{re}(\tau) - \dot{T}_{we}(\tau)) - 4\varepsilon\sigma T_{re}(\tau)^3 \dot{T}_{re}(\tau) + 1];$$

$$\dot{T}_{re}(0) = 0.$$

Для зоны испарения:

$$\frac{\partial \dot{T}_{we}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{C(T_{we})\rho} \times$$

$$\times \left[\frac{1}{R_{wev} + R_{con} + R_{ev} + R_{vap} + R_{gr}} \right] \times$$

$$\times [\dot{T}_{wc}(\tau) - \dot{T}_{we}(\tau)] + \frac{1}{C(T_{we})\rho} \times$$

$$\times \left[\frac{1}{R_{wev} + \frac{\delta}{\lambda h}} \right] [(\dot{T}_{rc}(\tau) - \dot{T}_{wc}(\tau))] +$$

$$+ \frac{N}{C(T_{we})\rho}; \quad \dot{T}_{we}(0) = 0.$$

Для зоны конденсации

$$\frac{\partial \dot{T}_{wc}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{C(T_{wc})\rho} \times$$

$$\times \left[\frac{1}{R_{wev} + R_{con} + R_{vap} + R_{gr}} \right] [\dot{T}_{we}(\tau) - \dot{T}_{wc}(\tau)] +$$

$$+ \frac{1}{C(T_{wc})\rho} \left[\frac{1}{R_{wev} + \frac{\delta}{\lambda h}} \right] [(\dot{T}_{wc}(\tau) - \dot{T}_{rc}(\tau))];$$

$$\dot{T}_{wc}(0) = 0.$$

Для радиатора-конденсатора:

$$\frac{\partial \dot{T}_{rc}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{C(T_{rc})\rho} \left[\frac{1}{R_{con} + \frac{\delta}{\lambda h}} \right] \times$$

$$\times [(\dot{T}_{rc}(\tau) - \dot{T}_{wc}(\tau)) - 4\epsilon\sigma T_{rc}(\tau)^3 T(\tau) + 1];$$

$$\dot{T}_{rc}(0) = 0.$$

Для демонстрации возможностей данного алгоритма произведена его верификация для аксиальных тепловых труб, установленных на космическом модуле «Прогресс», при заданной ориентации и циклограмме подводимой нагрузки с тепловыделяющего оборудования. Результаты тепловой обработки представлены на рис. 3.

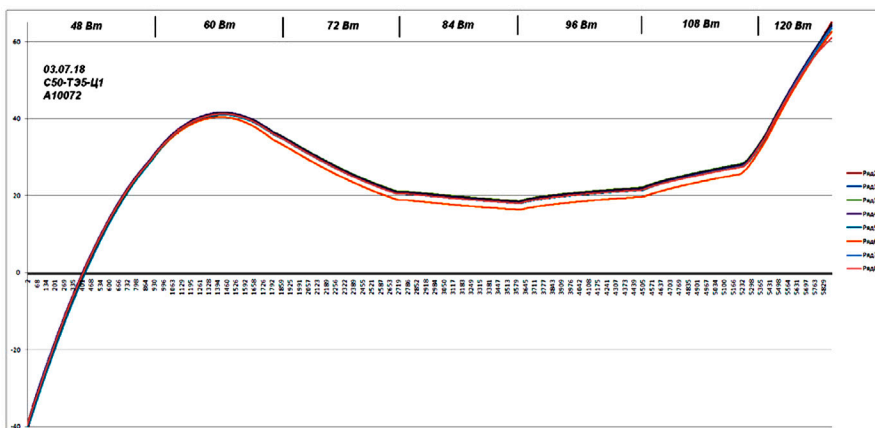


Рис. 3. Результаты тепловой обработки

Результаты изменения итерационного теоретического температурного поля в зоне установки датчиков температур и падающей лучистой тепловой исследуемой нагрузки, а также значение нерегуляризируемого функционала невязки представлены на рис. 4–6.

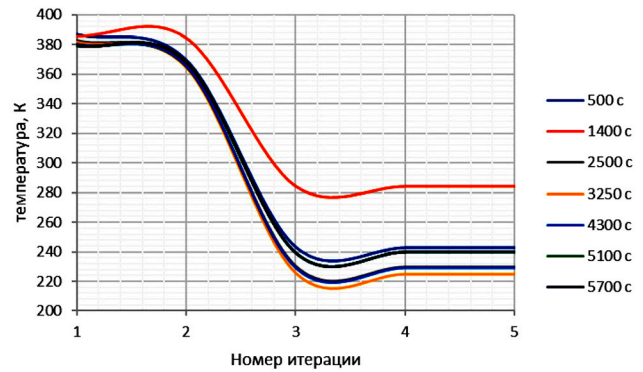


Рис. 4. Зависимость расчетной температуры от номера итерации

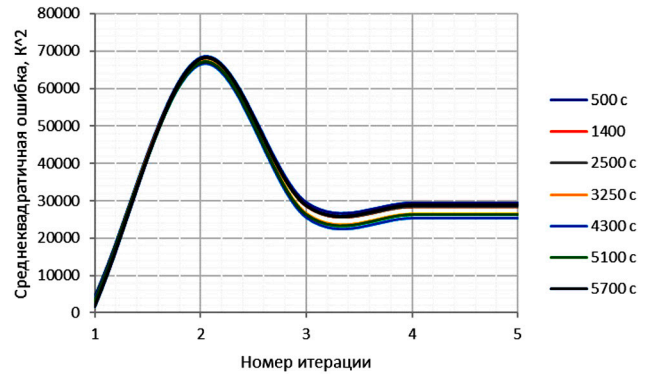


Рис. 5. Зависимость среднеквадратичной ошибки от номера итерации

Расчет интегральной падающей тепловой нагрузки на солнечные батареи для сравнения с идентифицируемым тепловым удельным потоком космического модуля «Прогресс» выполнен с помощью отечественного программного обеспечения Therm [13, 14]. Результаты расчета представлены на рис. 7. Результаты восстановленного теплового удельного потока на тепловую трубу – на рис. 8.

Из рис. 6 видна сходимость интегрального теплового потока от номера итерации. Таким образом, результат представленный на рис. 8 соответствует действительности, что также подтверждается сходимостью среднеквадратичной ошибки.

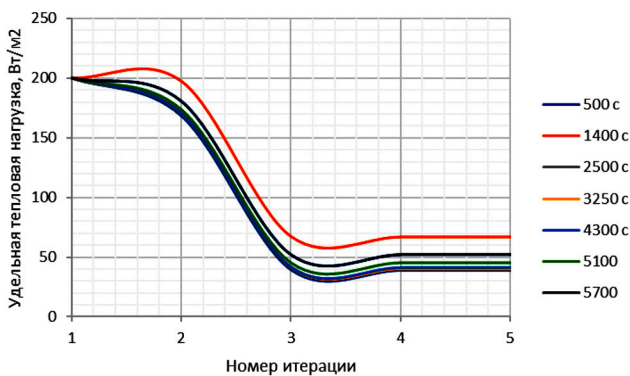


Рис. 6. Зависимость удельного теплового падающего потока от номера итерации

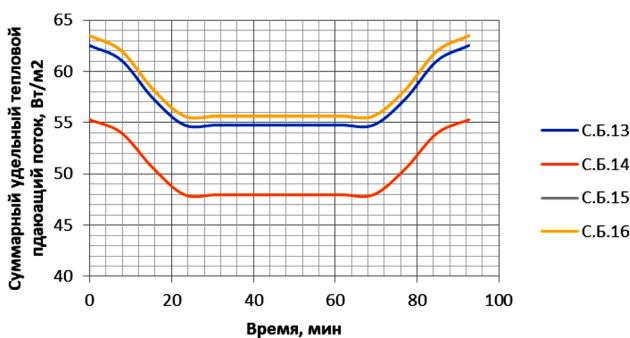


Рис. 7. Зависимость удельного теплового падающего потока от номера итерации

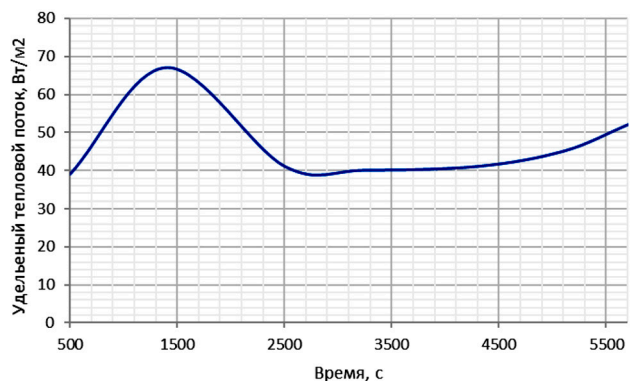


Рис. 8. Расчетное значение восстановленного удельного теплового потока

Заключение

Таким образом, получена методика идентификации падающего интегрального теплового потока, включающая следующую последовательность действий.

1. Решение «прямой» задачи теплопереноса внутри тепловой трубы в интегральном приближении при выбранном начальном приближении вектора теплопроводности.

2. Составление среднеквадратичного регуляризируемого функционала невязки между

теоретическим и экспериментальным полями температур в зонах установки датчиков температур.

3. Выбор регуляризируемого параметра в соответствии с выбранным методом регуляризации.

4. Решение задачи оптимизации по поиску искомой характеристики в каждом временном блоке, в рамках которого тепловой поток постоянен.

5. Сравнение на двух соседних итерациях значений теплового потока

Если значения разницы полученных новых параметризованных характеристик по модулю меньше интегральной погрешности, то считается, что мы попали в точку глобального минимума, в противном случае необходимо повторить действия 1–5 еще раз.

Список источников

1. **Вершинин С.В., Майданик Ю.Ф.** Гибкие миниатюрные контурные тепловые трубы // Тепловые процессы в технике. 2012. № 12. С. 559–565.
2. **Zalmanovich S., Goncharov K.** Radiators with LHP. *International conference "Heat Pipes for Space Application" (Moscow, 15–18 September, 2009)*. Moscow, 2009, pp. 17–21.
3. **Копяткевич Р.М., Гуля В.М., Тулин Д.В., Шабарчин А.Ф.** Тепловое проектирование и пофрагментная наземная отработка системы обеспечения теплового режима космического аппарата негерметичного исполнения на базе сотопанелей с тепловыми трубами // Космонавтика и ракетостроение. 2010. Вып. 3 (60). С. 33–41.
4. **Панин Ю.В., Антонов В.А., Балькин 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. С. 31–38.
5. **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. 6–15.
6. **Идельчик И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Москва, 1975. С. 31–36.
7. **Никонов А.А., Горбенко Г.А., Блинков В.Н.** Теплообменные контуры с двухфазным теплоносителем для систем терморегулирования космических аппаратов. Москва, 1991. С. 59–60.
8. **Володин Ю.Г., Федоров К.С., Яковлев М.В.** Коэффициент теплоотдачи в пусковом режиме энергетической установки // Известия высших учебных заведений. Серия: Машиностроение. 2007. № 1. С. 26–28.
9. **Зудин Ю.Б.** Влияния теплофизических свойств стенки на коэффициент теплоотдачи // Теплоэнергетика. 1998. № 3. С. 31–33.
10. **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.

11. **Игнатьев С.А.** Влияние параметров процессов охлаждения на коэффициент теплоотдачи при термопластичном упрочнении // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2009. № 2. С. 27–30.
12. **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.
13. **Аминов Д.М., Хафизов Ф.М.** Экспериментальная оценка теплоотдачи инфракрасного нагревательного элемента // Инновационная наука. 2016. № 8. С. 16–18.
14. **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.
- thermohydraulic processes in the thermal control system of a telecommunications satellite]. *Aerospace engineering and technology*, 2011, no. 5 (82), pp. 6–15. (In Russ.)
6. **Idelchik I.E.** Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Handbook of hydraulic resistances]. Moscow, 1975, pp. 31–36. (In Russ.)
7. **Nikonov A.A., Gorbenko G.A., Blinkov V.N.** Teploobmen nye kontury s dvukhfaznym teplonositelem dlya sistem termoregulirovaniya kosmicheskikh apparatov [Heat exchange circuits with a two-phase coolant for spacecraft temperature control systems]. Moscow, 1991, pp. 59–60. (In Russ.)
8. **Volodin Yu.G., Fedorov K.S., Yakovlev M.V.** Koeffitsient teplootdachi v puskovom rezhime energeticheskoi ustanovki [Heat transfer coefficient in the start-up mode of the power plant]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya: Mashinostroenie*, 2007, no. 1, pp. 26–28. (In Russ.)
9. **Zudin Yu.B.** Vliyaniya teplofizicheskikh svoystv stenki na koeffitsient teplootdachi [Influence of thermophysical properties of the wall on the heat transfer coefficient]. *Thermal power engineering*, 1998, no. 3, pp. 31–33. (In Russ.)
10. **Knyazev V.A., Nikulin K.S.** Effektivnyi koeffitsient teplootdachi v ploskikh shchelyakh s neodnorodnym obogrevom [Effective heat transfer coefficient in flat slits with inhomogeneous heating]. *Issues of atomic science and technology. Series: Physics of Nuclear Reactors*, 2016, no. 1, pp. 56–64. (In Russ.)

References

1. **Vershinin S.V., Maidanik Yu.F.** Gibkie miniaturnue konturnue teplovuse trubi [Flexible miniature contour heat pipes]. *Thermal processes in engineering*, 2012, no. 12, pp. 559–565. (In Russ.)
2. **Zalmanovich S., Goncharov K.** Radiators with LHP. *International conference "Heat Pipes for Space Application" (Moscow, 15–18 September, 2009)*. Moscow, 2009, pp. 17–21.
3. **Kopyatkevich R.M., Gulya V.M., Tulin D.V., Shabarchin A.F.** Teplovoe proektirovanie i pofragmentnaia otrabotka systemy obespecheniya teplovogo regima kosmicheskogo apparata negrmetichnogo osolnenia na base sotopaneli s teplovumi trubami [Thermal design and post-fragment ground testing of a system for ensuring the thermal regime of an unpressurized spacecraft based on honeycomb panels with heat pipes]. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2010, iss. 3(60), pp. 33–41. (In Russ.)
4. **Panin Yu.V., Antonov V.A., Balykin M.A.** K voprosu proektirovaniya i expluatachii teplovux trub v sostave STR posadochnux megplanetnix stantsii dlia issledovaniya tel solnechnoy system [On the issue of designing and operating TT as part of the landing modules of interplanetary stations for the study of solar system bodies]. *Vestnik NPO Lavochkina*, 2021, no. 4, pp. 31–38. (In Russ.)
5. **Gakal P.G., Ruzaykin V.I., Turna R.Yu.** et al. Eksperimental'nyi stend dlya issledovaniya teplogidravlicheskih protsessov v sisteme termoregulirovaniya telekommunikatsionnogo sputnika [Experimental stand for the study of
- thermohydraulic processes in the thermal control system of a telecommunications satellite]. *Aerospace engineering and technology*, 2011, no. 5 (82), pp. 6–15. (In Russ.)
6. **Idelchik I.E.** Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Handbook of hydraulic resistances]. Moscow, 1975, pp. 31–36. (In Russ.)
7. **Nikonov A.A., Gorbenko G.A., Blinkov V.N.** Teploobmen nye kontury s dvukhfaznym teplonositelem dlya sistem termoregulirovaniya kosmicheskikh apparatov [Heat exchange circuits with a two-phase coolant for spacecraft temperature control systems]. Moscow, 1991, pp. 59–60. (In Russ.)
8. **Volodin Yu.G., Fedorov K.S., Yakovlev M.V.** Koeffitsient teplootdachi v puskovom rezhime energeticheskoi ustanovki [Heat transfer coefficient in the start-up mode of the power plant]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya: Mashinostroenie*, 2007, no. 1, pp. 26–28. (In Russ.)
9. **Zudin Yu.B.** Vliyaniya teplofizicheskikh svoystv stenki na koeffitsient teplootdachi [Influence of thermophysical properties of the wall on the heat transfer coefficient]. *Thermal power engineering*, 1998, no. 3, pp. 31–33. (In Russ.)
10. **Knyazev V.A., Nikulin K.S.** Effektivnyi koeffitsient teplootdachi v ploskikh shchelyakh s neodnorodnym obogrevom [Effective heat transfer coefficient in flat slits with inhomogeneous heating]. *Issues of atomic science and technology. Series: Physics of Nuclear Reactors*, 2016, no. 1, pp. 56–64. (In Russ.)
11. **Ignatiev S.A.** Vlianie parametrov ohlagdenia na koeffitsient teplootdachi pri ermoplastichnom utochenii [Influence of the parameters of cooling processes on the heat transfer coefficient during thermoplastic hardening]. *Problems of mechanical engineering and automation*, 2009, no. 2, pp. 27–30. (In Russ.)
12. **Minakov A.V., Guzey D.V., Zhigarev V.A.** Turbulentnaya vynuzhdennaya konvektsiya nanozhidkosti v kruglom kanale [Turbulent forced convection of nanofluids in a circular channel]. *Uchenue zapiski Kazanskogo univerciteta. Seriya. Physical and mathematical sciences*, 2015, vol. 157, no. 3, pp. 85–96. (In Russ.)
13. **Aminov D.M., Hafizov F.M.** Eksperimental'naya otsenka teplootdachi infrakrasnogo nagrevatel'nogo elementa [Experimental evaluation of heat transfer of an infrared heating element]. *Innovative science*, 2016, no. 8, pp. 16–18. (In Russ.)
14. **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. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 21.12.2022; одобрена после рецензирования 16.01.2023; принята к публикации 14.03.2023.

The article was submitted on 21.12.2022; approved after reviewing on 16.01.2023; accepted for publication on 14.03.2023.