

Научная статья
УДК 55.49.07
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=187580>
EDN: <https://www.elibrary.ru/PJYRPE>



Определение плотности теплового потока на адиабатическом участке пульсирующих тепловых труб системы терморегулирования космического аппарата

Андрей Викторович Нетелев^{1✉}, Артем Михайлович Реутов², Мария Олеговна Иващенко³

^{1, 2, 3} Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Российская Федерация

¹ netelev@mail.ru✉

² reutow.ar@yandex.ru

³ mari.lauta@mail.ru

Аннотация. Описан метод оценки локального теплового потока в адиабатической зоне пульсирующей тепловой трубы. Ввиду того что установка датчиков тепловых потоков внутри тепловой трубы невозможна из-за ее малого диаметра, для оценки теплового потока используется метод, основанный на решении обратных задач теплопереноса. При решении обратных задач теплопереноса распространенной практикой является минимизация функционала разности расчетных и экспериментально измеренных температур. В рассмотренной задаче используются данные о тепловом состоянии в нескольких точках на внешней поверхности тепловой трубы. Авторы предлагают минимизировать функционал с помощью генетических алгоритмов поиска экстремума функции. Генетические алгоритмы обладают следующими преимуществами:

- устойчивы к попаданию в локальные экстремумы;
- не требуют вычисления производной целевой функции;
- подходят для решения задач с моделями со сложной структурой и иерархией;
- для генетических алгоритмов не обязательно, чтобы функция была определена, непрерывна и дифференцируема на всей области поиска решения.

При валидации разработанного метода использовались данные модельного эксперимента. Разработанный метод показал хорошую сходимость к точному решению при возмущенных данных. Работоспособность предлагаемого метода подтверждена в ходе сравнения с результатами, полученными другими авторами.

Ключевые слова: пульсирующие тепловые трубы, обратная задача теплопереноса, локальный тепловой поток, генетическая оптимизация

Финансирование: работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект № 23-49-10060.

Для цитирования: Нетелев А.В., Реутов А.М., Иващенко М.О. Определение плотности теплового потока на адиабатическом участке пульсирующих тепловых труб системы терморегулирования космического аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2026. Т. 33. № 1. С. 86-96. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=187580>

Original article

Heat Flux Density Determining at the Pulsating Thermal Pipes Adiabatic Section of the Spacecraft Thermal Control System

Andrey V. Netelev^{1✉}, Artem M. Reutov², Maria O. Ivashinenko³

^{1, 2, 3} Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

¹ netelev@mail.ru✉

² reutow.ar@yandex.ru

³ mari.lauta@mail.ru

Abstract

Pulsating heat pipes represent an effective means for removing heat from the sources with high heat dissipation. In the pulsating heat pipe, heat is being transferred by the two-phase oscillating liquid-gas flow caused by the self-sustaining pressure fluctuations of the gas phase. Widespread application of the heat pipes is hindered due to the complications of this pipe starting conditions realization. This problem may be rectified under condition of detailed and scrupulous studying of the processes running in the pipe. As of today, many research teams are being preoccupied with the issues associated with modeling oscillating processes in the heat pipes. Mathematical models with lumped and distributed parameters in overall and partial derivatives are being used for the thermo-physical computing of the two-phase flow in a pulsating heat pipe. For thermal processes modeling in the pulsating heat pipes, it is important to know how the heat pipe with the environment and structure interaction is being exercised. Specifically, the information on the heat exchange at the section between the cooler and heater (the adiabatic zone) of the pulsating heat pipe is necessary. The heat flux direct measurement at the heat pipe adiabatic section is impossible since the tube diameter is small, and introduction of changes to its structure would inevitably lead to the measured data distortion. In practice, methods based on the heat transfer inverse problems solving are being used for the heat flux evaluation. These methods allow employing in computations the indirect data on the adiabatic section thermal state such as temperature of the heat pipe outer surface. The problem under consideration employs thermal measurements in several points of the pipe, obtained from the thermal sensors installed there.

When solving the inverse heat transfer problems, a common practice consists in minimizing the functional of the difference between the computed and experimentally measured temperatures. This approach supposes computing the gradient of the functional being minimized. The gradient computing of the functional may be rather complicated for the multi-level mathematical models. The authors propose employing genetic algorithms for the function extreme search while practical realization of the engineering computations. Genetic algorithms are simple to implement and offer several advantages:

- robustness to the local extremums entering;
- no necessity for the goal function derivatives computing;
- suitable for solving the problems with complex models and hierarchies;
- genetic algorithms do not require the function to be well-defined, continuous, and differentiable throughout the entire solution domain.

The method for the thermal flux setting through the adiabatic section wall of the pulsating thermal pipe was developed by the genetic algorithm for minimizing the functional of the difference between the computed and experimental temperatures. The authors evaluated effectiveness of various genetic algorithm development options. The developed method validation was performed with the model experiment data. The method demonstrated good convergence to an exact solution under perturbed conditions. The method effectiveness was confirmed through a comparative analysis with the results obtained by other authors.

Keywords: pulsating heat pipes, inverse heat transfer problem, local heat flux, genetic optimization

Funding: the work was financed by the Russian Science Foundation, Project No. 23-49-10060.

For citation: Netelev A.V., Reutov A.M., Ivashinenko M.O. Heat Flux Density Determining at the Pulsating Thermal Pipes Adiabatic Section of the Spacecraft Thermal Control System. *Aerospace MAI Journal*. 2026;33(1):86-96. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=187580>

List of Figures

- Fig. 1. Scheme of a closed-loop pulsating heat pipe
- Fig. 2. A scheme of the thermal impact on the heat pipe adiabatic section
- Fig. 3. A two-point crossbreeding scheme
- Fig. 4. A crossbreeding scheme employing the feature vector with the most efficient goal function
- Fig. 5. Readings of the thermocouples deployed on the heat pipe surface [15].
- Fig. 6. Computed and model heat flux density in the thermocouples installation points
- Fig. 7. Distribution diagram of the number of solutions as function of the iterations number
- Fig. 8. Perturbed readings of the thermocouples deployed on the heat pipe surface
- Fig. 9. Heat fluxes densities computed by the exact and perturbed data [15]

List of Tables

- Table 1. Initial data for modeling
- Table 2. Initial approximations subset of the heat flux approximation parameters (11)

Введение

В современных автоматических космических аппаратах для отвода тепла от бортового оборудования используются пассивные системы – контурные тепловые трубы [1, 2] и аксиальные [3, 4]. Такие пассивные системы применимы при мощности тепловыделений в несколько киловатт. Для космических аппаратов с мощностью тепловыделения более 10 кВт, а также с большими расстояниями теплопередачи применяются активные системы терморегулирования, использующие принудительную прокачку однофазного жидкого теплоносителя. С возрастанием количества отводимого тепла в таких системах увеличивается расход теплоносителя, что приводит к росту массы системы терморегулирования космического аппарата. Решением данной проблемы может стать применение пульсирующих тепловых труб (ПТТ).

Пульсирующие тепловые трубы – перспективные двухфазные пассивные устройства теплообмена [5, 6]. Преимущества пульсирующих тепловых труб состоят в том, что они способны функционировать без подводимой электроэнергии, в условиях космического вакуума и при нулевой гравитации, а отсутствие капиллярной структуры внутри трубы позволяет значительно увеличить теплоперенос по сравнению с капиллярными тепловыми трубами. Такие устройства состоят из тонкостенной трубы, частично заполненной теплоносителем, расположенной между зонами испарителя и конденсатора. Во время работы устройства теплоноситель распределяется по трубке в виде чередования жидких пробок и паровых пузырей, движущихся под воздействием тепла, подводимого к зоне испарителя. Схема устройства показана на рис. 1.

Для создания расчетных методик и построения цифровых двойников необходимо иметь математическую модель функционирования пульсирующих тепловых труб. Такое исследование является сложной научно-практической задачей, так как

теплофизические и гидродинамические процессы, происходящие внутри данных устройств, еще не до конца изучены [7]. Чтобы проанализировать фундаментальные принципы их поведения, в последние годы были проведены исследования, например [8], с целью изучения средней скорости теплопередачи или общего теплового сопротивления системы [9]. В некоторых работах процессы в ПТТ моделировались путем моделирования уравнений Навье–Стокса для баланса массы и количества движения [10]. Изучались вопросы образования паровых пузырей в канале трубы и их взаимодействию с жидкой фазой [11], вопросы моделирования пульсации паровых пузырей рассмотрены в работе [12].

При моделировании термодинамических процессов интерес представляет изучение процессов, происходящих в зоне теплопереноса пульсирующей тепловой трубы, или, как принято называть, в зоне адиабаты. Локальная оценка тепловых характеристик устройства в зоне адиабаты поможет в описании процесса и характера теплопереноса внутри системы [13]. Ввиду того что установка датчиков тепловых потоков внутри тепловой трубки невозможна из-за ее малого диаметра, в расчетных

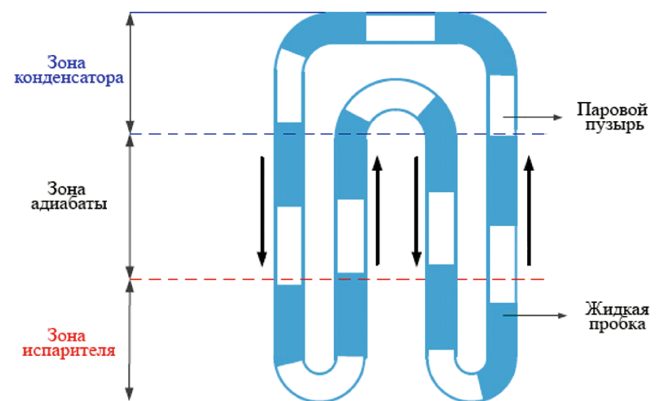


Рис. 1. Схема пульсирующей тепловой трубы с замкнутым контуром

методиках могут использоваться косвенные данные о тепловом состоянии пульсирующей тепловой трубы. Такие подходы к определению теплового потока относятся к группе методов, основанных на решении обратных задач теплопереноса [14]. Решение такой задачи строится на минимизации функционала невязки расчетных и измеренных температур. Исходными данными для задачи определения теплового потока на внутренней стенке тепловой трубы являются экспериментально измеренные распределения температур на внешней поверхности тепловой трубы в зоне адиабаты. Такие данные могут быть получены путем измерений температуры поверхности датчиками или тепловизором. Подобные исследования уже проводились, и результаты приведены в работе [15], где использовались показания тепловизора для получения информации о тепловом состоянии адиабатической области трубы. Для определения плотности теплового потока в сечении тепловой трубы применялся метод итерационной регуляризации [16].

Сравнение решений, полученных при разных подходах, позволит повысить степень доверия к результатам и сформировать задел для использования метода генетической оптимизации применительно к более сложным математическим моделям.

Постановка задачи

Транспортный участок пульсирующей тепловой трубы представляет собой длинный канал с гладкими внутренними и наружными стенками между областями нагрева и охлаждения (рис. 2).

Внешняя оболочка канала контактирует с атмосферой и излучает тепло в окружающую среду. Этот процесс описывается обобщенным уравнением:

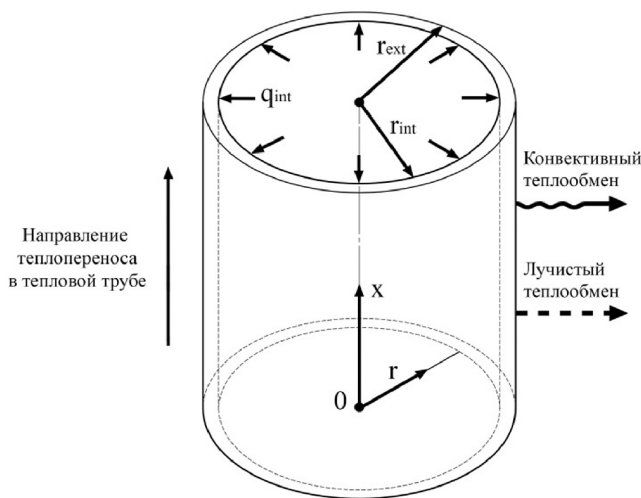


Рис. 2. Схема теплового воздействия на адиабатический участок тепловой трубы [15]

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha (T_{ext} - T_{\infty}); r = r_{ext}; x \in (0, L); \tau \in (0, \tau_m), \tag{1}$$

где α – комбинированный коэффициент теплоотдачи в окружающую среду за счет конвекции и излучения; T_{∞} – температура окружающей среды; T_{ext} – температура внешней стенки тепловой трубы.

Внутренний объем канала заполнен теплоносителем. Состояние теплоносителя в пульсирующей тепловой трубе может быть описано термодинамической моделью цикла Стирлинга [13]. При возникновении пульсаций теплоносителя стенки трубы будут контактировать с теплоносителем в жидком и газообразном агрегатных состояниях. В связи с этим тепловой поток в стенку будет осциллировать и зависеть от времени и координаты:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = q_{int}(x, \tau); r = r_{int}; x \in (0, L); \tau \in (0, \tau_m), \tag{2}$$

Тепловое состояние трубы описывается уравнением теплопроводности в цилиндрической системе координат:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; r \in (r_{ext}, r_{int}); x \in (0, L); \tau \in (0, \tau_m), \tag{3}$$

Для того чтобы доопределить математическую модель теплопереноса на границах адиабатического участка на торцах трубы, задавались граничные условия:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0; x = 0; r \in (r_{ext}, r_{int}); \tau \in (0, \tau_m); \tag{4}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0; x = L; r \in (r_{ext}, r_{int}); \tau \in (0, \tau_m). \tag{5}$$

Такие граничные условия были выбраны с учетом допущения, что теплоперенос за счет теплопроводности материала трубы вдоль оси трубы будет значительно меньше теплопереноса в радиальном направлении из-за малого перепада температур. Решением такой математической модели будет распределение температуры в стенке тепловой трубы $T(x, \tau, r)$.

В работе [15] было показано, что для тонкостенной трубы допустимо упростить модель (1)–(5), приняв температуру стенки функцией только времени и координаты вдоль оси трубы $T(x, \tau)$:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + ST + H(x, \tau); x \in (0, L); \tau \in (0, \tau_m); \tag{6}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0; x = 0; \tau \in (0, \tau_m]; \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0; x = L; \tau \in (0, \tau_m]; \quad (8)$$

$$T(x, 0) = T_0(x); x \in [0, L]. \quad (9)$$

Коэффициенты двух последних членов уравнения (6) записываются как

$$S = \frac{-2\alpha r_{ext}}{\lambda(r_{ext}^2 - r_{int}^2)};$$

$$H(x, r) = \frac{2(\alpha r_{ext} T_\infty - r_{int} q_{int}(x, \tau))}{\lambda(r_{ext}^2 - r_{int}^2)}.$$

В работах [15, 16] показано, что с использованием математической модели (6)–(9) можно получить результаты, которые, с достаточной для инженерных расчетов точностью, совпадают с результатами, полученными при использовании модели (1)–(5).

Плотность теплового потока через стенку в радиальном направлении является неизвестной величиной $q_{int}(x, \tau)$. В вычислительной практике такие характеристики представляют в параметрическом виде как произведение коэффициентов параметризации на систему базисных функций, зависящую от аргументов:

$$q_{int} = \sum_{k=1}^K \alpha_k \varphi(x, \tau), \quad (10)$$

где $\alpha_k, k = 1, \dots, K$ – коэффициенты параметризации; $\varphi(x, \tau)$ – система базисных функций. При таком подходе неизвестными величинами являются коэффициенты параметризации.

В работе [15] производилось формирование модельных данных функций

$$q_{int}(x, \tau) = A \cdot \cos(p\pi\tau) \cdot \left[1 + \left(\frac{x}{0,0001} + 1 \right) \frac{L}{8} \right]. \quad (11)$$

где A, p – коэффициенты параметризации для тригонометрической функции теплового потока.

При валидации разработанной методики для параметризации плотности теплового потока на адиабатическом участке $q_{int}(x, \tau)$ использовалась формула (11) с неизвестными коэффициентами A и p [15].

Общий подход к решению обратных задач теплопереноса основан на минимизации функционала невязки расчетных и измеренных температур

$$J(q_{int}(x, \tau)) = \sum_{m=1}^M \int_0^{\tau_m} [T(x_m, \tau) - f_m(\tau)]^2 d\tau, \quad (12)$$

где $x_m, m = 1, \dots, M$ – координаты точек измерения температур на поверхности тепловой трубы; $f_m(\tau)$ – измеренные температуры.

В инженерной практике для минимизации функционала используются методы, основанные на вычислении градиента функционала невязки (12) численными методами оптимизации 1-го порядка [17]. Этим обстоятельством обусловлено требование, чтобы минимизируемая функция была дифференцируема на всей области поиска решений. Такие методы обладают хорошей устойчивостью, быстрой сходимостью и хорошо зарекомендовали себя при решении практических задач. Но при сложной структуре и иерархии математической модели рассчитать градиент функционала невязки аналитически бывает затруднительно.

Генетическая оптимизация

В статье для минимизации целевого функционала использовался метод, основанный на генетическом алгоритме (ГА) поиска экстремума целевой функции (12) [18–20]. Подобные методы базируются на аналогии исследуемых процессов процессам эволюции в природе и относятся к группе недетерминированных методов.

Преимущества методов генетической оптимизации:

- ГА устойчивы к попаданию в локальные экстремумы;
- ГА не требуют вычислять производную целевой функции;
- ГА подходят для решения задач с моделями со сложной структурой и иерархией;
- для ГА не обязательно, чтобы функция была определена, непрерывна и дифференцируема на всей области поиска решения.

Недостатки ГА:

- нет гарантии нахождения глобального экстремума;
- ГА невозможно использовать для поиска экстремума изолированной функции;
- длительное время расчета целевой функции снижает эффективность ГА.

Функционал (12) минимизируется на ограниченном дискретном N -мерном множестве. Каждая точка такого множества характеризуется набором характеристик

$$\bar{P} = \{\bar{p}_1, \bar{p}_1, \dots, \bar{p}_k\}, i = 1 \dots N,$$

где \bar{p}_i – вектор, содержащий набор определяемых характеристик модели (6)–(7) – коэффициентов параметризации функции плотности теплового потока $q_{int}(x, \tau)$.

Каждому вектору \bar{p}_i соответствует уникальная вычисляемая характеристика – целевая функция.

При решении задачи в постановке (6)–(7) целевая функция — это функционал (12) $J(\bar{p}_i)$, определяющий невязку расчетных и экспериментальных температур в точках установки термодатчиков.

Для организации итерационного цикла задается начальное приближение решения, которое выбирается исходя из инженерного и научного опыта исследователя. Механизмы, на которых строится ГА, позволяют оперировать только теми решениями, которые можно получить в результате комбинации разрядов в кодировке записи численного значения приближений. Правильно выбранное начальное приближение может существенно ускорить процесс сходимости решения, а неправильно выбранное может вообще не содержать глобального решения. Начальное приближение состоит из k векторов $\bar{P} = \{\bar{p}_1, \bar{p}_1, \dots, \bar{p}_k\}$. Для всех векторов начального приближения определяются целевые функции на основе расчета функционала $I = \{\bar{J}_1, \bar{J}_2, \dots, \bar{J}_k\}$ по формуле (12), после чего производится ранжирование векторов по целевой функции.

Итерационный цикл останавливается по выполнении условия достижения требуемой точности решения задачи (6)–(9):

$$J(q_{in}(x, \tau)) \leq \varepsilon(\delta, h), \quad (13)$$

где точность $\varepsilon(\delta, h)$ зависит от погрешностей расчетных методик при определении целевой функции и инструментальных погрешностей при проведении экспериментов.

В случае слипания решения или достижения решением ограничения по числу итераций может быть осуществлен рестарт с первоначальными исходными данными.

Поскольку ГА работает только с целыми величинами, то дробную часть численного значения принятых приближений следует преобразовать до целого числа в соответствии с требуемой точностью решения путем умножения значения приближения на 10^n . Величина n определяет требуемую точность решения. Оставшаяся дробная часть при этом не учитывается. От выбора n во многом зависят трудоемкость вычислительного процесса и возможность существенно уменьшить область поиска решения.

Далее значения векторов приближений преобразуются в двоичное представление — с последовательным заполнением разрядов справа налево при использовании обычной двоичной кодировки, с использованием кода Грея [21] или кода Хеминга [18]. Выбор кодировки позволяет в зависимости от ситуации увеличить или уменьшить скорость сходимости алгоритма к предполагаемой точке экстремума. Все операции в ГА производятся с двоичным представлением векторов характеристик модели.

На каждой итерации ГА реализуются следующие процедуры [19]:

- кроссбридинг (скрещивание);
- мутация;
- расчет целевой функции;
- проверка условия останова;
- формирование нового приближения.

Кроссбридинг является основной процедурой, определяющей процесс эволюции к точному решению. В процессе кроссбридинга формируются новые векторы \bar{p}_i с набором характеристик, полученных в результате комбинирования характеристик векторов приближения \bar{P} . Критерием удачного кроссбридинга является получение вектора \bar{p}_i с меньшим значением целевой функции, чем у векторов начального приближения. Такой вектор заменяет в начальном приближении вектор, обладающий наихудшей целевой функцией. Далее формируется новый вектор приближений для следующей итерации.

При решении инженерных задач, особенно в тех случаях, когда расчет целевой функции требует больших машинных ресурсов, количество расчетных циклов будет показателем эффективности алгоритма. Но слишком быстрая сходимость алгоритма может привести к тому, что решение сойдется к локальному экстремуму. Поэтому можно условно разделить процесс поиска решения на этап, на котором требуется выбрать области возможных экстремумов, и этап, на котором производится локализация в окрестностях наиболее перспективной точки экстремума.

В случае, когда необходимо отыскать максимальное количество возможных точек экстремума, целесообразно использовать кроссбридинг с двухточечным разбиением [18, 19]. При двухточечном разбиении кодированная двоичная запись характеристики из случайного вектора приближений комбинируется с кодированной записью характеристики второго случайного вектора, выбранного из подмножества приближений (рис. 3). Для формирования новых характеристик составляется строка из разрядов двоичного представления исходных характеристик. Последний разряд первой характеристики совмещается с первым разрядом второй характеристики. Последний разряд второй характеристики совмещается с первым разрядом первой характеристики. В результате получается закольцованная строка из двоичных представлений характеристик приближений. Далее полученная строка случайным образом делится на две равные части, которые рассматриваются как новые приближения характеристик. Аналогичная операция осуществляется для всех остальных характеристик выбранных векторов приближений, после чего из

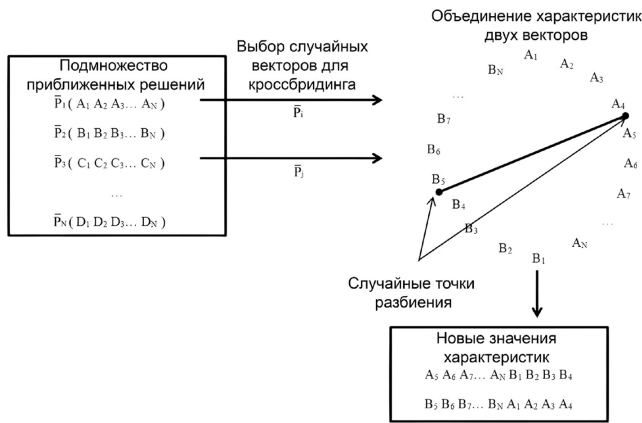


Рис. 3. Схема двухточечного кроссбридинга

новых характеристик формируются новые векторы. Для вновь сформированных векторов производится оценка целевой функции, и, если целевая функция новых векторов выше целевой функции векторов подмножества начальных приближений, векторы из подмножества приближений заменяются полученными векторами.

Такой подход позволяет избежать ранней сходимости алгоритма и увеличить вероятность нахождения глобального экстремума целевой функции.

Для локализации решения в окрестности точки экстремума применяется алгоритм кроссбридинга, в котором формируются новые векторы путем комбинирования вектора из подмножества приближений, обладающего самой эффективной целевой функцией, со всеми остальными векторами приближения (рис. 4).

С помощью распараллеливания вычислительного процесса можно увеличить эффективность поиска глобального экстремума. При организации *парал-*

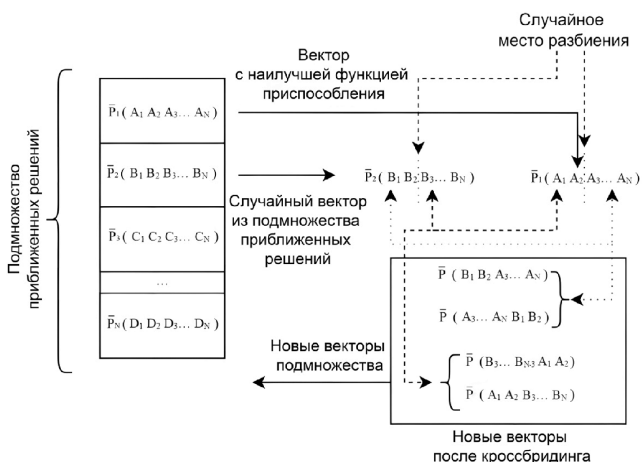


Рис. 4. Схема кроссбридинга с использованием вектора характеристик с наиболее эффективной целевой функцией

лельных вычислений организуется несколько подмножеств приближений. Их эволюция происходит по алгоритмам кроссбридинга, описанным выше. Каждое подмножество начинает сходиться к одному из возможных экстремумов внутри границ области поиска решений. По истечении определенного числа циклов формируется суммарное подмножество приближений из векторов, составляющих подмножества из параллельных расчетов. Если в результате параллельных расчетов один из найденных экстремумов оказался глобальным, то эволюция суммарного подмножества позволит свести решение к точному.

Мутация подмножеств приближений позволяет снизить вероятность схождения решения к локальному экстремуму. Существует множество различных вариантов операции мутации. Наиболее простой из них можно реализовать следующей последовательностью действий:

- случайным образом выбирается один или несколько векторов из подмножества приближений;
- случайным образом из характеристик, составляющих вектор приближений, выбирается одна или несколько мутирующих характеристик;
- в двоичном представлении значения случайных разрядов меняются на противоположные.
- производится оценка целевой функции мутировавшего вектора (или нескольких векторов).

Такой подход малоэффективен при обработке больших множеств возможных решений. Поэтому операция мутации носит вспомогательный характер. Но с увеличением числа мутирующих векторов и характеристик можно добиться снижения скорости сходимости алгоритма и тем самым увеличить вероятности нахождения глобального экстремума.

Опробование разработанной методики

Разработанная методика была опробована на данных модельного эксперимента, приведенных в источнике [15]. В расчетах использовалась модель (6)–(9) с параметризацией искомой характеристики $q_{int}(x, \tau)$ формулой (11). Исходные данные для математической модели приведены в табл. 1.

Для вычисления функционала невязки расчетных и измеренных температур использовались смоделированные показания термодатчиков, взятые из источника [15]. Координаты установки термопар: $x_1 = 0,2$ м; $x_2 = 0,4$; $x_3 = 0,6$ м; $x_4 = 0,8$ м.

Модельные показания термопар представлены на рис. 5.

Данные о подмножествах начальных приближений приведены в табл. 2.

Показания термопар (см. рис. 5) соответствуют плотности теплового потока, смоделированного по формуле (11), со значениями коэффициентов $A = 4021$ и $p = 1,23$.

Таблица 1. Исходные данные для моделирования

Характеристика	$L, м$	$\tau_m, с$	$r_{int}, м$	$r_{ext}, м$	$\lambda, Вт/(м \cdot К)$	$\alpha, Вт/(м^2 \cdot К)$	$C, Дж/(кг \cdot К)$	$\rho, кг/м^3$	$T_\infty, К$
Значение	0,1	20	0,0015	0,0025	201	10	900	2700	295,15

Таблица 2. Подмножество начальных приближений параметров аппроксимации теплового потока (11)

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Параметр A	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500
Параметр p	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9

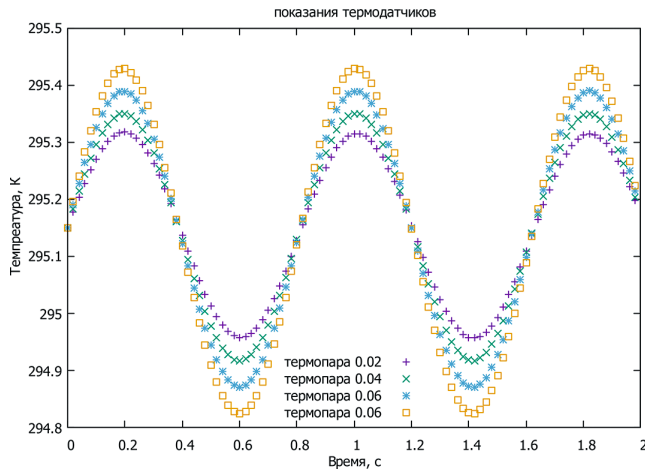


Рис. 5. Модельные показания термопар, расположенных на поверхности тепловой трубы [15]

На основании приведенных данных с использованием разработанной методики были рассчитаны параметры A и p . Полученные данные оценивались путем сравнения с данными из источника [15]. Результаты сравнения приведены на рис. 6. Критерием останова итерационного процесса являлось достижение 10^3 количества итераций или достижение точности $J \leq 0,01$.

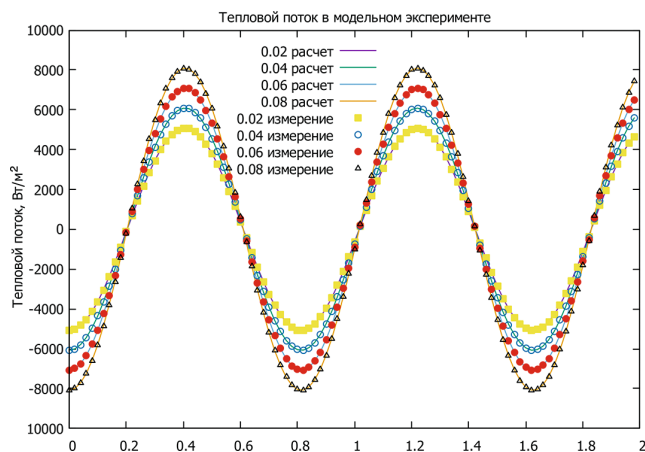


Рис. 6. Расчетная и модельная плотность теплового потока в точках установки термопар

По окончании десятой итерации производился рестарт решения с использованием в качестве начального приближения исходного подмножества векторов. После десятого рестарта формировалось подмножество начальных приближений, состоящее из векторов, которые во время предыдущих десяти рестартов на десятой итерации имели минимальное значение целевого функционала (12).

На рис. 6 приведены расчетные и модельные значения плотности теплового потока [15].

Так как метод не является детерминированным, то для оценки его эффективности использовался статистический подход. На рис. 7 приведено распределение количества решений в зависимости от числа итераций для выборки из 100 запусков.

Как видно из диаграммы, для достижения точного решения методу не потребовалось более 250 итераций. При этом наличие ярко выраженных максимумов на 110-й и 210-й итерациях объясняется тем фактом, что на 100-м и 200-м итерационных циклах во время рестарта формировалось подмножество начальных приближений из векторов решений с минимальными значениями функционала десяти предыдущих рестартов.

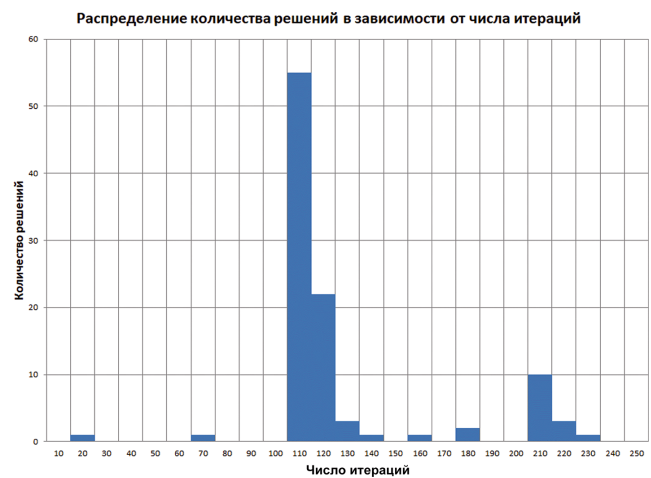


Рис. 7. Диаграмма распределение количества решений в зависимости от числа итераций

Было также исследовано влияние на решение погрешности входных данных. Численные значения зашумленных модельных показаний термопар были взяты из источника [15]. Зашумленные показания термопар представлены на рис. 8.

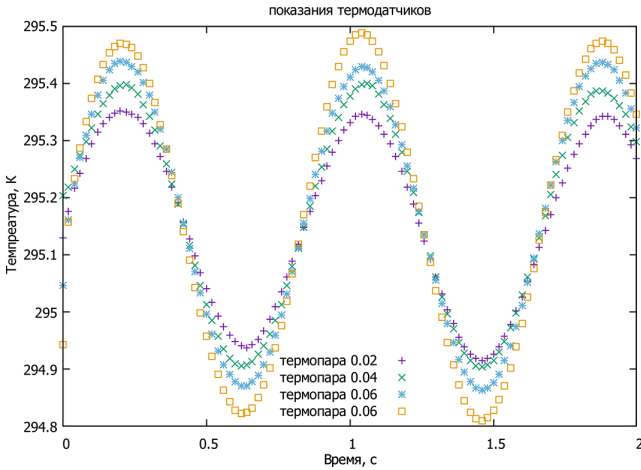


Рис. 8. Возмущенные показания термопар, расположенных на поверхности тепловой трубы

Минимальное значение целевого функционала при использовании зашумленных данных составило $J = 1,778347$, а рассчитанные параметры аппроксимации $A = 4094$ и $p = 1,182$. При этом останов производился по достижении максимального значения 250 итераций.

Сравнение расчетных и взятых из источника [15] плотностей тепловых потоков приведено на рис. 9.

Выводы

Разработанная методика, базирующаяся на генетическом алгоритме, показала высокую эффективность при решении задачи расчета плотности

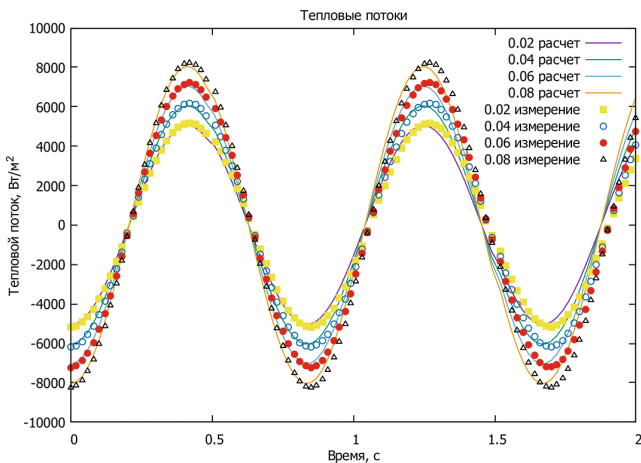


Рис. 9. Плотности тепловых потоков, рассчитанные по точным и возмущенным данным [15]

теплового потока на адиабатическом участке пульсирующей тепловой трубы. Полученные результаты и результаты модельного эксперимента совпали. Математическое ожидание соответствовало 110 итерациям. При внесении погрешности в показания термодатчиков точность решения также осталась на высоком уровне.

Результаты модельного эксперимента сравнивались с результатами, опубликованными другими авторами. Данные совпали с высокой точностью. Количество итераций, реализованных в решении, позволяет сделать вывод о возможности использования методики даже на персональных компьютерах невысокой вычислительной мощности. Все вышесказанное подтверждает работоспособность и эффективность разработанной методики.

Список источников

1. Mайданик Ю.Ф., Ферштатер Ю.Г., Гончаров К.А. Capillary pumped loop for the systems of thermal regulation of spacecraft // ICES 4th European Symposium on Space Environmental Control Systems (21-24 October 1991; Florence, Italy). Vol. 1, pp. 87-92.
2. 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
3. Антонов В.А., Гончаров К.А., Тулин Д.В. Тепловые трубы в системах терморегулирования космических аппаратов // Актуальные вопросы проектирования космических систем и комплексов: Сборник научных трудов НПО им. С.А. Лавочкина. Выпуск 12. М.: Полиграф-Информ, 2011. 22 с.
4. Докучаев А.Е., Зинчук А.А. Экспериментальное исследование применения тепловой трубы в газогенераторе // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 3. С. 89-96.
5. Смирнов Г.Ф., Савченков Г.А. Пульсирующая тепловая труба. Патент SU 504065 A1. Бюл. № 7, 25.02.1976.
6. Алифанов О.М., Викулов А.Г., Гончаров К.А. и др. Пульсирующие тепловые трубы и их применение в космической технике // Теплофизика высоких температур. 2025. Т. 63. № 1. С. 113-151. DOI: 10.31857/S0040364425010163
7. Алифанов О.М., Гончаров Д.А., Гончаров К.А. и др. Экспериментальные исследования тепловых характеристик пульсирующей тепловой трубы // Теплофизика высоких температур. 2025. Т. 63. № 3. С. 401-409. DOI: 10.7868/S3034610X25030105
8. Rittidech S., Terdtoon P., Murakami M., et al. Correlation to Predict Heat Transfer Characteristics of a Closed-End Oscillating Heat Pipe at Normal Operating Condition // Applied Thermal Engineering. 2003. Vol. 23. No. 4, pp. 497-510. DOI: 10.1016/S1359-4311(02)00215-6

9. Khandekar S., Cui X., Groll M. Thermal Performance Modeling of Pulsating Heat Pipes by Artificial Neural Network // 12th International Heat Pipe Conference (IHPC; 19–24 May 2002; Moscow, Russia).
10. Bertossi R., Ayel V., Mehta B., et al. Motion of liquid plugs between vapor bubbles in capillary tubes: a comparison between fluids // *Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 53. No. 11, pp. 3315–3327. DOI: 10.1007/s00231-017-2052-1
11. Ma Y., Zhang H., Zhuang J. Investigation on effective thermal conductivity of oscillating heat pipes // 13th International Heat Pipe Conference (IHPC; 21–25 September 2004; Shanghai, China).
12. Kim J.S., Bui N.H., Kim J.W., et al. Flow visualization of oscillation characteristics of liquid and vapor flow in the oscillating capillary tube heat pipe // *KSME International Journal*. 2003. Vol. 17. No. 10, pp. 1507–1519. DOI: 10.1007/BF02982330
13. Alifanov O.M., Vikulov A.G., Morzhukhina A.V., et al. Parametric Identification of Thermodynamic Processes in Unclosed-Loop Pulsating Heat Pipes // *Heat Transfer Engineering*. 2025, pp. 1–16. DOI: 10.1080/01457632.2025.2511453
14. Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.
15. Colaço M., Bozzoli F., Cattani L., et al. Local heat flux estimation inside tubes through conjugate gradient method with adjoint operator: application to the pulsating heat pipes case // *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2023. Vol. 33. No. 5, pp. 1754–1774. DOI: 10.1108/HFF-09-2022-0547
16. Cattani L., Mangini D., Bozzoli F., et al. An original look into pulsating heat pipes: inverse heat conduction approach for assessing the thermal behavior // 19th International Heat Pipe Conference and the 13th heat pipe symposium (10–14 June 2018; Pisa, Italy). p. 1–11.
17. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач и их приложения к обратным задачам теплообмена. М.: Наука, 1988. 288 с.
18. Koza J.R. Genetic Programming. Cambridge: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. A Bradford Book The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England, 1998. 609 p.
19. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы. Астрахань: ИД «Астраханский университет», 2007. 87 с.
20. Батищев Д.И., Неймарк Е.А., Старостин Н.В. Применение генетических алгоритмов к решению задач дискретной оптимизации: Учеб. пособие. Н. Новгород: Изд-во ННГУ им Н.И. Лобачевского, 2006. 136 с.
21. Кнут Д.Э. Искусство программирования. Том 4, А Комбинаторные алгоритмы. Часть 1. Раздел 7.2.1.3 Генерация всех сочетаний / Пер. с англ. И.В. Красикова. М.: ИД Вильямс, 2016. С. 408–443.

References

1. Maidanik YuF, Fershtater YuG, Goncharov KA. Capillary pumped loop for the systems of thermal regulation of spacecraft. *ICES 4th European Symposium on Space Environmental Control Systems (October 21–24, 1991; Florence, Italy)*. Vol. 1. p. 87–92.
2. Borschev NO. Mean-integral heat transfer coefficient parametric identification in coaxial heat pipes. *Aerospace MAI Journal*. 2022;29(3):111–121. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2022-3-111-121
3. Antonov VA, Goncharov KA, Tulin DV. Heat pipes in spacecraft temperature control systems: *Sbornik nauchnykh trudov NPO im. SA. Lavochkina "Aktual'nye voprosy proektirovaniya kosmicheskikh sistem i kompleksov"*. Issue 12. Moscow: Poligraf-Inform; 2011. 22 p. (In Russ.).
4. Dokuchaev AE, Zinchuk AA. Experimental study of the use of a heat pipe in a gas generator. *Aerospace MAI Journal*. 2011;18(3):89–96. (In Russ.).
5. Smirnov GF, Savchenkov GA. *Pulsating heat pipe*. Patent SU 504065 A1, 25.02.1976. (In Russ.).
6. Alifanov OM, Vikulov AG, Goncharov KA, et al. Pulsating heat pipes and their application in space technology. *High Temperature*. 2025;63(1):113–151. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0040364425010163
7. Alifanov OM, Goncarov DA, Goncarov KA, et al. Experimental studies of the thermal characteristics of a pulsating heat pipe. *High Temperature*. 2025;63(3):401–409. (In Russ.). DOI: 10.7868/S3034610X25030105
8. Rittidech S, Terdtoon P, Murakami M, et al. Correlation to Predict Heat Transfer Characteristics of a Closed-End Oscillating Heat Pipe at Normal Operating Condition. *Applied Thermal Engineering*. 2003;23(4):497–510. DOI: 10.1016/S1359-4311(02)00215-6
9. Khandekar S, Cui X, Groll M. Thermal Performance Modeling of Pulsating Heat Pipes by Artificial Neural Network. *12th International Heat Pipe Conference (IHPC; May 19–24, 2002; Moscow, Russia)*.
10. Bertossi R, Ayel V, Mehta B, et al. Motion of liquid plugs between vapor bubbles in capillary tubes: a comparison between fluids. *Heat and Mass Transfer*. 2017;53(11):3315–3327. DOI: 10.1007/s00231-017-2052-1
11. Ma Y, Zhang H, Zhuang J. Investigation on effective thermal conductivity of oscillating heat pipes. *13th International Heat Pipe Conference (IHPC; September 21–25, 2004; Shanghai, China)*.
12. Kim JS, Bui NH, Kim JW, et al. Flow visualization of oscillation characteristics of liquid and vapor flow in the oscillating capillary tube heat pipe. *KSME International Journal*. 2003;17(10):1507–1519. DOI: 10.1007/BF02982330
13. Alifanov OM, Vikulov AG, Morzhukhina AV, et al. Parametric Identification of Thermodynamic Processes in Unclosed-Loop Pulsating Heat Pipes. *Heat Transfer Engineering*. 2025, p. 1–16. DOI: 10.1080/01457632.2025.2511453

14. Alifanov OM. *Inverse problems of heat transfer*. Moscow: Mashinostroenie; 1988. 280 p.
15. Colaço M, Bozzoli F, Cattani L, et al. Local heat flux estimation inside tubes through conjugate gradient method with adjoint operator: application to the pulsating heat pipes case. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2023;33(5):1754-1774. DOI: 10.1108/HFF-09-2022-0547
16. Cattani L, Mangini D, Bozzoli F. et al. An original look into pulsating heat pipes: inverse heat conduction approach for assessing the thermal behavior. *19th International Heat Pipe Conference and the 13th heat pipe symposium (June 10-14, 2018; Pisa, Italy)*. p. 1-11.
17. Alifanov OM, Artyukhin EA, Romyantsev SV. *Extreme methods for solving ill-posed problems and their applications to inverse heat transfer problems*. Moscow: Nauka; 1988. 288 p. (In Russ.).
18. Koza JR. *Genetic Programming. Cambridge: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. A Bradford Book The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England; 1998. 609 p.
19. Panchenko TV. *Genetic algorithms*. Astrakhan: Astrakhanskii universitet; 2007. 87 p. (In Russ.).
20. Batishchev DI, Neymark EA, Starostin NV. *Application of genetic algorithms to solving discrete optimization problems*. Nizhny Novgorod: NGU im N.I. Lobachevskogo; 2006. 136 p. (In Russ.).
21. Knuth DE. *The Art of Computer Programming. Vol. 4A Combinatorial algorithms. Part 1. Chapter 7.2.1.3 Generating all combinations*. Addison-Wesley Professional, 2006.

Статья поступила в редакцию / Received 12.12.2024
Одобрена после рецензирования / Revised 01.12.2025
Принята к публикации / Accepted 13.02.2026