

## Погрешности определения теплофизических характеристик полупрозрачных материалов импульсным методом

Г. В. КУЗНЕЦОВ, М. Д. КАЦ

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Томск, Россия, e-mail: Katz@tpu.ru

Проведена оценка погрешностей определения теплофизических характеристик полупрозрачного материала импульсным методом путем сравнения результатов численного решения задачи о нестационарном температурном поле образца при воздействии на его поверхность коллимированного лазерного импульса конечной длительности и истинных значений температуропроводности, теплопроводности и удельной теплоемкости.

**Ключевые слова:** теплофизические характеристики, импульсный метод, методические погрешности, численное решение, полупрозрачный материал, коэффициент поглощения.

*The estimation of errors of semitransparent materials' thermophysical properties' pulse method determination by comparison of the results of numerical solution of the sample nonstationary temperature field with surface exposed by collimated laser pulse of finite duration and the true values of temperature conductivity, heat conductivity, and specific heat capacity is carried out.*

**Key words:** thermophysical characteristics, pulse method, methodical errors, numerical solution, semitransparent material, absorption coefficient.

Метод лазерного импульса (лазерной вспышки) [1] — один из наиболее перспективных способов определения теплофизических характеристик (ТФХ) материалов и веществ [2—4]. Известный интерес представляет использование этого метода и для определения ТФХ частично прозрачных материалов, образующих широкий класс диэлектриков и полупроводников [5]. Процесс нагрева таких материалов связан не только с поверхностным, но и с объемным поглощением теплового потока в определенных областях спектра, зависящих от длины волны теплового излучения.

Условия применения метода лазерного импульса для определения температуропроводности образцов частично прозрачных материалов рассмотрены в [6—8]. Влияние «радиационных граничных условий» на вид термограммы «холодной» границы стекла исследовано в [6]. Установлено, что для образцов с поверхностями, покрытыми золотом (низкая теплоотдача), возможно определение температуропроводности материала методом лазерной вспышки. В [7] исследовано влияние толщины образца и граничных условий на определение температуропроводности стекла импульсным методом. Анализ теплообмена для рассеивающей среды, нагреваемой диффузным и коллимированным потоками излучения, проведен в [8]. Показано, что при малых длительностях импульса лазерного нагрева анализ процессов теплопереноса можно проводить в рамках линейных по теплопроводности моделей.

Однако до настоящего времени методические погрешности определения ТФХ полупрозрачных материалов методом лазерной вспышки не анализировали. Возможное дополнительное поглощение энергии, поступающей к нагреваемой поверхности образца из его глубинных слоев при радиационном теплопереносе, может приводить к росту погрешностей определения теплофизических характеристик по сравнению с установленными ранее [9, 10].

Цель данной работы — анализ погрешностей определения ТФХ материалов с применением метода лазерного им-

пульса [1], обусловленных изменением коэффициента поглощения в области частичной прозрачности спектра теплового излучения.

В предположении, что материал и граничные поверхности образца являются серыми, численно решена одномерная задача о нестационарном температурном поле бесконечной пластины при воздействии на ее поверхность коллимированного лазерного излучения конечной длительности  $\tau_{\text{имп}}$  при отсутствии теплообмена на «горячей» и «холодной» границах.

Погрешности вычислений ТФХ материала методом лазерного импульса определяли, как и в [10], из сравнения справочных значений этих характеристик со значениями, полученными в результате численного моделирования условий реализации экспериментов по определению ТФХ материалов рассматриваемым методом, при реальных длительностях лазерного воздействия и прогрева образца, не учитываемых при постановке задачи [1].

Область решения задачи представляла пластину полупрозрачного материала толщиной  $L$  (рис. 1), участок поверх-

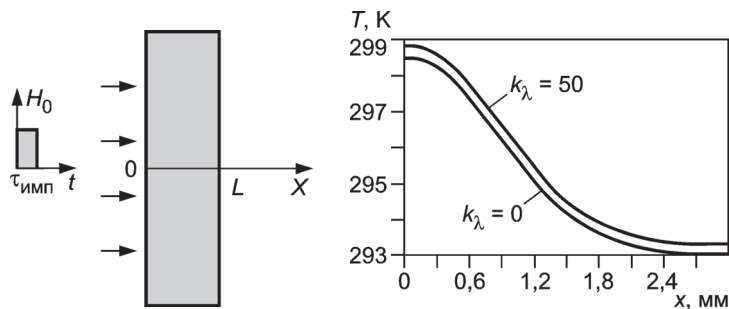


Рис. 1. Схема области решения

Рис. 2. Температурное распределение в образце германия в момент времени 10 мс при различных коэффициентах поглощения  $k_\lambda$  энергии потока лазерного излучения

ности  $x = 0$  которой нагревался коллимированным потоком энергии, направленным перпендикулярно плоскости пластины, плотностью  $H_0$  и длительностью импульса  $\tau_{\text{имп}}$ . При допущении, что собственное излучение среды мало по сравнению с внешним радиационным потоком, задача сводилась к решению уравнения энергии с граничными и начальными условиями:

$$\rho c \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} - \frac{\partial H(x)}{\partial x}; \quad (1)$$

$$x = 0: -\lambda \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = H_0 \text{ при } \tau_{\text{имп}} > t > 0$$

$$\text{и } -\lambda \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = 0 \text{ при } t > \tau_{\text{имп}};$$

$$x = L: \lambda \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = 0 \text{ при } t > 0; t = 0: T(x, 0) = T_0, \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность;  $c$  — удельная теплоемкость;  $\lambda$  — теплопроводность материала;  $dH(x)/dx$  — функция объемного лучистого источника теплоты;  $T$ ,  $T_0$  — текущая и начальная температуры;  $t$  — время.

Изменение плотности потока энергии в материале определяли по закону Бугера—Ламберта—Бера [11]:

$$H(x) = H_0 \exp(-k_\lambda x),$$

где  $H(x)$  — энергетическая плотность потока излучения, Дж/м<sup>2</sup>;  $H_0$  — поверхностная плотность потока излучения, Вт/м<sup>2</sup>;  $k_\lambda$  — коэффициент поглощения энергии коллимированного потока лазерного излучения, м<sup>-1</sup>.

Для решения дифференциального уравнения (1) и граничных условий (2) использован метод конечных разностей. Разностные аналоги дифференциального уравнения и краевых условий решены методом прогонки с применением неявной итерационной четырехточечной разностной схемы [12].

Численный анализ проведен для германия с теплофизическими характеристиками:  $\lambda = 64$  Вт/(м·К),  $c = 316,2$  Дж/(кг·К),  $\rho = 5460$  кг/м<sup>3</sup> [13] при  $T_0 = 293$  К,  $L = 0,003$  м, диапазоне длин волн области прозрачности германия 1800 — 15000 нм, что

соответствовало диапазону изменения  $k_\lambda = 0,5 \dots 50$  м<sup>-1</sup> [13].

Выбор радиационного теплового потока  $H_0 = 2 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> и длительности нагрева  $\tau_{\text{имп}} = 1,5$  мс проведен в соответствии с реальными возможными характеристиками лазерного источника в экспериментальных установках для определения ТФХ материалов, а также с учетом основного положения метода [1] — получение «температурного перегрева» на «холодной» поверхности образца не менее 3—6 К.

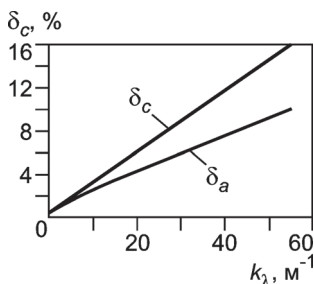


Рис. 3. Зависимости погрешностей  $\delta_c$  и  $\delta_a$  определения удельной теплоемкости и температуропроводности германия от коэффициента поглощения  $k_\lambda$

Использовалась разностная сетка с шагами по времени и пространству соответственно до 0,5 мкс и 2 мкм.

На рис. 2 приведены результаты численного моделирования процесса нагрева образца германия толщиной 3 мм в виде распределения  $T(x)$  в момент времени 10 мс при значениях коэффициента поглощения энергии потока лазерного излучения  $k_\lambda = 0$  (поглощение энергии в бесконечно малом слое фронтальной поверхности образца) и при  $k_\lambda = 50$ . Как следует из рис. 2, дополнительное поглощение энергии, поступающей в глубинные слои образца при радиационном теплопереносе, приводит к увеличению температуры.

На рис. 3 показаны зависимости погрешностей  $\delta_c$  и  $\delta_a$  определения удельной теплоемкости и температуропроводности германия от  $k_\lambda$ . Установлено, что с ростом  $k_\lambda$  погрешности  $\delta_c$  и  $\delta_a$  увеличиваются и составляют соответственно около 16 и 10 % при  $k_\lambda = 50$  м<sup>-1</sup>. В соответствии с [14] погрешность определения теплопроводности  $\delta_\lambda > \delta_a$ .

Численный анализ показывает, что при практической реализации методики определения ТФХ методом лазерного импульса [1] накладываются жесткие ограничения на коэффициент поглощения и, следовательно, на диапазон длин волн падающего излучения. Для уменьшения погрешностей  $\delta_c$  и  $\delta_a$  до минимально допустимых целесообразно уменьшать длину волны лазерного излучения, однако в реальных экспериментах это сделать достаточно трудно из-за технических характеристик используемых лазеров. Поэтому возможности метода лазерной вспышки при определении ТФХ полупрозрачных материалов существенно ограничены. Однако разработанный ранее подход [9, 10] к анализу погрешностей определения ТФХ материалов методом лазерного импульса [1] позволяет выбирать длину волны лазерного излучения, чтобы обеспечивать минимальные методические погрешности.

**Закключение.** В результате математического моделирования процессов теплопереноса в полупрозрачных материалах в условиях, соответствующих реализации метода импульсного лазерного нагрева при определении ТФХ, вычислены методические погрешности, обусловленные радиационным переносом энергии. Показана целесообразность оценки дополнительных методических погрешностей, связанных с полупрозрачностью материалов.

## Л и т е р а т у р а

1. **Parker W. J. e. a.** Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity // J. Appl. Phys. 1961. V. 32. N 9. P. 1675—1684.
2. **Akoshima M., Baba T.** Study on a thermal-diffusivity standard for laser flash method measurements // Int. J. Thermophys. 2006. V. 27. N 4. P. 1189—1203.
3. **Wei Gaosheng e. a.** Thermal diffusivity measurements on insulation materials with the laser flash method // Int. J. Thermophys. 2006. V. 27. N 1. P. 235—243.
4. **Heckman E. M., Gonzalez L. P., Guha Sh.** Measurement of optical and thermal properties of Hg[1-x]Cd[x]Te // Appl. Opt. 2008. V. 47. N 4. P. 578—582.
5. **Новицкий Л. А., Степанов Б. М.** Оптические свойства материалов при низких температурах. М.: Машиностроение, 1980.

6. Andre S., Degiovanni A. A. A theoretical study of transient coupled conduction and radiation heat transfer in glass: phonic diffusivity measurements by the flash technique // Int. Heat Mass Transfer. 1995. V. 38. N 18. P. 3401—3412.

7. Kabayabaya Th., Yu Fan, Zhang Xinxin. Thermal diffusivity measurement of glass at high temperature by using flash method // J. Therm. Sci. 2004. V. 13. N 1. P. 91—96.

8. Мерзликин В. Г., Сидоров О. В., Товстоног В. А. Метод приповерхностной лазерной обработки полупрозрачных материалов в импульсном режиме // Труды Междунар. науч. симп. «Автотракторостроение». М.: МГТУ МАМИ, 2009. С. 154—158.

9. Кузнецов Г. В., Кац М. Д. Об условиях применения импульсных методов определения теплофизических характеристик конструкционных материалов // Изв. Томск. политех. ун-та. 2008. Т. 312. № 4. С. 10—13.

10. 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. 35—37; Kuznetsov G. V., Kats M. D. Pulse method systematic errors theoretical analysis for construction materials finite samples thermophysical characteristics determination // Measurement Techniques. 2009. V. 52. N 4. P. 384—386.

11. Яворский Б. М. Справочник по физике. М.: Наука, 1990.

12. Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983.

13. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.

14. Зайдель А. Н. Погрешности измерения физических величин. Л.: Наука, 1985.

Дата принятия 28.11.2011 г.

519.233.5:532.57

## Сравнительная оценка двух методов косвенных измерений разности расходов теплоносителя

В. П. ЧИПУЛИС

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,  
Владивосток, Россия, e-mail: chipulis@vira.dvo.ru

Приведены аналитические оценки погрешности для стандартного и дифференциального методов косвенных измерений разности расходов теплоносителя. Ограничены области предпочтительного применения каждого из методов.

**Ключевые слова:** расход теплоносителя, косвенные измерения.

The analytical estimations of standard and differential methods of indirect measurements of heatcarrier consumption difference are presented. The areas of preferable application of each method are limited.

**Key words:** heatcarrier consumption, indirect measurements.

Вопросы достоверности результатов измерений при решении задач технологического и коммерческого учета тепла и теплоносителей привлекают все большее внимание в связи с быстрым ростом числа устанавливаемых приборов учета на объектах теплоэнергетики. Это вполне объяснимо, поскольку недостоверные результаты являются источником нештатных, а порой и аварийных ситуаций при технологических измерениях и приводят к существенным перекосам в финансовых отношениях между поставщиком и потребителем энергоресурсов при коммерческих измерениях.

Наиболее проблемные с точки зрения достоверности — измерения расхода теплоносителя. При этом, по всей видимости, одной из самых обсуждаемых является проблема косвенных измерений разности расходов теплоносителя для нужд горячего водоснабжения в открытых системах теплообеспечения или утечки в закрытых системах [1]. Известно, что разности расходов с использованием двух расходомеров, установленных в подающем и обратном трубопроводах системы (назовем его стандартным методом), часто достигают десятки, сотни процентов. Особенно неприятны случаи, ког-

да вследствие погрешностей расходомеров измеренная косвенным методом разность расходов отрицательна. Поэтому вполне естественно стремление избежать применения косвенных измерений, заменяя их прямыми [2]. Однако иногда косвенный метод измерения водоразбора оказывается единственным возможным. Например, на тепловых магистралях, отходящих от источника теплоты, а иногда и в других случаях иного способа измерения теплоносителя для нужд горячего водоснабжения просто не существует.

Чтобы повысить точность косвенных измерений, в [2] предложен альтернативный стандартному метод измерения разности расходов, названный дифференциальным. Не вдаваясь в детали инженерной реализации, отметим, что суть метода состоит в поочередном измерении расходов в подающем и обратном трубопроводах системы расходомерами 1 и 2 и расходомерами 2 и 1, соответственно. В [2] приведены примеры, подтверждающие существенное преимущество в точности измерений дифференциального метода над стандартным. Однако, естественно, что отдельные примеры не могут свидетельствовать об общности утверждения о достоинствах одного метода перед другим.