

УДК 536.24

Идентификация математических моделей теплообмена с использованием бесконтактных измерений*

А. В. Ненарокомов¹, Д. С. Семенов¹, Л. А. Домбровский²

¹ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва;

² Объединенный институт высоких температур РАН, Москва;

e-mail: semenov_ds@icloud.com

Поступила в редакцию 26.10.2018

Целью исследований является высокоточное определение параметров математической модели теплообмена по результатам нестационарных измерений температуры на поверхности исследуемых образцов. Решена задача одновременного определения комплекса коэффициентов математической модели теплопереноса для непрозрачных материалов: коэффициента теплоотдачи образца и поглощенного образцом теплового потока от нагревателя.

Ключевые слова: идентификация математических моделей, обратная задача теплообмена, радиационно-кондуктивный теплоперенос, бесконтактные измерения температуры.

Введение

В индивидуальных системах жизнеобеспечения (скафандрах, защитных костюмах и др.) для обеспечения заданных тепловых режимов и во избежание перегрева биологических тканей важно поддерживать температуру в строго ограниченном диапазоне. Однако температура поверхности тела, являющаяся индикатором теплового состояния процесса, дает лишь оценочные сведения о возможном перегреве глубинных тканей при допустимой температуре кожи [1, 2]. Решением данной проблемы может быть математическое моделирование процесса переноса тепла в биологических тканях [3, 4]. Причем, в то время как полная модель теплообмена требует учета переноса тепла потоком крови [5], у поверхности кожи, несмотря на наличие кровотока, существует только кондуктивный теплоперенос [6].

Для решения задачи оптимизации конструкции индивидуальной защиты необходимо использование математической модели теплообмена достаточно адекватной реальному процессу теплопереноса в биологических тканях. Высоко-

точное моделирование комбинированного теплопереноса невозможно без наличия адекватных оценок характеристик нагружения образца материала. Особенностью данной задачи является принципиальная невозможность прямого измерения этих характеристик. Единственным способом решения этой задачи являются не прямые измерения, обычно приводящие к необходимости решения обратных задач теплообмена (ОЗТ). В работе рассматривается одномерная задача периодического нагрева непрозрачного материала импульсным облучением от лазера при наличии конвективного теплообмена на поверхности материала с внешней средой [7].

1. Постановка задачи идентификации

В результате экспериментальных исследований обычно удается измерить лишь некоторые характеристики состояния системы (например, температуру). Поэтому, для обеспечения достижения поставленной цели необходимо применение методологии ОЗТ. Рассмотрим упрощенную математическую модель процесса (рис. 1).

Непрозрачный материал нагревается импульсным облучением лазером, направленным нормально к поверхности (тепловой поток q_l).

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-08-01501 А).

На левой и правой границах идет теплообмен с окружающей средой. В случае, когда использование контактных средств измерения температуры, таких как термопары, не представляется возможным, в первую очередь, необходимо обеспечить возможность анализа состояния материала (биологических тканей) бесконтактным способом [8]. Математическая модель теплопереноса в рассматриваемой системе, представляющей собой неограниченную плоскую пластину толщиной d , имеет вид:

$$C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

$$0 < x < d, \quad 0 < \tau \leq \tau_m, \\ T(x, 0) = T_0, \quad 0 \leq x \leq d, \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(0, \tau) = q_l(\tau) + \alpha(T_e(\tau) - T(0, \tau)), \quad 0 \leq \tau \leq \tau_m, \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(d, \tau) = \alpha(T(d, \tau) - T_e(\tau)), \quad 0 \leq \tau \leq \tau_m, \quad (4)$$

где тепловой поток от лазера q_l , поглощенный поверхностью образца, задается следующим образом:

$$q_l = q_{\max} \varphi(\tau).$$

Функция распределения $\varphi(\tau)$ определяется вектором временных параметров $\bar{\tau} = \{\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n, \Delta\tau_1, \Delta\tau_2\}$ следующим образом:

1. При $0 \leq \tau < \tau_n$ – нагрев до температуры T_{\max} :

$$\varphi(\tau) = 1 \text{ при } 0 \leq \tau < \tau_1,$$

$$\varphi(\tau) = 0 \text{ при } \tau_1 < \tau < \tau_2,$$

...

$$\varphi(\tau) = 1 \text{ при } \tau_{n-1} < \tau < \tau_n.$$

2. При $\tau \geq \tau_n$ – поддержание температуры поверхности в диапазоне $(T_{\min}; T_{\max})$:

$$\varphi(\tau) = 0 \text{ при}$$

$$\tau_n + (i-1)\Delta\tau_1 + (i-1)\Delta\tau_2 \leq \tau \leq \tau_n + i\Delta\tau_1 + (i-1)\Delta\tau_2,$$

$$\varphi(\tau) = 0 \text{ при}$$

$$\tau_n + i\Delta\tau_1 + (i-1)\Delta\tau_2 \leq \tau < \tau_n + i\Delta\tau_1 + i\Delta\tau_2,$$

где $i = 1, 2, \dots$

То есть нагрев осуществляется попеременным включением-выключением лазера. Временем переключения в данной постановке задачи можно пренебречь. Профиль теплового потока q_l представлен на рис. 2.

На начальном этапе нагрева тепловой поток максимален в течение, в общем случае, различ-

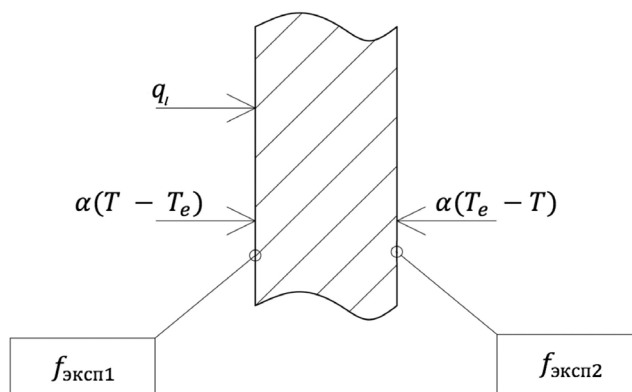


Рис. 1. Расчетная схема идентификации математической модели теплопереноса

ных промежутков времени. Затем после выхода на режим установка включается на фиксированный промежуток времени [8].

2. Алгоритм решения задачи идентификации для случая, когда все определяемые характеристики являются константами

В настоящем разделе предлагается модифицированный алгоритм решения обратной задачи по определению характеристик теплообмена на поверхности, учитывающий априорную информацию о том, что определяемые характеристики – постоянные величины. Итак, в модели (1)–(4) параметры α и q_{\max} являются неизвестными.

В качестве дополнительной информации, необходимой для идентификации математической модели при неизвестных теплофизических характеристиках [9], используется измерение на поверхности образца $T^{\text{эксп}}(0, \tau) = f(\tau)$.

В операторном виде задачу определения набора характеристик $\bar{u} = \{\alpha, q_{\max}\}$ можно сформулировать как решение уравнения $A\bar{u} = f(\tau)$, где под оператором A понимается краевая задача (1)–(4).

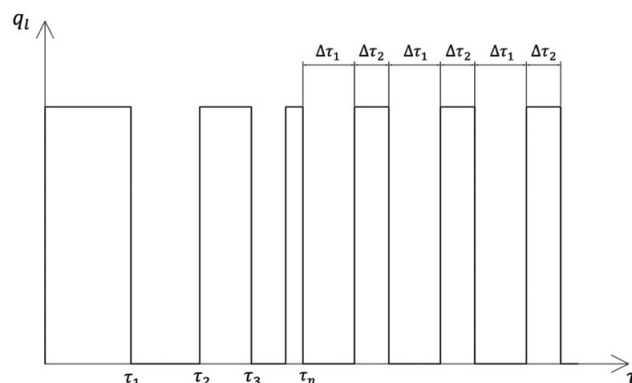


Рис. 2. Зависимость теплового потока лазера q_l от времени τ

Введем в рассмотрение среднеквадратичный функционал невязки расчетных и экспериментально измеренных температур, и тогда обратную задачу, следуя принципу итерационной регуляризации, можно переформулировать в экстремальной постановке [9]: необходимо определить $\bar{u} = \{\alpha, q_{\max}\}$, при котором выполняется условие

$$J(\bar{u}) = \int_0^{\tau_m} (A\bar{u} - f)^2 dt \leq \delta^2. \quad (5)$$

Обычно реализация подобного подхода осуществляется методом сопряженных градиентов [9]. В тех случаях, когда определяемые характеристики разнородны, скалярная линейная оценка значения α^S приводит к существенному ухудшению сходимости итерационного процесса. Однако в тех случаях, когда определяемые характеристики постоянны, т.е. $u_i = p_i, i = 1, N_u$, и случае векторной оценки $(\alpha_i^S)_1^{N_u}$, теряется смысл вычисления вектора $J'_{p_k}, k=1, N_p$, т.е. изменение значения неизвестной характеристики на каждой итерации полностью определяется вектором глубины спуска $\bar{\alpha}^S$.

Предположим, что минимизация функционала (5) осуществляется методом последовательных приближений. На каждой итерации задается величина $\Delta\bar{u}^S$ из условия

$$J(\Delta\bar{u}^{S+1}) = \min J(\bar{u}^S + \Delta\bar{u}^S) \Big|_{\Delta u \in R^{N_u}}, N_u = 2,$$

где s – номер итерации, $\Delta\bar{u}^S$ – приращение вектора неизвестных параметров на итерации s .

Условие (2) представляет собой задачу минимизации функции двух переменных. Практика решения различных обратных задач показала, что весьма эффективным является использование линейной оценки приращения $\Delta\bar{u}^S$ [9]. В этом случае $\Delta\bar{u}^S$ определяется из условия

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta\bar{u}}(\bar{u}^S + \Delta\bar{u}^S) = 0$$

или

$$2 \int_0^{\tau_m} (A(\bar{u} + \Delta\bar{u}^S) - f)(A)_{\bar{u}}' \bar{e} dt = \\ = 2 \int_0^{\tau_m} (A(\bar{u}^S) + ((A)_{\bar{u}}' \bar{e})^T \Delta\bar{u}^S + O(\|\Delta\bar{u}^S\|) - f)(A)_{\bar{u}}' \bar{e} dt,$$

где $\bar{e} = \{e_i\}_1^{N_u}$ – единичный вектор, $N_u = 2$.

Отсюда получаем систему линейных алгебраических уравнений:

$$-\int_0^{\tau_m} (A(\bar{u}^S) - f)(A)_{\bar{u}}' \bar{e} dt = \int_0^{\tau_m} (A)_{\bar{u}}' \bar{e} ((A)_{\bar{u}}' \bar{e})^T \Delta\bar{u} dt$$

или

$$-\int_0^{\tau_m} (A_m(\bar{u}^S) - f_m)(A_m)'_{\bar{u}_i} e_i dt = \\ = \sum_{k=1}^{N_u} \int_0^{\tau_m} (A_m)'_{u_k} e_k (A_m)'_{u_i} e_i \Delta u_k dt, i = \overline{1, 2}. \quad (6)$$

Остается лишь получить выражения для $(A_m)'_{u_i}$. Следуя подходу, рассмотренному в [9], предположим, что неизвестная характеристика u_i получила приращение Δu_i , при этом некоторое приращение $\theta^i(x, \tau)$ получит и поле температур в рассматриваемой системе. С точностью порядка $O(\theta^i)$ приращение $\theta^i(x, \tau)$ удовлетворяет следующей задаче:

$$C \frac{\partial \theta^i}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 \theta^i}{\partial x^2} + \delta_i^\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (7)$$

$$\theta^i(x, 0) = 0, x \in (0, d), \quad (8)$$

$$\lambda \frac{\partial \theta^i}{\partial x}(0, \tau) - \delta_i^\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(0, \tau) = \\ = \delta_i^q (T(0, \tau) - T_e(\tau) + \alpha \theta^i(0, \tau)), \quad (9)$$

$$\lambda \frac{\partial \theta^i}{\partial x}(d, \tau) - \delta_i^\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(d, \tau) = \\ = \delta_i^a (T(d, \tau) - T_e(\tau) + \alpha \theta^i(d, \tau)), \quad (10) \\ i = 1, 2,$$

где

$$\delta_i^a = \begin{cases} 1, & u_i = \alpha \\ 0, & u_i \neq \alpha \end{cases}, \\ \delta_i^q = \begin{cases} 1, & u_i = q_{\max} \\ 0, & u_i \neq q_{\max} \end{cases}.$$

В работе [9] показано что $((A_m)'_{u_i} \Delta u_i) = \theta_{mi}(X_m, \tau)$, где θ_{mi} – решение системы (7)–(10).

Система (6) может быть переписана в следующем виде:

$$\sum_{k=1}^{N_u} \left(\int_0^{\tau_m} \tilde{\theta}^k(0, \tau) \tilde{\theta}_m^i(0, \tau) dt \right) du_k = \\ = - \int_0^{\tau_m} (T(0, \tau) - f(\tau)) \tilde{\theta}^i(0, \tau) dt, i = 1, 2, \quad (11)$$

где $\tilde{\theta}^i, i = \overline{1, N_u}$, – решение краевой задачи (7)–(10) при $\Delta u_i = 1$. Система алгебраических уравнений (11) имеет симметричную матрицу и может быть решена методом квадратного корня.

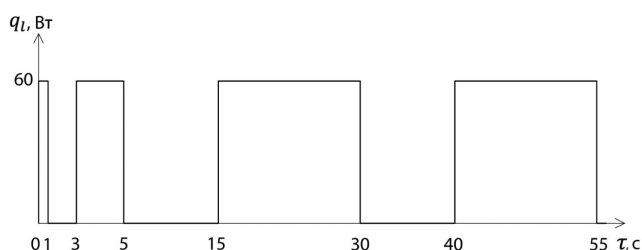


Рис. 3. Заданная зависимость теплового потока лазера q_l от времени τ

Итерационный процесс строится следующим образом:

- 1) задается начальное приближение искомых характеристик (нулевое или основанное на априорной информации);
- 2) решается прямая краевая задача и система задач для приращения температуры; вычисляется приращение неизвестных характеристик $\Delta \bar{u}^S$ и значение минимизируемого функционала $J(\bar{u}^{S+1})$;
- 3) проверяется условие окончания итерационного процесса и, если оно не удовлетворено, происходит возврат к п. 2 [9].

Эффективность предложенного алгоритма анализировалась при определении радиационно-оптических характеристик терморегулирующих покрытий космических летательных аппаратов. Проведенные численные исследования показали возможность использования критерия невязки для останова итерационного процесса.

3. Апробация разработанного алгоритма путем вычислительного эксперимента

Для решения конкретной задачи теплообмена и определения теплофизических характеристик

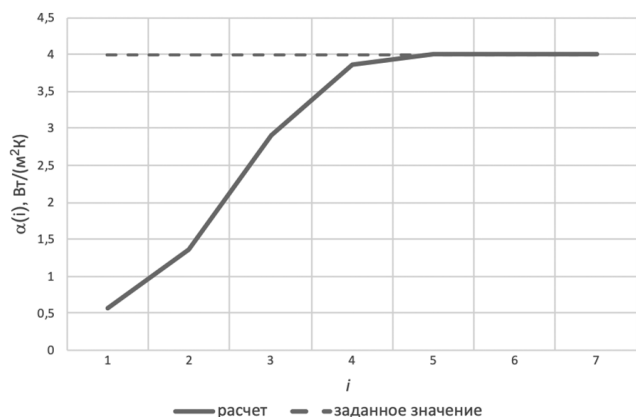


Рис. 4. Зависимость значения восстанавливаемого коэффициента теплоотдачи α от номера итерации i при $\alpha_0 = 0.05$ Вт/(м²·К)

тик материала были использованы следующие исходные данные.

Тепловой поток q_l , нормально падающий на поверхность образца, задается массивом времен включения/выключения источника $\tau_i(c)$, $i = 1..5$, $\tau = \{1, 3, 5, 10, 15\}$

так, что:

$$\begin{aligned}
 q_l &= q_{\max} \text{ при } 0 \leq \tau < 1, \\
 q_l &= 0 \text{ при } 1 \leq \tau < 3, \\
 q_l &= q_{\max} \text{ при } 3 \leq \tau < 5, \\
 q_l &= 0 \text{ при } 5 \leq \tau < 15, \\
 q_l &= q_{\max} \text{ при } 15 \leq \tau < 30, \\
 q_l &= 0 \text{ при } 30 \leq \tau < 40, \\
 q_l &= q_{\max} \text{ при } 40 \leq \tau < 55
 \end{aligned}$$

и т. д.

График зависимости теплового потока q_l от времени τ представлен на рис. 3.

Начальная температура образца $T = 36.6$ °С; температура окружающей среды $T_1 = 25$ °С; время нагрева $\tau_{\text{нагр}} = 500$ с.

Значения теплофизических характеристик материала образца: коэффициент теплоотдачи $\alpha = 4$ Вт/(м²·К); теплоемкость $C = 1000$ Дж/(кг·К); коэффициент теплопроводности $\lambda = 0.5$ Вт/(м·К).

В работе были восстановлены коэффициент теплоотдачи α и амплитуда теплового потока q_{\max} для нескольких значений начальных приближений α_0 и q_0 . На рис. 4, 5 представлены значения восстанавливаемых характеристик на каждой итерации вычисления.

Начальные приближения характеристик: $\alpha_0 = 0.05$, $q_0 = 15$.

Вычислительный эксперимент, помимо прочего, позволяет определить влияние различных погрешностей на результат решения задачи.

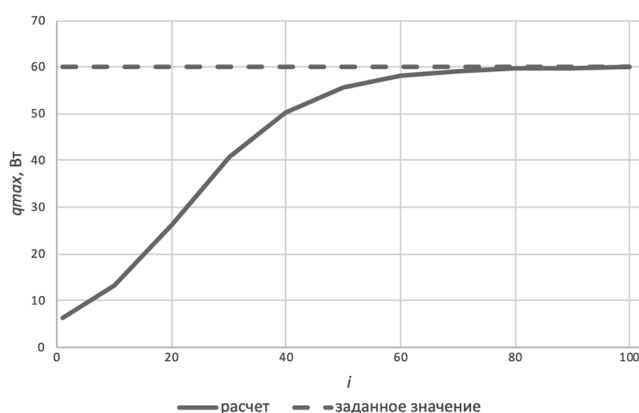


Рис. 5. Зависимость значения восстанавливаемой амплитуды теплового потока q_{\max} от номера итерации i при $q_0 = 15$ Вт

В данной работе было исследовано влияние погрешности измерения температуры поверхности образца $f(\tau)$ на точность определения коэффициента теплоотдачи α .

Моделируемая погрешность $f_n(\tau)$ имеет нормальное распределение и задается коэффициентом D , определяющим относительную максимальную амплитуду.

Таким образом, показания термодатчика можно представить в виде

$$\tilde{f}(\tau) = f(\tau) + f_n(\tau).$$

На рис. 6 представлена полученная зависимость погрешности определения коэффициента теплоотдачи на последней итерации вычисления от амплитуды нормально распределенной погрешности измерения температуры.

Рис. 7 демонстрирует значения восстанавливаемой характеристики на каждой итерации для трех значений D : 0, 0.15 и 0.3.

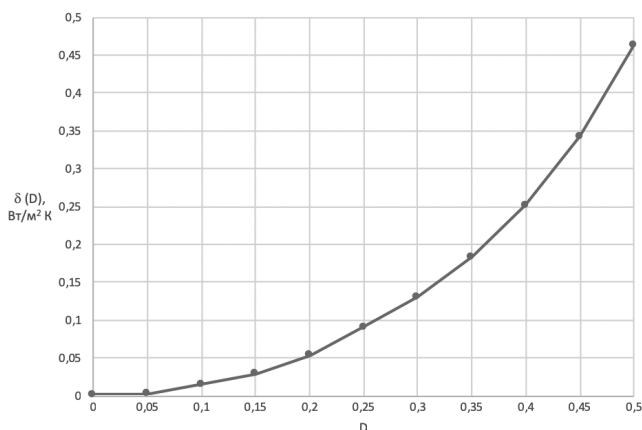


Рис. 6. Зависимость погрешности определения коэффициента теплоотдачи δ от значения относительной величины максимальной погрешности измерения температуры на поверхности образца D

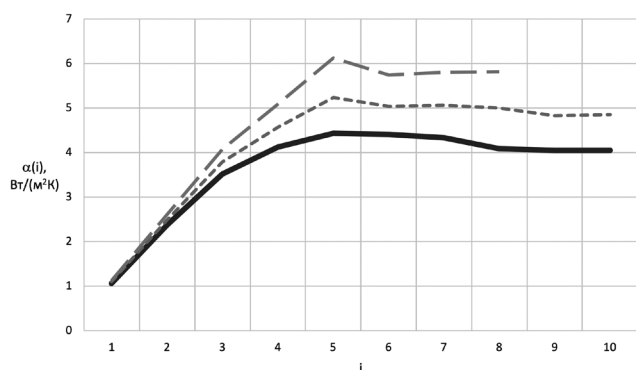


Рис. 7. Зависимость значения коэффициента теплоотдачи α от номера итерации i для $D=0, 0,15, 0,30$

Заключение

В работе был исследован процесс импульсного нагрева непрозрачного материала лазером. Измерения температуры при этом проводились в условиях, когда не представляется возможным применение контактных датчиков измерения температуры, в том числе термопары на поверхности образца, что свойственно пористым материалам.

Получены следующие результаты:

- сформулирована математическая модель, описывающая нестационарный процесс нагрева непрозрачного образца;

- разработана программа для восстановления коэффициента теплоотдачи и амплитуды теплового потока лазера;

- при помощи разработанного программного обеспечения проведена апробация разрабатываемого метода путем вычислительного эксперимента;

- моделировалась погрешность датчика измерения температуры и исследовано ее влияние на решение задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Camerin M., Rello S., Vilanueva A., Ping X., Kenney M. E., Rodgers M. A. J., Jori G. Photothermal sensitisation as a novel therapeutic approach for tumours: studies at the cellular and animal level // Eur. J. Cancer. 2005. V. 41. N 8. P. 1203–1212. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2005.02.021>
2. Шульман З. П., Хусид Б. М., Файн И. В. Теоретический анализ тепловых процессов в живой биоткани при локальной гипертермии. I. Биотепловое уравнение и локальная гипертермия // Инженерно-физический журнал. 1995. Т. 68. № 1. С. 75–86.
3. Кишшт Н. В., Кишшт Д. Н. Гемодинамика и теплоперенос при общей управляемой гипертермии: моделирование процессов // Инженерно-физический журнал. 2008. Т. 81. № 6. С. 1188–1197.
4. Шульман З. П., Хусид Б. М., Файн И. В. Теоретический анализ тепловых процессов в живой биоткани при локальной гипертермии. II. Анализ температурных полей при локальной СВЧ-гипертермии опухолей с учетом нестационарной нелинейной перфузии тканей // Инженерно-физический журнал. 1995. Т. 68. № 3. С. 430–437.
5. Драгун В. Л., Данилова-Третьяк С. М., Губарев С. А. Моделирование нагрева биологических тканей при УВЧ-терапии // Инженерно-физический журнал. 2005. Т. 78. № 6. С. 106–111. doi.org/10.1007/s10891-005-0036-3
6. Luchakov Yu. I., Shabanov P. D. Transport of heat through the skin // Reviews on Clinical Pharmacology and Drug Therapy. 2017. T. 15. № 1. P. 68–71. <http://dx.doi.org/10.17816/RCF15168-71>
7. Dombrovsky L. A., Timshenko V., Jackson M. Indirect heating strategy for laser induced hyperthermia: An ad-

vanced thermal model // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2012. V. 55. P.4688–4700. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.04.029>

8. **Dombrovsky L.A., Lipinski W.** Simple methods for identification of radiative properties of highly-porous ceria ceramics in the range of semi-transparency // International Journal

of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow. 2017. V. 27. Iss. 5. С. 1108–1117. <https://doi.org/10.1108/HFF-12-2015-0518>

9. **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.

Identification of heat transfer mathematical models based on non-contact measurements

A. V. Nenarokomov¹, D. S. Semenov¹, L. A. Dombrovsky²

¹*Moscow Aviation Institute (Aerospace University), Moscow*

²*Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow*

e-mail: semenov_ds@icloud.com

Mathematical model application adequate enough to the real heat transfer process in biological tissues is necessary to solve the problem of individual thermal protection structure optimization. Indirect measurements, usually leading to the necessity of solving the inverse heat exchange problems, are the only way to solve this problem. The paper considers one-dimensional problem of an opaque material periodic heating by the pulsed laser irradiation in the presence of convective heat exchange with an external medium on the surface of a material. Property package definition of a heat insulating material in conditions of non-stationary heating based on the reverse heat exchange problem solution is the purpose of research. The considered system is an unlimited opaque flat plate affected on its left border by the laser heat flux, acting orthogonal to a surface. Heat exchange with external medium takes place both on the left and right borders. The article proposes a modified algorithm for inverse problem solving on determining characteristics of thermal exchange on the surface, accounting for a priori information on the fact that the characteristics being determined are constant. As additional information necessary for mathematical model identification at the unknown thermo-physical characteristics, non-contact temperature measurements on the sample surface are employed. Method of iterative regularization is one of the most versatile methods of the ill-posed inverse heat exchange problems. From the computation general sequence viewpoint, such iteration algorithms are built according to the traditional optimization procedure based on the gradient methods. As applied to the problem numerical solution the following procedure is applied: the initial approximation of the unknown characteristic is set (zero, or based on a priori information); then the direct boundary problem and a system of problems for the temperature increment were being solved; the unknown characteristics increment and the value of the minimized functional are being computed, and the condition of iterative process completion is checked. The presented work studied the process of impulse heating of an opaque material by laser. The temperature measurements herewith were performed in conditions when contact temperature measuring sensors application was not possible, including thermocouples on the sample surface, which is peculiar to the porous materials. The authors formulated a mathematical model, describing the non-stationary process of an opaque sample heating. A program for the heat transfer coefficient and a laser thermal flux restoring was developed. Approximation of the method under development by the computational experiment was performed applying the developed software. In addition, the temperature measurement sensor error was modeled and its impact on the problem solution was studied.

Keywords: mathematical models identification, inverse heat transfer problem, radiation-conductive heat transfer, non-contact temperature measurements.

REFERENCES

1. **Camerin M., Rello S., Vilanueva A., Ping X., Kenney M.E., Rodgers M.A.J., Jori G.** Photothermalsensitization as a novel therapeutic approach for tumours: studies at the cellular and animal level. *Eur. J. Cancer.*, 2005, vol. 41, no. 8, pp. 1203–1212. doi.org/10.1016/j.ejca.2005.02.021
2. **Shul'man Z.P., Khusid B.M., Fain I.V.** Teoreticheskij analiz teplovykh protsessov v zhivoj biotkani pri lokal'noj gipertermii. I. Bioteplovoe uravnenie i lokal'naya gipertermiya [Theoretical analysis of thermal processes in living biotissue with local hyperthermia. I. Biothermal equation and local hyperthermia]. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal – Journal of engineering physics and thermophysics*, 1995, vol. 68, no. 1, pp. 75–86. In Russ.

3. **Kinsht N. V., Kinsht D. N.** Hemodynamics and heat transfer in controlled whole-body hyperthermia: Modeling of processes. *Journal of Engineering Physics*, 2008, vol. 81, no. 6, pp. 1232–1241. doi.org/10.1007/s10891-009-0142-8
4. **Shul'man Z. P., Khusid B. M., Fain I. V.** Teoreticheskij analiz teplovykh protsessov v zhivoj biotkani pri lokal'noj gipertermii. II. Analiz temperaturnykh polej pri lokal'noj SVCH-gipertermii opukholej s uchetom nestatsionarnoj nelinejnoj perfuzii tkanej [Theoretical analysis of thermal processes in living biotissue with local hyperthermia. II. Analysis of temperature fields in local microwave hyperthermia of tumors with regard to non-stationary non-linear tissue perfusion]. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal – Journal of engineering physics and thermophysics*, 1995, vol. 68, no. 3, pp. 430–437. In Russ.
5. **Dragun V. L., Danilova-Tret'yak S. M., Gubarev S. A.** Simulation of heating of biological tissues on the process of ultrahigh-frequency therapy. *Journal of Engineering Physics*, 2005, vol. 78, no. 1, pp. 109–114. doi.org/10.1007/s10891-005-0036-3
6. **Luchakov Yu. I., Shabanov P. D.** Perenos tepla v kozhe [Transport of heat through the skin]. *Obzory po klinicheskoj farmakologii i lekarstvennoj terapii – Reviews on Clinical Pharmacology and Drug Therapy*, 2017, vol. 15, no. 1, pp. 68–71. In Russ. http://dx.doi.org/10.17816/RCF15168-71
7. **Dombrovsky L. A., Timshenko V., Jackson M.** Indirect heating strategy for laser induced hyperthermia: An advanced thermal model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, vol. 55, iss. 17–18, pp. 4688–4700. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.04.029
8. **Dombrovsky L. A., Lipinski W.** Simple methods for identification of radiative properties of highly-porous ceria ceramics in the range of semi-transparency. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2017, vol. 27, no. 5, pp. 1108–1117. https://doi.org/10.1108/HFF-12-2015-0518
9. **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 inverse heat transfer problems]. Moscow: Nauka, 1988. 288 p. In Russ.

Учредитель и издатель журнала:

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-72651 от 16.04.2018

Редактор Бублик Н.П., e-mail: tpt@mai.ru

Оригинал-макет и электронная версия изготовлены в МАИ.

Сдано в набор 09.11.2018. Подписано в печать 06.12.2018.

Формат 60×88 1/8. Печать цифровая. Усл. печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. 12,14. Тираж 50 экз. «Свободная цена».

Отпечатано в ООО «Печатный салон ШАНС»