

# ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКОГО КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

Г. В. Кузнецов, М. Д. Кац

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

Поступила в редакцию 21.09.2012 г.

**Аннотация:** Путем сравнения результатов численного решения задачи о нестационарном температурном поле образца при воздействии на его поверхность коллимированного лазерного импульса конечной длительности и истинных значений теплопроводности, теплопроводности и удельной теплоемкости проведена оценка погрешностей определения теплофизических характеристик оптического кварцевого стекла импульсным методом.

**Ключевые слова:** теплофизические характеристики, импульсный метод, методические погрешности, численное решение, оптическое кварцевое стекло, коэффициент поглощения.

**Annotation:** By comparing the results of the numerical solution of the nonstationary temperature field of the sample when exposed to the surface of a collimated laser pulse of finite duration, and the true values of thermal diffusivity, thermal conductivity and specific heat evaluated errors in the determination of thermophysical properties of silica glass optical pulse method.

**Key words:** thermal properties, pulse method, methodological errors, numerical solution, optical quartz glass, absorption coefficient.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия повышенное внимание привлекают импульсные методы определения теплопроводности и теплопроводности, а также теплоемкости материалов в условиях достаточно высоких температур. Наибольший интерес для исследователей представляет метод лазерного импульса [1—4], сущность которого состоит в поглощении в тонком слое фронтальной («горячей») поверхности образца импульса лучистой энергии и регистрации измерения во времени температуры его обратной («холодной») поверхности.

Теплопроводность, удельная теплоемкость и теплопроводность исследуемого материала при реализации методики [1—4] вычисляются с использованием выражений.

$$a = 0,1388 \cdot L^2 / \tau_{0,5}; \quad (1)$$

$$c = Q / (T_{\max} \cdot \rho \cdot L); \quad (2)$$

$$\lambda = a \cdot c \cdot \rho, \quad (3)$$

где  $L$  — толщина образца, м;  $\rho$  — плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $a$  — теплопроводность, м<sup>2</sup>/с;  $\tau_{0,5}$  — время достижения половины максимальной температуры перегрева «холодной» (ненагреваемой) поверхности образца, с;

$c$  — теплоемкость, Дж/(кг·К);  $Q$  — энергия, поглощенная образцом, Дж/м<sup>2</sup>;  $T_{\max}$  — максимальная температура перегрева «холодной» поверхности образца относительно его начальной температуры  $T_0$ ;  $\lambda$  — теплопроводность, Вт/(м·К).

Известный интерес представляет использование этого метода для определения ТФХ оптического кварцевого стекла, характеризующегося из используемых модификаций стекол своими предельными характеристиками: высокая температура размягчения и испарения, низкий коэффициент термического расширения, высокая оптическая прозрачность и химическая стойкость [5].

Общая теория анализа процессов теплопереноса в частично прозрачных материалах разработана достаточно давно [6—8]. Возможность применения метода лазерного импульса для определения теплопроводности образцов силикатного стекла с различными присадками изучалась в [9—11]. В [9] сделан вывод, что для условий малых величин оптической толщины и низкой теплоотдачи с поверхностей образца возможно определение теплопроводности материала методом лазерного импульса. На основе разработанной аналитической модели радиационно-кондук-

тивного теплопереноса показано [10] влияние толщины образца и теплоотдачи с его поверхностей на результаты измерения температуропроводности силикатного стекла методом лазерного импульса. На основе анализа теплообмена для рассеивающей среды, нагреваемой диффузным и коллимированным потоками излучения, показано [11], что при малых длительностях импульса лазерного нагрева анализ процессов теплопереноса можно проводить в рамках линейных по теплопроводности моделей.

Однако до настоящего времени анализ величин методических погрешностей определения ТФХ оптического кварцевого стекла методом лазерного импульса не проводился. Возможная интенсификация процесса нагрева за счет радиационного теплопереноса может приводить к росту погрешностей определения теплофизических характеристик по сравнению с установленными ранее [12, 13] для непрозрачных материалов.

Целью данной работы является оценка погрешностей определения ТФХ оптического кварцевого стекла методом лазерного импульса [1], обусловленных неучитываемым при разработке метода радиационным теплопереносом в образце материала.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При постановке задачи приняты допущения, что материал и граничные поверхности образца являются серыми. Одномерная задача теплопроводности для бесконечной пластины при воздействии на ее поверхность коллимированного лазерного излучения конечной временной длительности  $\tau_{\text{имп}}$  и отсутствии теплообмена на «горячей» и «холодной» границах решена методом конечных разностей.

Погрешности вычислений ТФХ материала

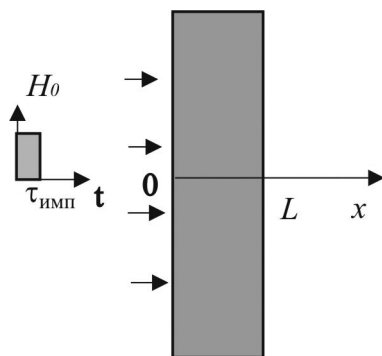


Рис. 1. Схема области решения

методом лазерного импульса определялись из сравнения справочных значений этих характеристик со значениями, полученными в результате численного моделирования условий реализации экспериментов по определению ТФХ материалов рассматриваемым методом в условиях радиационно-кондуктивного теплопереноса в образце.

Область решения представляла бесконечную пластину оптического кварцевого стекла толщиной  $L$  (рис. 1), участок поверхности  $x = 0$  которой нагревался коллимированным потоком энергии, направленным перпендикулярно плоскости пластины, при плотности излучения  $H_0$  и длительности импульса  $\tau_{\text{имп}}$ .

Предполагалось, что собственное излучение среды мало по сравнению с внешним радиационным потоком. Задача сводилась к решению уравнения энергии с граничными и начальными условиями:

$$\rho c \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} - \frac{\partial H(x)}{\partial x} \quad (4)$$

$$x = 0: \quad -\lambda \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = H_0, \quad \tau_{\text{имп}} > t > 0; \quad (5)$$

$$x = 0: \quad -\lambda \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = 0, \quad t > \tau_{\text{имп}}; \quad (6)$$

$$x = L: \quad \lambda \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = 0, \quad t > 0; \quad (7)$$

$$t = 0: \quad T(x, 0) = T_0, \quad (8)$$

где  $H_0$  — плотность потока излучения на нагреваемой поверхности образца;  $\frac{dH(x)}{dx}$  — функция объемного лучистого источника тепла;  $T, T_0$  — текущая и начальная температуры;  $t$  — время.

Изменение плотности энергии в материале определялось по закону Бугера—Ламберта—Бера [14]:

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

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

### МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для решения системы дифференциального уравнения с граничными условиями (4)—(7) использован метод конечных разностей. Разностные аналоги дифференциального уравнения и краевых условий решены методом про-

гонки с применением неявной итерационной четырехточечной разностной схемы [15].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование условий эксперимента проведено для оптического кварцевого стекла КУ-1 с теплофизическими характеристиками:  $\lambda = 1,35 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ,  $c = 728 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ,  $\rho = 2200 \text{ кг}/\text{м}^3$  [16]. Значения начальной температуры и толщины образца для рассматриваемых экспериментов составляли соответственно  $T_0 = 293 \text{ К}$  и  $L = 0,003 \text{ м}$ . Диапазон длин волн области прозрачности кварцевого стекла составлял 2100...2800 нм, что соответствовало изменению коэффициента поглощения от 10 до 250  $\text{м}^{-1}$  [16]. Значения радиационного теплового потока  $H_0 = 5 \cdot 10^7 \text{ Вт}/\text{м}^2$  и длительности импульса  $\tau_{\text{имп}} = 0,5 \text{ мс}$  выбирались исходя из реальных характеристик лазерного источника в экспериментальных установках для определения ТФХ материалов. Также при выборе этих параметров учитывалось основное положение метода [1] — обязательный «температурный перегрев» на «холодной» поверхности образца не менее 3...6 К. Шаги разностной сетки по времени и пространству составляли соответственно до 50 мкс и 12 мкм.

Зависимости погрешности  $\delta_c$  определения удельной теплоемкости и погрешности  $\delta_a$  определения температуропроводности кварцевого стекла КУ-1 от коэффициента поглощения  $k_\lambda$

(рис. 2) иллюстрируют влияние рассматриваемого эффекта — дополнительного притока тепла в глубинные слои образца за счет радиационного теплопереноса.

С увеличением коэффициента поглощения значения  $\delta_c$  и  $\delta_a$  повышаются и составляют соответственно около 25 и 30 % при  $k_\lambda = 150 \text{ м}^{-1}$ . Погрешность определения теплопроводности при этом превышает погрешность определения температуропроводности.

Результаты выполненного моделирования дают основание для выводов о том, что при практической реализации методики определения ТФХ методом лазерного импульса [1] необходимы жесткие ограничения на величину длин волн падающего излучения и величины коэффициента поглощения. Уменьшение погрешностей  $\delta_c$  и  $\delta_a$  до минимально допустимых значений возможно при значительном уменьшении длины волны лазерного излучения в области полупрозрачности. Но в реальных экспериментах это сделать достаточно трудно по техническим характеристикам используемых лазеров. Поэтому возможности метода лазерного импульса при определении ТФХ кварцевого стекла существенно ограничены.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вычислены значения методических погрешностей, обусловленные радиационным переносом энергии в результате математического

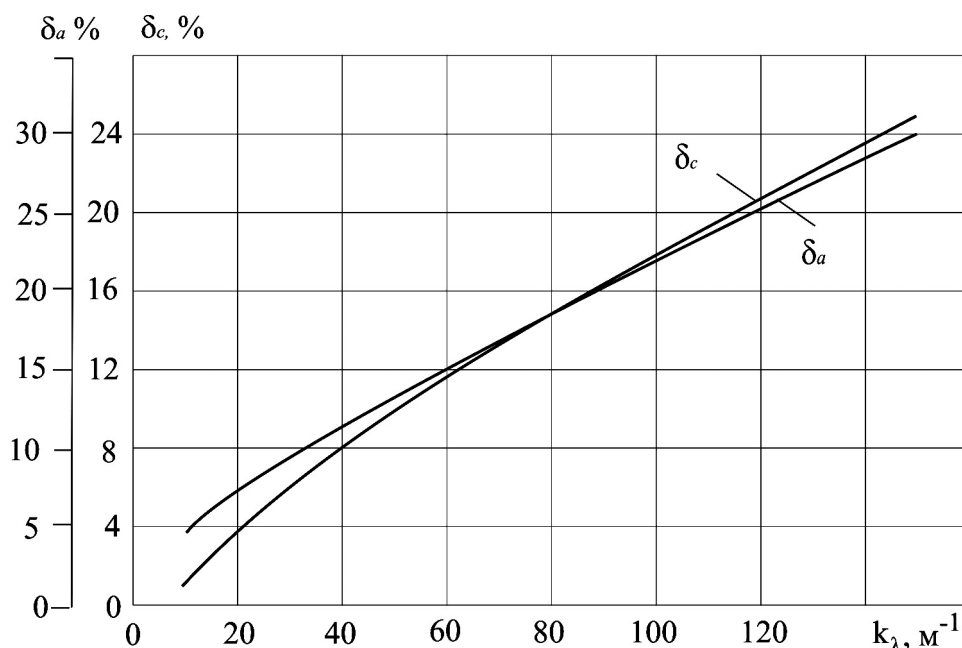


Рис. 2. Зависимости погрешности  $\delta_c$  определения удельной теплоемкости и погрешности  $\delta_a$  определения температуропроводности оптического кварцевого стекла КУ-1 от коэффициента поглощения  $k_\lambda$

моделирования процессов теплопереноса в кварцевом стекле в условиях, соответствующих реализации метода импульсного лазерного нагрева определения теплофизических характеристик.

Обоснована целесообразность оценки величин дополнительных методических погрешностей, обусловленных прозрачностью материала, при планировании экспериментов по определению теплофизических характеристик стекол различного назначения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Parker W. J.* Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity / *W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler // J. Appl. Phys.* — 1961. — V. 32. — N. 9. — P. 1675—1684.

2. *Akoshima M.* Study on a thermal-diffusivity standard for laser flash method measurements / *M. Akoshima, T. Baba // Int. J. Thermophys.* — 2006. — Vol. 27. — No 4. — P. 1189—1203.

3. *Gaosheng W.* Thermal diffusivity measurements on insulation materials with the laser flash method / *W. Gaosheng, Z. Xinxin, Y. Fan, C. Kui // Int. J. Thermophys.* — 2006. — Vol. 27. — No 1. — P. 235—243.

4. *Heckman E. M.* Measurement of optical and thermal properties of Hg[1-x]Cd[x]Te / *E. M. Heckman, L. P. Gonzalez, S. Guha // Appl. Opt.* — 2008. — V. 47. — N. 4. — P. 578—582.

5. *Новицкий Л. А.* Оптические свойства материалов при низких температурах / *Л. А. Новицкий, Б. М. Степанов.* — М.: Машиностроение, 1980. — 224 с.

6. *Товстоног В. А.* Анализ теплообмена в светорассеивающих материалах, нагреваемых излучением // *Физика и химия обработки металлов.* — 1985. — № 3. — С. 35—40.

7. *Просунцов П. В.* Проблемы теплопереноса в частично прозрачных рассеивающих материалах /

*П. В. Просунцов, С. В. Резник // Сиб. физ.-техн. журнал.* — 1991. — Вып. 1. — С. 51—56.

8. *Просунцов П. В.* Определение теплофизических свойств полупрозрачных материалов / *П. В. Просунцов, С. В. Резник // ИФЖ.* — 1985. — Т. 49. — С. 971—976.

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

10. *Kabayabaya T.* Thermal Diffusivity Measurement of Glass at High Temperature by Using Flash Method / *T. Kabayabaya, F. Yu, X. Zhang // J. of Thermal Science.* — 2003. — V. 13. — No. 1. — P. 91—96.

11. *Мерзлякин В. Г.* Метод приповерхностной обработки полупрозрачных материалов в импульсном режиме / *В. Г. Мерзлякин, О. В. Сидоров, В. А. Товстоног // Труды Международного научного симпозиума «Автотракторостроение».* — М.: МГТУ МАМИ. — 2009. С. 154—158.

12. *Кузнецов Г. В.* Об условиях применения импульсных методов определения теплофизических характеристик конструкционных материалов / *Г. В. Кузнецов, М. Д. Кац // Известия Томского политехнического университета.* — 2008. — Т. 312. — № 4. — С. 10—13.

13. *Kuznetsov G. V.* Pulse method systematic errors theoretical analysis for construction materials finite samples thermophysical characteristics determination / *G. V. Kuznetsov, M. D. Kats // Measurement Techniques.* — 2009. — V. 52, № 4. — P. 384—386.

14. *Яворский Б. М.* Справочник по физике / *Б. М. Яворский, А. А. Детлаф.* — М.: Наука, 1985. — 512 с.

15. *Самарский А. А.* Теория разностных схем. — М.: Наука, 1983. — 616 с.

16. ГОСТ 15130-86. Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия. Переизд. Апр. 1999 с изм. 1, 2. — М.: Изд-во стандартов. 1999. — 31 с.

*Кузнецов Г. В., Национальный исследовательский Томский политехнический университет, зам. директора по науке Энергетического института, заведующий кафедрой теоретической и промышленной теплотехники, д.ф.-м.н.*

*Тел. (3822) 563-613*

*Кац М. Д., Национальный исследовательский Томский политехнический университет, доцент каф. автоматизации теплоэнергетических процессов Энергетического института, к.ф.-м.н.*

*Тел. (3822) 563-386*

*E-mail: Katz@tpu.ru*

*Kuznetsov G. W., National Research Tomsk Polytechnic University, Deputy Director of Energy Institute, Managing chair theoretical and industrial heating engineers, doctor of sciences.*

*Tel. (3822) 563-613.*

*Kats M. D., National Research Tomsk Polytechnic University, Associate Professor of Department Automation of processes of heat power of the Energy Institute.*

*Tel. (3822) 563-386*

*E-mail: Katz@tpu.ru*