

ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ ДЛЯ ОБРАЗЦОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Численно решена задача теплопроводности при локальном воздействии на поверхность цилиндрического образца теплового импульса малой длительности при форме области нагрева в виде круга. Проведена оценка масштабов погрешностей определения теплофизических характеристик материала импульсным методом при наличии лучистого теплообмена с окружающей средой.

E-mail: Katz@tpu.ru

Ключевые слова: теплофизические характеристики, импульсный метод, методические погрешности, численное решение, цилиндрическая система координат.

Известно [1–3], что в основе теории метода лазерного импульса, используемого для экспериментального определения теплофизических характеристик (ТФХ) материала — коэффициента теплопроводности λ , температуропроводности a , удельной теплоемкости c , — приняты допущения, приводящие к погрешностям. Получены оценки влияния на точность определения значений теплофизических характеристик следующих факторов: типа материала [4], неоднородности процесса теплопроводности в образце конечных размеров [5], продолжительности импульса лазерного излучения [6]. При этом численное моделирование проводилось с использованием декартовой системы координат в предположении прямоугольного поперечного сечения лазерного луча.

В реальных методиках импульсного определения ТФХ материалов используются образцы не только в форме параллелепипеда, но и в форме цилиндра, а лазерный луч в поперечном сечении, как правило, представляет собой круг.

Целью данной работы является теоретическая оценка погрешностей метода лазерного импульса, обусловленных наличием лучистого теплообмена с торцевых поверхностей образца, при использовании численного решения двумерной задачи нестационарной теплопроводности в цилиндрической системе координат.

Постановка задачи. Область решения задачи представляет сплошной цилиндр (рис. 1) радиусом r_0 и высотой z_0 , участок границы $z = 0$ которого нагревается мощным импульсом энергии q продолжительностью $\tau_{\text{имп}}$. Учитывается лучистый теплообмен с окружающей средой по закону Стефана–Больцмана с торцевых поверхностей образца.

Приняты следующие обозначения: r, z — текущие координаты; r_n — радиус лазерного луча; ε — приведенная степень черноты поверхности материала; σ — постоянная Стефана–Больцмана; T_0, T, T_e — начальная, текущая температуры и температура окружающей среды.

Задача решалась при использовании безразмерных переменных в осесимметричной постановке. Параметрам $z, r, z_0, r_0, r_n, T_0, T, T_e$ соответствуют их безразмерные (см. рис. 1) аналоги $Z = z/z_0; R = r/z_0; Z_0 = 1; R_0 = r_0/z_0; R_n = r_n/z_0; \theta = T/T_e; \theta_0 = T_0/T_e$. При этом введены безразмерные критерии [7, 8] $D = qz_0/\lambda T_e; B = \varepsilon\sigma T_e^3 z_0/\lambda; Fo = at/z_0^2$, где Fo — критерий Фурье; t — время.

Задача сводится к решению нестационарного уравнения теплопроводности с соответствующими граничными и начальным условиями:

$$\frac{\partial T}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial \theta}{\partial R} \right), \quad 0 < R < R_0, \quad 0 < Z < 1; \quad (1)$$

при $Z = 0$

$$-\left(\frac{\partial \theta}{\partial Z}\right) = D + B_1 \theta, \quad R \leq R_n, \quad Fo \leq Fo_{\text{имп}}; \quad (2)$$

$$-\left(\frac{\partial \theta}{\partial Z}\right) = B_1 \theta, \quad R > R_n, \quad Fo > 0; \quad (3)$$

$$-\left(\frac{\partial \theta}{\partial Z}\right) = B_1 \theta, \quad Fo > Fo_{\text{имп}}; \quad (4)$$

при $Z = Z_0$

$$-\left(\frac{\partial \theta}{\partial Z}\right) = B_2 \theta, \quad 0 < R < R_0, \quad Fo > Fo_{\text{имп}}; \quad (5)$$

при $R = 0$

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial R}\right) = 0, \quad 0 < Z < 1, \quad Fo > 0; \quad (6)$$

при $R = R_0$

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial R}\right) = 0, \quad 0 < Z < 1, \quad Fo > 0. \quad (7)$$

$$\text{При } Fo = 0 \quad \theta = 1. \quad (8)$$

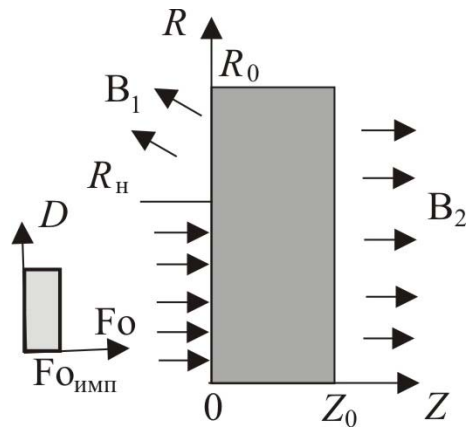


Рис. 1. Схема области решения

Особенность рассматриваемой постановки задачи — это высокое значение плотности теплового потока в граничном условии (2) и нелинейность граничных условий (2), (3). В реально возможном диапазоне изменения условий воздействия лазерного излучения на материалы в тонком приповерхностном слое образца формируются большие градиенты температур. При численном моделировании такого процесса возникает необходимость верификации разрабатываемых методик и алгоритмов численного решения задачи. С этой целью проводились специальные численные комплексные исследования для выбора сеточных параметров, исходя из условия баланса энергии в области решения.

Для решения системы уравнений (1)–(8) использован метод конечных разностей [8]. Разностные аналоги дифференциального уравнения и краевых условий решены методом прогонки с использованием невязной итерационной четырехточечной разностной схемы [9].

Результаты и обсуждение. Численный анализ проводили для типичного конструкционного материала — стали 10 [10] с теплофизическими характеристиками: $\lambda = 46 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; удельная теплоемкость $c = 460 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; плотность $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$. Значение теплового импульса q принято равным $4,25 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$, продолжительность импульса $0,0015 \text{ с}$. Начальная температура $T_0 = 293 \text{ К}$. Размеры образца: $r_0 = 0,0045 \text{ м}$, $z_0 = 0,002 \text{ м}$.

В работе [5] показано, что отношение площадей нагреваемой поверхности и лазерного нагрева должно быть минимальным для минимизации погрешностей определения ТФХ материалов при проведении эксперимента методом лазерного импульса. Однако для исключения краевых эффектов взаимодействия лазерного излучения с изоляционным слоем площади поверхности и лазерного нагрева должны отличаться хотя бы на 10%. Поэтому радиус круга лазерного нагрева при численном моделировании принят $r_n = 0,004 \text{ м}$ при $r_0 = 0,0045 \text{ м}$.

При расчетах использовали разностную сетку с минимальными шагами по безразмерному времени Fo (10^{-5}) и по пространству (до $h = 5 \cdot 10^{-4}$).

На рис. 2 и 3 приведены результаты расчетов температурного поля $\theta(Z, R)$ и положения характерных изотерм в плоскости оси лазерного луча при отсутствии теплообмена с внешней средой ($B_1 = B_2 = 0$) и $Fo = 0,032$. Из рис. 2 видно, что при воздействии лазерного импульса распространение теплоты осуществляется не только вдоль оси Z , но и по радиальному направлению R . При этом температурный профиль имеет ярко выраженный максимум в центре действия лазерного луча (рис. 3).

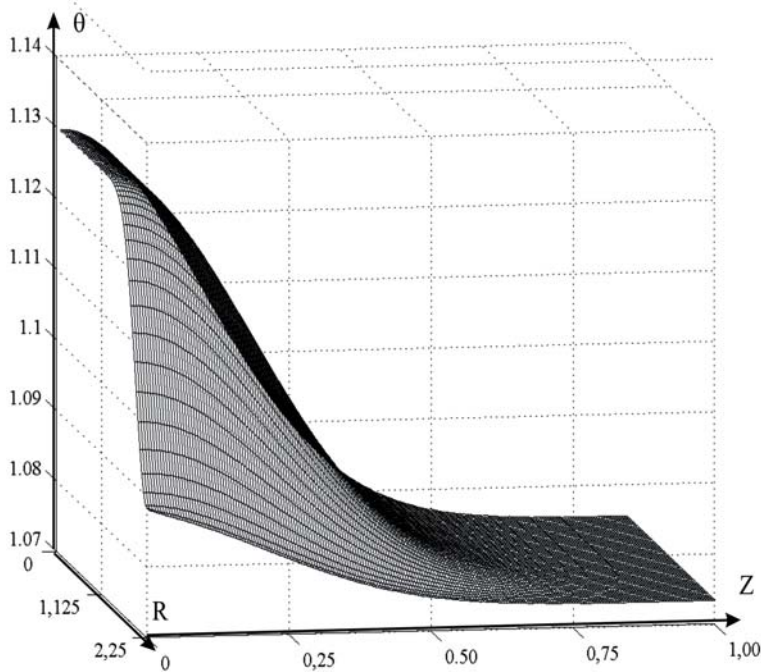


Рис. 2. Температурное поле $\theta(Z, R)$ в образце стали при $B_1 = B_2 = 0$, $Fo=0,032$

Полученные результаты позволяют сделать обоснованный вывод о существенно неодномерном процессе распространения теплоты в исследуемой системе и его влиянии на погрешности определения ТФХ материала.

При численном решении задачи установлено, что при отсутствии теплообмена с окружающей средой погрешность определения удельной теплоемкости δc стали, обусловленная неодномерностью процесса теплопереноса в исследуемой системе, при безразмерных радиусах образца $R_0 = 2,25$ и источника нагрева $R_n = 1,25$ составляет около 12 %, а погрешности коэффициентов температуропроводности δa и теплопроводности $\delta \lambda$ соответственно 6 и 18 %.

Учет лучистого теплообмена с торцевых поверхностей образца приводит, как и следовало ожидать, к увеличению суммарной погрешности. В таблице приведены зависимости

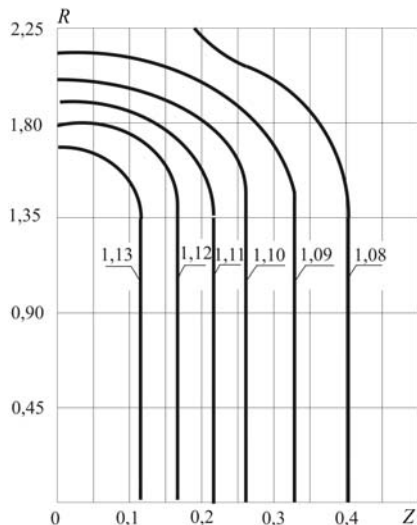


Рис. 3. Положение характерных изотерм в плоскости оси лазерного луча при $B_1 = B_2 = 0$ и $Fo = 0,032$

погрешностей определения удельной теплоемкости, коэффициентов температуропроводности и теплопроводности от значения критерия B в характерном диапазоне изменения степени черноты рассматриваемой стали $B = 2 \times 10^{-5} \dots 3,61 \cdot 10^{-5}$ ($\varepsilon = 0,4 \dots 0,72$).

Погрешности определения ТФХ стали в зависимости от критерия B

Погрешность, %	$B \cdot 10^5$					
	0	2,00	2,41	2,81	3,21	3,61
δc	11,56	11,62	11,63	11,64	11,65	11,66
δa	6,38	6,45	6,51	6,56	6,59	6,61
$\delta \lambda$	17,94	18,08	18,14	18,20	18,24	18,27

Из таблицы видно, что с увеличением степени черноты значения погрешностей ТФХ стали незначительно возрастают и достигают для удельной теплоемкости, коэффициентов температуропроводности и теплопроводности значений 12, 6,6 и 18 % соответственно при значении критерия $B = 3,61 \cdot 10^{-5}$.

Проведенный анализ основывался на результатах расчетов при умеренных значениях температуры и степени черноты. В реальных условиях при локальном разогреве поверхности образца до температуры свыше 1000 К и использовании более мощного источника нагрева интенсивность лучистого теплообмена в окрестности зоны нагрева может быть существенно выше, что приведет к увеличению погрешностей ТФХ материала.

Выводы. На основе результатов численного моделирования температурных полей в образце металла в условиях, соответствующих условиям определения теплофизических характеристик материала импульсным методом лазерного воздействия, установлено, что погрешности вычисления удельной теплоемкости, температуропроводности и теплопроводности материала при форме области нагрева в виде круга могут достигать 18 % при отсутствии теплообмена с внешней средой. С увеличением теплообмена на поверхностях образца эти погрешности незначительно возрастают и достигают 18,3 % при значении критерия лучистого теплообмена $B = 3,61 \cdot 10^{-5}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P a r k e r W. J., et al. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity // J. Appl. Phys. – 1961. – Vol. 32, no. 9. – P. 1675.
2. B a b a T., O n o A. Improvent of the laser flash method to reduce uncertainty in thermal diffusivity measurements // Meas. Shience Technology. – 2001. – No. 12. – P. 2046.
3. A k o s h i m a M., B a b a T. Study on a thermal-diffusivity standard for laser flash method measurements // Intern. J. Thermophys. – 2006. – Vol. 27, no. 4. – P. 1189.

4. Кузнецов Г. В., Кац М. Д. Анализ погрешностей определения импульсными методами теплофизических характеристик конструкционных материалов // Изв. ТПУ. – 2008. – Т. 312. – № 4. – С. 10.
5. Кузнецов Г. В., Кац М. Д. Теоретический анализ методических погрешностей определения теплофизических характеристик конструкционных материалов импульсным методом в образце конечных размеров // Измерительная техника. – 2009. – № 4. – С. 34.
6. Кузнецов Г. В., Кац М. Д. Анализ погрешности определения теплофизических характеристик конструкционных материалов импульсным методом при конечной длительности импульса лазерного луча // Инженерная физика. – 2009. – № 8. – С. 3.
7. Теплообмен в ядерных энергетических установках / Б.С. Петухов, Л.Г. Генин, С.А. Ковалев. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
8. Кутателадзе С. С. Анализ подобия и физические модели. – Новосибирск: Наука, 1986.
9. Самарский А. А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983.
10. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. – М.: Атомиздат. 1968.

Статья поступила в редакцию 21.05.2010

Гений Владимирович Кузнецов родился в 1949 г., в 1972 г. окончил Томский государственный университет. Д-р. физ.-мат. наук, декан теплоэнергетического факультета Томского политехнического университета, профессор кафедры теоретической и промышленной теплотехники. Автор 182 научных работ в области теплоэнергетики, промышленной теплотехники, энергосбережения, конвективно-кондуктивного теплопереноса, математического моделирования процессов теплообмена.

G.V. Kuznetsov (b. 1949) graduated from the Tomsk State University in 1972. D. Sc. (Phys.-Math.), dean of heat-power engineering faculty, professor of department for theoretical and industrial heat engineering of the Tomsk Polytechnic University. Author of 182 publications in the field of heat engineering, power saving, convective-conductive heat transfer, mathematical simulation of heat exchange processes.

Марк Давыдович Кац родился в 1947 г., в 1970 г. окончил Томский политехнический институт. Канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов Томского политехнического университета. Автор 21 научной работы в области теплоэнергетики, теплофизических измерений, математического моделирования процессов теплообмена.

M.D. Kats (b. 1947) graduated from the Tomsk Polytechnic Institute in 1970. Ph. D. (Phys.-Math.), senior teacher of department for automation of heat power engineering processes of the Tomsk Polytechnic University. Author of 21 publications in the field of heat engineering, thermal measurements, mathematical simulation of heat exchange processes.