

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ С УЧЕТОМ ТЕПЛООБМЕНА С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

А.С. Светлов

svetlov.anton.s@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Проведено расчетно-теоретическое исследование нестационарного метода импульсного нагрева с учетом теплообмена с окружающей средой для определения коэффициента температуропроводности тонкопленочных покрытий, представляющих интерес с точки зрения интенсификации теплообмена в инфракрасном диапазоне излучения при температуре 300...1 000 К. Получены зависимости длительности импульса, энергии и мощности нагрева от толщины тонкой пленки. Разработана методика анализа теплофизических свойств тонких покрытий.

### Ключевые слова

Теплопроводность, тонкие покрытия, метод импульсного нагрева, температуропроводность

Поступила в редакцию 23.06.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

---

Тонкопленочные покрытия получили широкое распространение в различных отраслях экономики. Так, в авиации они облегчают работу пилота или космонавта при использовании теплоотражающих светопрозрачных покрытий или прозрачных лобовых стекол, покрытия которых позволяют вывести на стекло световую информацию.

Производство и подготовка таких покрытий требует значительных затрат на индивидуальную разработку каждого из них, при том, что они могут состоять, например, из нескольких слоев металла и диэлектрика. Технологию нанесения и необходимое оборудование разрабатывают исходя из условий единичного производства, поэтому проведение эксперимента для покрытия — дорогостоящая процедура.

К области массового применения тонкопленочных покрытий относится строительство жилых и промышленных зданий. Известно, что тепловой поток через окна достигает 30 % тепловой энергии, расходуемой на обогрев здания в холодных районах, а в теплое время года значительные энергетические затраты приходится на кондиционирование зданий. Использование энергосберегающего остекления позволит снизить затраты на поддержание требуемых условий в помещениях.

Энергосберегающее стекло получают путем нанесения тонкопленочных покрытий на поверхность обычного строительного стекла. Различают два вида таких стекол: солнцезащитное для южных районов и теплозащитное для северных районов. Солнцезащитное стекло при коэффициенте пропускания 20...55 %

задерживает до 80 % тепловой энергии, поступающей в помещение, что позволяет создать в нем комфортные условия с меньшими расходами на кондиционирование. Теплозащитное стекло с коэффициентом пропускания 75...85 % снижает в 2 раза тепловой поток, выходящий из помещения, благодаря чему можно уменьшить затраты на обогрев зданий [1].

В США и Германии за последние 20 лет более 30 % помещений остеклены энергосберегающим стеклом при его стоимости 30...70 долл. США за 1 м<sup>2</sup>. В России же в настоящее время производят лишь небольшие партии такого стекла, серийное производство отсутствует.

В данной работе рассмотрены методы исследования оптических и теплофизических свойств тонкопленочных покрытий, изучен метод импульсного нагрева для определения температуропроводности материала с учетом теплообмена с окружающей средой. Проанализирована методика расчета, позволяющая получать сведения о свойствах материала с покрытием без проведения эксперимента [2].

Тепло- и температуропроводность материалов. В *металлах* основным передатчиком тепла являются свободные электроны, которые можно уподобить идеальному одноатомному газу. Передача тепла с помощью колебательных движений атомов или в виде упругих звуковых волн не исключается, но ее доля незначительна по сравнению с переносом энергии электронным газом. Вследствие движения свободных электронов происходит выравнивание температуры во всех точках нагревающегося или охлаждающегося металла. Свободные электроны движутся как из более нагретых областей в менее нагретые, так и в обратном направлении. В первом случае они отдают энергию атомам, во втором отбирают.

Так как в металлах носителями тепловой и электрической энергии являются электроны, коэффициенты электро- и теплопроводности (КТ) пропорциональны друг другу. При повышении температуры вследствие усиления колебательных движений атомов рассеяние электронов на них увеличивается. Это влечет за собой уменьшение КТ и коэффициентов тепло- и электропроводности чистых металлов. При наличии разного рода примесей КТ металлов резко убывает, что можно объяснить ростом структурных неоднородностей, которые приводят к рассеянию электронов. Например, для чистой меди  $\lambda = 396 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , а для меди со следами мышьяка  $\lambda = 142 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . В отличие от КТ чистых металлов КТ сплавов при повышении температуры увеличивается.

В *диэлектриках* с повышением температуры КТ обычно растет. Как правило, для материалов с большей объемной плотностью КТ имеет более высокое значение. Он зависит также от структуры материала, его пористости и влажности. Многие теплоизоляционные и строительные материалы имеют пористое строение (пеноплекс, пенопласт, кирпич, бетон, асбест и др.), и применение закона Фурье к таким телам является в известной мере условным. Условной является и величина КТ пористого материала, подобная КТ некоторого однородного тела, через которое при одинаковых размерах, форме и температурах на границах проходит то же количество тепла, что и через пористое тело [3].

КТ порошкообразных и пористых тел сильно зависит от их плотности. Например, при возрастании плотности  $\rho$  от 400 до 800 кг/м<sup>3</sup> КТ асбеста увеличивается от 0,105 до 0,248 Вт/(м·К) [4]. Такое влияние  $\rho$  на  $\lambda$  объясняется тем, что КТ воздуха, заполняющего поры значительно меньше, чем КТ твердых компонентов пористого материала. Эффективный КТ пористых материалов сильно зависит также от влажности. Для влажного материала КТ значительно больше, чем для сухого материала и воды в отдельности. Например, для сухого кирпича  $\lambda = 0,35$  Вт/(м·К), для воды  $\lambda = 0,6$  Вт/(м·К), а для влажного кирпича  $\lambda = 1,0$  Вт/(м·К). Этот эффект можно объяснить конвективным переносом тепла, возникающим благодаря капиллярному движению воды внутри пористого материала, и частично тем, что абсорбционно-связанная влага имеет другие характеристики по сравнению со свободной водой. Увеличение КТ зернистых материалов с изменением температуры можно объяснить тем, что при повышении температуры возрастает теплопроводность среды, заполняющей промежутки между зернами, и теплопередача излучением внутри зернистого массива. Материалы с КТ ниже 0,25 Вт/(м·К) обычно применяют для тепловой изоляции конструкций и называют теплоизоляционными [4].

*Методы исследования тепло- и температуропроводности.* Исследование теплопроводности материалов проводят в широком диапазоне температур с использованием стационарных и нестационарных методов. Стационарные методы, базирующиеся на изучении неизменных во времени температурных полей, как правило, проще, и следовательно, совершеннее. Нестационарные методы, основанные на исследовании меняющихся во времени по определенному закону температурных полей, более сложны в реализации. Главная трудность состоит в том, что в эксперименте сложно реализовать условия, заложенные в теории метода. Однако нестационарные методы позволяют помимо данных о теплопроводности получить информацию о температуропроводности и теплоемкости вещества [5].

*Метод импульсного нагрева для определения коэффициента температуропроводности.* Импульсный метод обеспечивает прямое, быстрое и очень точное определение теплофизических свойств: удельной теплоемкости, тепло- и температуропроводности широкого круга материалов от полимеров, керамики, горных пород до графита, алмазов, металлов и их расплавов. Образцы могут представлять собой твердые тела, порошки, жидкости, пастообразные вещества, пленки, волокна и даже многослойные композиты. Основными достоинствами этого метода являются: экспрессность (измерение длится секунды); малые размеры исследуемых образцов (что позволяет измерять теплофизические свойства радиоактивных материалов); возможность с помощью одного прибора определять теплоемкость, тепло- и температуропроводность; высокая точность. К недостаткам метода относятся высокая стоимость аппаратуры и повышенные требования к условиям эксперимента при испытании пористых и негомогенных материалов [6].

На рис. 1, а показана схема метода импульсного нагрева, а на рис. 1, б — зависимость температуры  $T$  нижней поверхности тонкой пластины или пленки (ТП) от времени импульсного нагрева  $\tau$ , где  $\tau_{0,5}$  — время достижения половинного значения максимальной температуры  $T_{\max}$  нагрева нижней поверхности ТП.



**Рис. 1.** Схема метода импульсного нагрева (а) и зависимость температуры нижней поверхности ТП от времени (б)

С помощью аналитического решения задачи теплопроводности для плоской ТП, верхняя поверхность которой облучается коротким импульсом (рис. 1), получено соотношение

$$a = \frac{1,37\delta^2}{\pi^2\tau_{0,5}},$$

где  $a$  — коэффициент температуропроводности;  $\delta$  — толщина ТП.

При этом предполагается, что время облучающего импульса мало, а тепловые потери отсутствуют. Наиболее точный учет тепловых потерь возможен путем решения нестационарного уравнения теплопроводности. Время импульса заметно меньше, чем время распространения тепла внутри ТП [7].

**Исследование температуропроводности материалов.** Метод импульсного нагрева для определения коэффициента температуропроводности ТП.

Нестационарное уравнение теплопроводности имеет вид

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \tag{1}$$

где  $\rho$  — плотность ТП;  $C$  — удельная теплоемкость ТП;  $t$  — время;  $x$  — координата.

Начальные условия: в начальный момент времени температура ТП равна температуре окружающей среды.

Граничные условия третьего рода:

при  $x = 0$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q_0\varphi(t) - \alpha_1 T; \tag{2}$$

при  $x = \delta$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_2 T, \tag{3}$$

где  $q_0$  — плотность теплового потока;  $\varphi(t)$  — переменная, соотносящая время и тепловой поток;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — коэффициенты теплоотдачи верхней и нижней поверхностей.

Перейдем к безразмерным величинам:

$$t \rightarrow \frac{t}{\tau_1}; \quad x \rightarrow \frac{x}{\delta}; \quad T \rightarrow \frac{T}{\Delta T}$$

Здесь  $\tau_1$  — длительность импульса;  $\Delta T$  — разница температур,

$$\Delta T = \frac{Q}{S\delta} \frac{1}{\rho C},$$

где  $Q$  — энергия нагрева;  $S$  — площадь пятна нагрева.

В исследовании использована схема, в которой длительность импульса  $\tau_1$  и время между импульсами  $\tau$  имеют один порядок. На рис. 2 показано соотношение этих параметров.

Уравнение (1) в безразмерных величинах принимает вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = Fo \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}.$$

Здесь  $Fo$  — число Фурье,

$$Fo = \frac{\lambda}{\rho C} \frac{\tau_1}{\delta^2} = \frac{a\tau_1}{\delta^2},$$

где  $a$  — коэффициент температуропроводности,  $a = \frac{\lambda}{\rho C}$ .

Уравнения (2) и (3) в безразмерных величинах:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial T}{\partial x} &= K\varphi(t) - Bi_1 T; \\ -\frac{\partial T}{\partial x} &= Bi_2 T, \end{aligned}$$

где  $Bi_1$  — число Био для верхней поверхности,  $Bi_1 = \frac{\alpha_1 \delta}{\lambda}$ ;  $Bi_2$  — число Био для нижней поверхности,  $Bi_2 = \frac{\alpha_2 \delta}{\lambda}$ .

С учетом того, что плотность теплового потока на поверхности  $q = \frac{Q}{S\tau_1} \varphi(t)$ , получим

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{Q}{S\tau_1} \varphi(t),$$

где  $\varphi(t) = 1$  в импульсе,  $\varphi(t) = 0$  в промежутке между импульсами.

Неявная конечно-разностная схема решения нестационарного уравнения теплопроводности (1) имеет вид

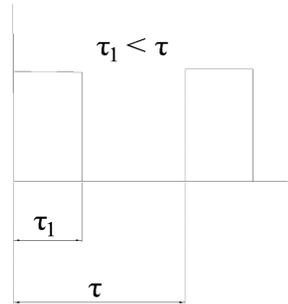
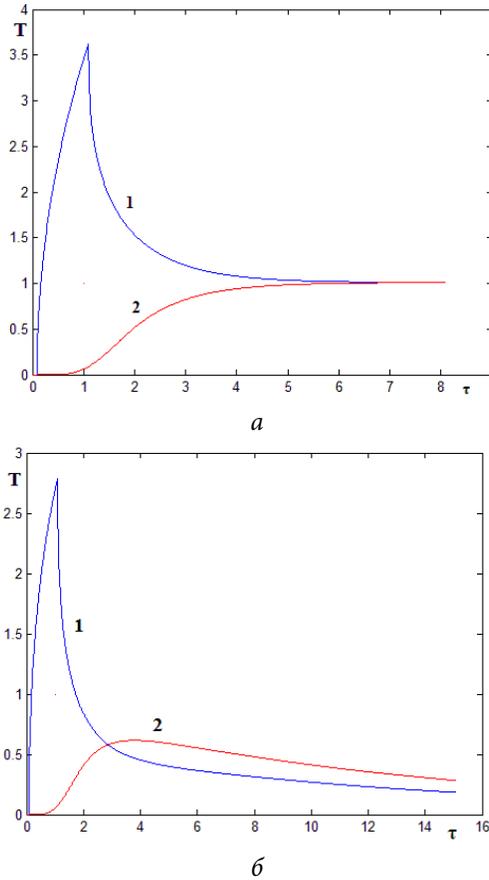


Рис. 2. Схема времени импульсного нагрева

$$\begin{aligned} (1 + Bi_1 h_x) y_{1,j} - y_{2,j} &= Kh_x \varphi(t) \text{ при } i = 1; \\ -y_{i-1,j} + \left( 2 + \frac{Kh_x^2}{h_t} \right) y_{i,j} - y_{i+1,j} &= \frac{Kh_x^2}{h_t} y_{i,j-1} \text{ при } i = 2, \dots, N; \\ y_{N,j} - (1 + Bi_2 h_x) y_{N+1,i} &= 0 \text{ при } i = N + 1, \end{aligned}$$

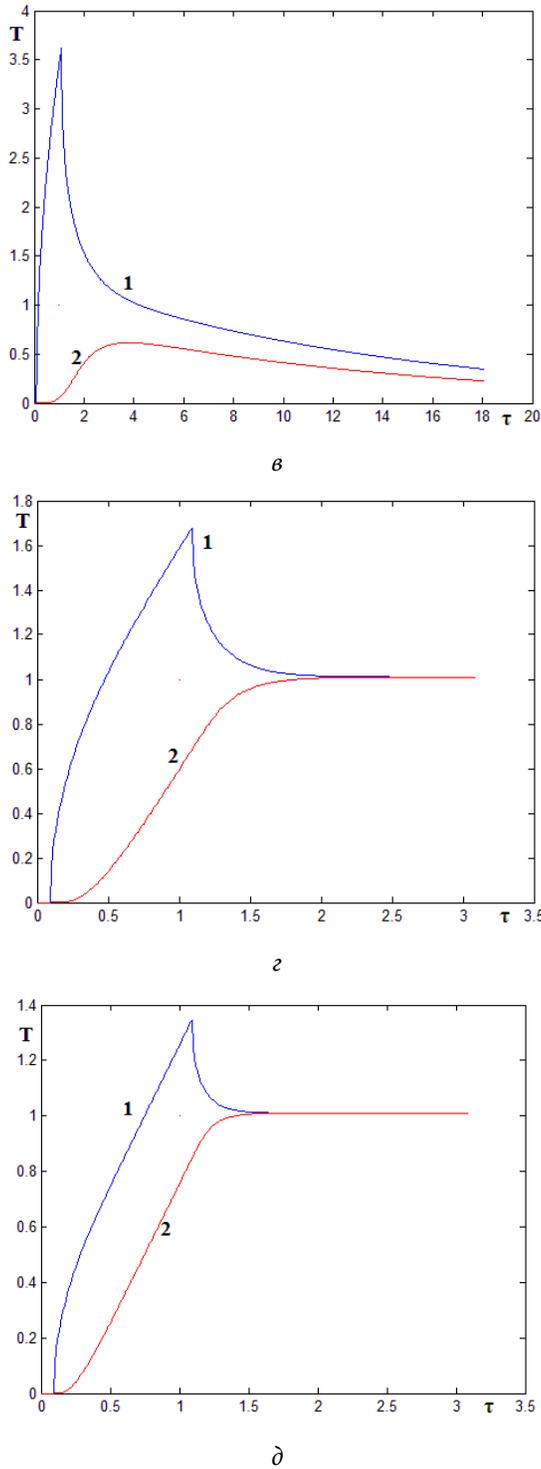
где  $K = \frac{1}{Fo} = \frac{\delta^2}{a\tau_1}$ .

**Результаты расчета методом импульсного нагрева для определения коэффициента температуропроводности.** Рассматривая динамику изменения температур и времен, важно знать, какое влияние оказывает теплообмен с окружающей средой на процесс прогрева. Оценить это влияние позволяют результаты расчета, приведенные на рис. 3–5. На рис. 4 и 5 о времени прогрева нижней поверхности ТП можно судить по числу Фурье, а о теплообмене со внешней средой — по числу Био.



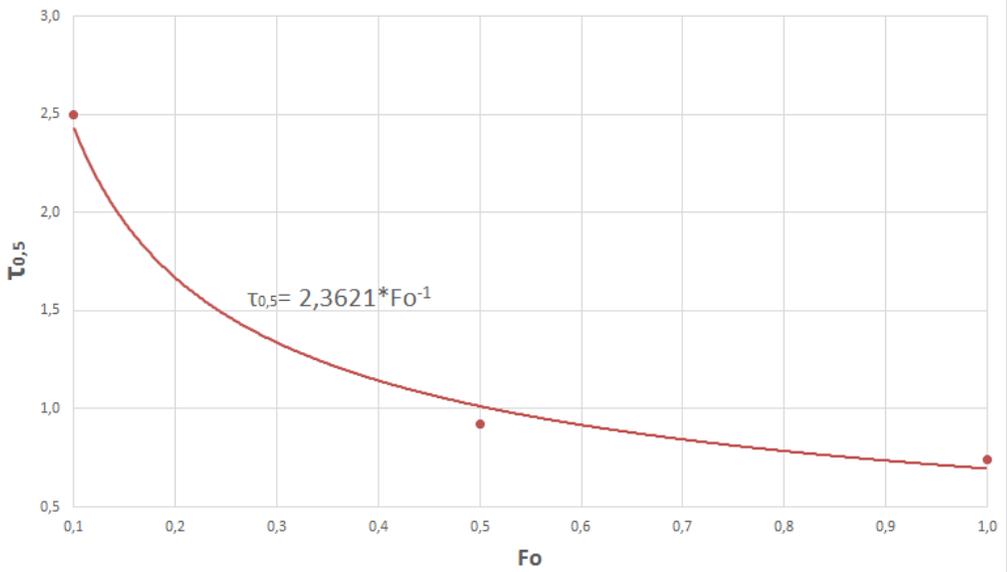
**Рис. 3.** Зависимости температуры верхней (1) и нижней (2) поверхностей ТП от времени при различных значениях чисел Био и Фурье:

*а* —  $Bi_1 = 0, Bi_2 = 0, Fo = 0,1$ ; *б* —  $Bi_1 = 1, Bi_2 = 0, Fo = 0,1$

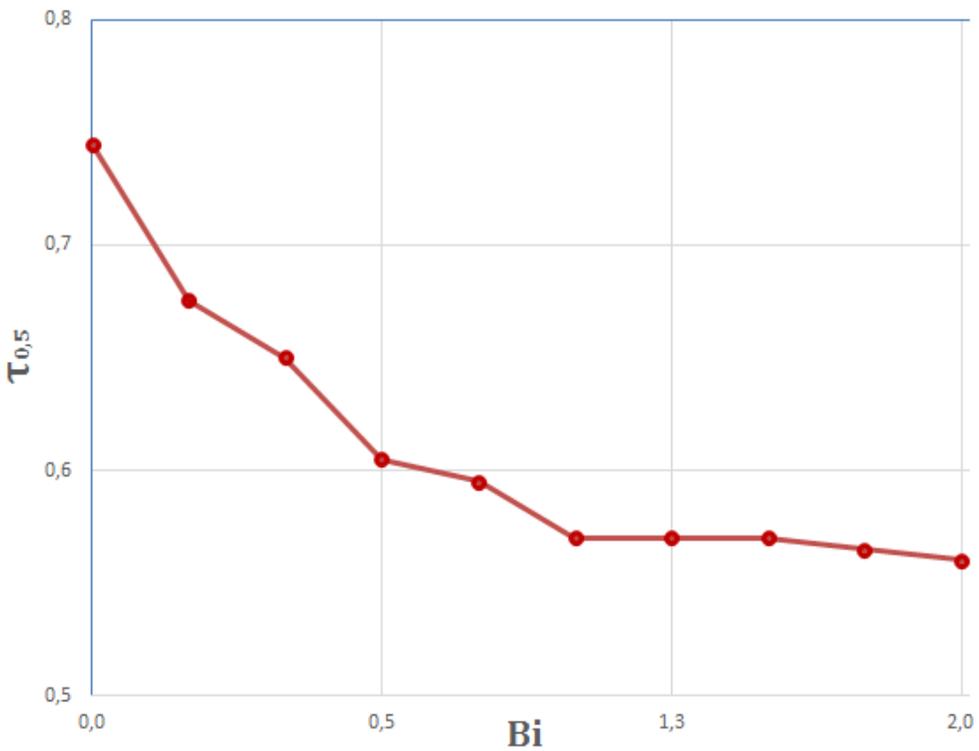


**Рис. 3.** Зависимости температуры верхней (1) и нижней (2) поверхностей ТП от времени при различных значениях чисел Био и Фурье:

$\theta$  —  $Bi_1 = 0, Bi_2 = 1, Fo = 0,1$ ;  $z$  —  $Bi_1 = 0, Bi_2 = 0, Fo = 0,5$ ;  $\partial$  —  $Bi_1 = 0, Bi_2 = 0, Fo = 1,0$



а



б

**Рис. 4.** Зависимости времени достижения половинного значения максимальной температуры нагрева нижней поверхности ТП от чисел Фурье (а) и Био (б): точки — расчетные данные; сплошная линия — функция, полученная путем аппроксимации

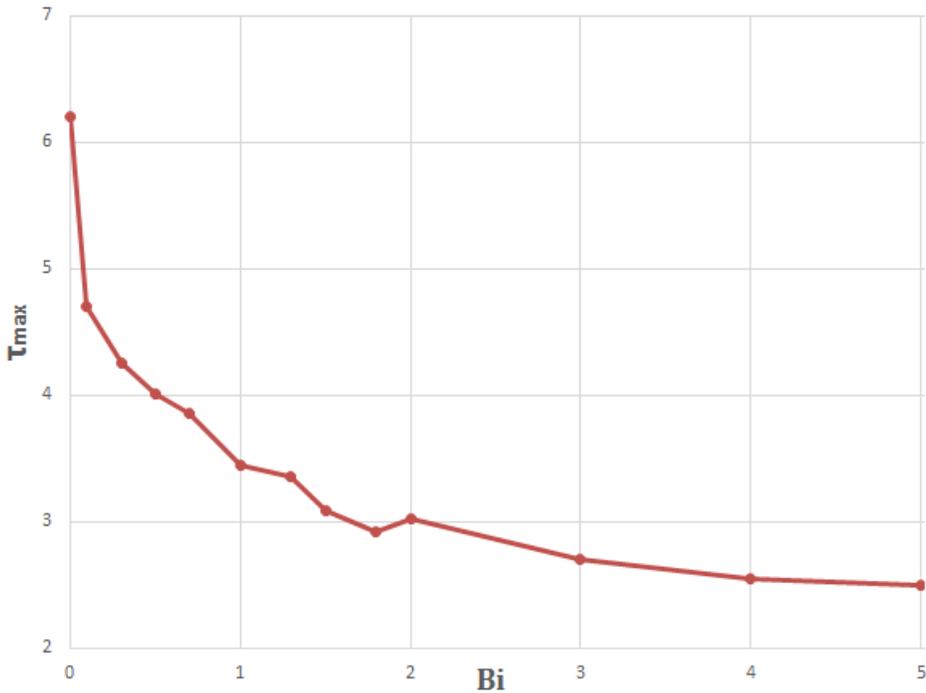


Рис. 5. Зависимость времени достижения максимальной температуры нижней поверхности ТП от числа Био

**Оценка основных параметров.** Энергия нагрева определяется выражением  $Q = \Delta T S \delta \rho C$ , длительность импульса —  $\tau_1 = 0,3\tau_{0,5}$ , мощность нагрева  $P = Q/\tau_1$ , время достижения половинного значения максимальной температуры нагрева нижней поверхности ТП —  $\tau_{0,5} = 0,139 \frac{\delta^2}{a}$ , а площадь пятна нагрева —  $S = \pi d^2/4$ . С учетом плоскопараллельного распространения фронта температур диаметр пятна нагрева  $d$  и толщина ТП связаны соотношением  $d = 10\delta$ .

Примем следующие исходные данные: плотность  $\rho \approx 3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , удельная теплоемкость  $C \approx 10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ , разница температур  $\Delta T \approx 5 \text{ К}$ , коэффициент температуропроводности  $a = 8,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ .

После подстановки исходных данных в указанные формулы получим следующие зависимости энергии нагрева, длительности импульса и мощности нагрева от толщины ТП:

$$\begin{aligned}
 Q &\approx 10^6 \cdot \delta^3; \\
 \tau_1 &\approx 10^2 \cdot \delta^2; \\
 P &\approx 10^4 \cdot \delta.
 \end{aligned}$$

**Выводы.** Анализ результатов расчета по методу импульсного нагрева с учетом теплообмена с окружающей средой показал, что с увеличением теплообмена на верхней поверхности ТП время достижения максимальной температуры

ее нижней поверхности уменьшается, а число Фурье (скорость прогрева) имеет обратно пропорциональную зависимость от времени достижения половинного значения максимальной температуры нагрева нижней поверхности.

Выявлены следующие зависимости основных параметров:

- мощность нагрева прямо пропорциональна толщине ТП;
- энергия нагрева прямо пропорциональна толщине в третьей степени;
- длительность импульса прямо пропорционально квадрату толщины ТП.

## Литература

- [1] Jitsukawa H., Nagasaka Y. Development of measurement technique to evaluate thermal conductivity of thermoelectric  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  submicron thin films by photothermal radiometry. *17th ECTP*. Bratislava, Slovakia. 2005.
- [2] Агажанов А.Ш. *Экспериментальное исследование теплопроводности и температуропроводности жидких теплоносителей и конструкционных материалов ядерной энергетики*. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2016, 171 с.
- [3] Parker W. J., Jenkins R. J., Butler C, pp., Abbott G. L. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity. *Journal of Applied Physics*, 2004, vol. 32, pp. 1679–1684.
- [4] Kim H.J., Kim J.H., Jeon P.S. The measurement of thermal conductivities using the photothermal deflection method for thin films with varying thickness. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2009, vol. 23, no. 9, pp. 2514–2520.
- [5] Zhao D., Qian X., Gu X., Jajja S.A., Yang R. Measurement techniques for thermal conductivity and interfacial thermal conductance of bulk and thin film materials. *Journal of Electronic Packaging*, 2016, vol. 138, no. 4, pp. 040802–3.
- [6] Moorhead M., Avedisian T., Kazimirov A.Y. Determining the thermal conductivity of  $\text{W/B}_4\text{C}$  multilayer structures using photothermal deflection spectroscopy. *10<sup>th</sup> AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference*. Chicago, 2010, 13 p.
- [7] Maize K., Ezzahri Y., Wang X., Singer S., Majumdar A., Shakouri A. Measurement of thin film isotropic and anisotropic thermal conductivity using  $3\omega$  and thermoreflectance imaging. *24<sup>th</sup> IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*. San Jose, 2008, 6 p.

**Светлов Антон Сергеевич** — студент кафедры «Теплофизика и ядерная энергетика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ С УЧЕТОМ ТЕПЛООБМЕНА С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

A.S. Svetlov

svetlov.anton.s@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

We conducted a theoretic analytical study of a non-steady pulse heating technique, taking into account environmental heat transfer so as to determine thermal diffusivity of thin-film coatings that are particularly interesting in terms of intensifying heat transfer in the infrared range for temperatures of 300...1000 K. We present the following parameters as functions of thin film thickness: pulse duration, heating energy and power. We developed a technique for analysing thermophysical properties of thin coatings.

### Keywords

Thermal conductivity, thin coatings, pulse heating technique, thermal diffusivity

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

---

### References

- [1] Jitsukawa H., Nagasaka Y. Development of measurement technique to evaluate thermal conductivity of thermoelectric Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> submicron thin films by photothermal radiometry. *17th ECTP*. Bratislava, Slovakia, 2005.
- [2] Agazhanov A.Sh. Eksperimental'noe issledovanie teploprovodnosti i temperaturoprovodnosti zhidkikh teplonositeley i konstruktsionnykh materialov yadernoy energetiki. Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Experimental research on thermal conductivity and temperature conductivity of liquid heat carriers and construction materials of nuclear energetics. Kand. tech. sci. diss.]. Novosibirsk, 2016, 171 p.
- [3] Parker W. J., Jenkins R. J., Butler C, pp., Abbott G. L. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity. *Journal of Applied Physics*, 2004, vol. 32, pp. 1679–1684.
- [4] Kim H.J., Kim J.H., Jeon P.S. The measurement of thermal conductivities using the photothermal deflection method for thin films with varying thickness. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2009, vol. 23, no. 9, pp. 2514–2520.
- [5] Zhao D., Qian X., Gu X., Jajja S.A., Yang R. Measurement techniques for thermal conductivity and interfacial thermal conductance of bulk and thin film materials. *Journal of Electronic Packaging*, 2016, vol. 138, no. 4, pp. 040802–3.
- [6] Moorhead M., Avedisian T., Kazimirov A.Y. Determining the thermal conductivity of W/B4C multilayer structures using photothermal deflection spectroscopy. *10<sup>th</sup> AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference*. Chicago, 2010, 13 p.
- [7] Maize K., Ezzahri Y., Wang X., Singer S., Majumdar A., Shakouri A. Measurement of thin film isotropic and anisotropic thermal conductivity using 3 $\omega$  and thermoreflectance imaging. *24<sup>th</sup> IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*. San Jose, 2008, 6 p.

**Svetlov A.S.** — student, Department of Thermal Physics and Nuclear Power Industry, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — A.Yu. Chirkov, Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Department of Thermal Physics and Nuclear Power Industry, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.