

На правах рукописи

Кац Марк Давыдович

ПОГРЕШНОСТИ И УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ
ИМПУЛЬСНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ

Специальность 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск –2009

Работа выполнена на кафедре автоматизации теплоэнергетических процессов ГОУ-ВПО «Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Кузнецов Гений Владимирович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Борзых Владимир Эрнестович

доктор физико-математических наук,
профессор
Крайнов Алексей Юрьевич

Ведущая организация: Московский институт теплотехники

Защита состоится _____ 2009 года в 14 часов 30 минут на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций ДС 212.025.01 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, ауд. 228 (10 корпус ТПУ)

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке Томского политехнического университета

Автореферат разослан _____ 2009 года.

Ученый секретарь
совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций

О.Ю. Долматов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В настоящее время ежегодно создаются новые конструкционные материалы, важнейшими характеристиками которых являются теплофизические (ТФХ): удельная теплоемкость c , коэффициенты теплопроводности λ и температуропроводности a . В связи с растущими объемами испытательных, исследовательских и производственных задач в энергетике, машиностроении и строительстве постоянно разрабатываются новые и совершенствуются известные высокотехнологичные методы определения ТФХ.

В последние десятилетия большой интерес вызывает метод лазерного импульса (Parker's method, Flash method, метод лазерного импульсного нагрева), сущность которого состоит в поглощении в тонком слое нагреваемой («горячей») поверхности образца импульса энергии и регистрации изменения во времени температуры его обратной («холодной») поверхности. Полученная по итогам экспериментов информация позволяет рассчитать теплофизические характеристики исследуемого материала.

Метод лазерного импульсного нагрева постоянно совершенствуется, а также расширяется перечень материалов, для которых с его использованием определяются ТФХ (металлы и сплавы, изоляционные, биологические, анизотропные, пленочные, частично прозрачные материалы, а также жидкие металлы, жидкости и расплавы солей, двухслойные системы). В японском институте метрологии изучается возможность применения этого метода для эталонного измерения коэффициента температуропроводности.

Однако практическая реализация метода лазерного импульса не соответствует его математической модели, в основе которой лежит приближенное решение нестационарной одномерной задачи теплопроводности для пластины при бесконечно малой продолжительности воздействия на нее лазерного луча с однородной энергетической плотностью и при отсутствии теплообмена с окружающей средой. Анализ литературы по рассматриваемой проблеме показал, что математическая постановка задачи, лежащая в основе метода лазерного импульсного нагрева, является источником методических погрешностей, которые необходимо учитывать в реальном эксперименте.

Основные погрешности определения ТФХ материалов импульсным методом лазерного воздействия обусловлены явными и неявными предположениями, сделанными при постановке задачи. Это ограничения по условиям теплообмена на границах; допущения о неограниченной величине теплового потока лазерного излучения к нагреваемой поверхности, бесконечно малой длительности теплового импульса, пространственной однородности теплового потока; одномерности процесса теплопереноса в образце.

Влияние длительности импульса и теплоотвода с «холодной» и «горячей» поверхностей образца исследовались и ранее, но при этом использовались, в основном, одномерные модели, в которых не учитывались неоднородность процесса теплопереноса в образце, локальность импульсного воздействия и другие значимые факторы. Математическое моделирование температурных

полей в образце в условиях реальных экспериментов может стать основным методом анализа как погрешности определения ТФХ методом импульсного лазерного нагрева, так и выделения реального диапазона изменения параметров эксперимента, при которых возможно достоверное определение ТФХ. Соответственно, анализ погрешностей этого метода с применением двухмерной и трехмерной моделей нестационарного процесса теплопроводности в образце материала при проведении эксперимента является актуальной задачей, имеющей как фундаментальное, так и прикладное значение.

Цель диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является теоретический анализ погрешностей и условий применения импульсных методов определения ТФХ материалов при помощи математического моделирования нестационарных процессов теплопроводности в образцах материалов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ влияния конвективного и лучистого теплообмена на нагреваемой и «холодной» поверхностях образца на результаты определения теплофизических характеристик.
2. Исследование влияния типа материала на достоверность определения ТФХ.
3. Оценка влияния длительности импульса на результаты определения теплофизических характеристик.
4. Анализ влияния локальности воздействия в условиях энергетической однородности лазерного луча на результаты определения ТФХ.
5. Исследование влияния локальности воздействия и энергетической неоднородности лазерного луча на результаты определения теплофизических характеристик.
6. Анализ влияния неоднородности процесса теплопереноса в материале на результаты определения ТФХ.

Научная новизна работы.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- впервые сформулирован подход к анализу погрешностей и условий применения импульсных методов определения ТФХ материалов, в основе которого лежит численное моделирование реальных температурных полей, формирующихся в образцах в процессе экспериментов, из решения нестационарной задачи теплопроводности с нелинейными граничными условиями при высоких градиентах температур в приповерхностном слое образца, высоких темпах нагрева, локальности теплового воздействия и сравнение вычисленных по результатам численных экспериментов значений теплофизических характеристик материалов с истинными;
- численно исследовано влияние основных параметров (плотности теплового потока, времени воздействия лазерного луча, локальности нагрева, условий теплообмена с окружающей средой) на погрешности экспериментального определения ТФХ импульсным методом лазерного нагрева;
- установлены границы диапазонов возможного изменения величины импульсного теплового потока к поверхности материала, продолжительности

импульса, геометрических размеров образцов, обеспечивающих достоверность полученных результатов в зависимости от типа материала.

Практическая значимость работы.

Внесен вклад в развитие представлений о режимах проведения экспериментов по определению ТФХ методом лазерного импульсного нагрева. Проведен теоретический анализ погрешностей по определению теплофизических характеристик импульсными методами. Результаты диссертационной работы являются теоретической основой для определения параметров и границ применения импульсных методов.

Защищаемые положения:

1. Новый подход к анализу погрешностей и условий применения импульсных методов определения ТФХ материалов, в основе которого лежит численное моделирование реальных температурных полей, формирующихся в образцах в процессе экспериментов, из решения нестационарной задачи теплопроводности с нелинейными граничными условиями при высоких градиентах температур в приповерхностном слое образца, высоких темпах нагрева, локальности теплового воздействия и сравнение вычисленных по результатам численных экспериментов значений теплофизических характеристик материалов с истинными. Этот подход на этапе выбора методики экспериментального определения теплофизических характеристик материалов позволяет оценить как возможность применения импульсного метода для конкретного материала, так и величины методических погрешностей, характерные для этого метода и соответствующего материала.
2. Результаты численного анализа погрешностей метода лазерного импульсного нагрева в одномерной постановке, которые позволяют сделать обоснованное заключение о существенных ограничениях по толщинам образцов и видам материалов.
3. Результаты численного анализа погрешностей метода лазерного импульсного нагрева в двухмерной постановке, позволяющие сделать выводы о масштабах погрешностей в определении ТФХ материалов, обусловленных неоднородностью процесса реального теплопереноса в образце при проведении эксперимента, локальностью лазерного воздействия и неоднородностью плотности теплового потока лазерного импульса.
4. Результаты численного анализа погрешностей метода лазерного импульсного нагрева в трехмерной постановке, на основании которых можно сделать обоснованное заключение о том, что методические погрешности реально оцениваются только при решении нестационарной пространственной задачи теплопроводности и составляют в реальных условиях по коэффициентам теплопроводности и удельной теплоемкости от 4 % до 180 % от численного значения определяемых величин (в зависимости от отношения площадей зоны лазерного нагрева и поверхности образца).

Достоверность полученных результатов.

Обоснованность и достоверность численных исследований следует из проведенных проверок на сходимость и устойчивость решений на множестве сеток, а также подтверждается сравнением результатов, полученных при

решении задачи теплопроводности при импульсном лазерном нагреве аналитическим путем и численно. Полученные в диссертационной работе численные результаты моделирования для простейших постановок соответствуют аналитическому решению задачи импульсного нагрева.

Личный вклад автора.

Все работы по теме диссертации осуществлены автором или при его основном участии: постановка нестационарной задачи теплопроводности с нелинейными граничными условиями при высоких градиентах температур в приповерхностном слое образца, темпах нагрева и локальности теплового воздействия; выбор методов и разработка алгоритма её решения; определение численных значений величины и продолжительности теплового потока; проведение теоретических исследований влияния различных факторов на погрешности определения теплофизических характеристик методом импульсного лазерного нагрева; обработка и анализ полученных результатов, формулировка основных выводов диссертационной работы.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 8-й конференции «Теплофизика и гидродинамика технологических процессов» (Томск, 1989), 4-й Всероссийской научно-технической конференции "Энергетика: Экология, Надежность, Безопасность" (Томск, 1998), 14-й Всероссийской научно-технической конференции "Энергетика: Экология, Надежность, Безопасность" (Томск, 2008), «Современные технические системы и технологии» (Севастополь, 2008), «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2009).

Публикации.

Основные результаты, полученные при выполнении диссертации, опубликованы в 15 работах, в числе которых одно авторское свидетельство на изобретение, одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, пять статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, четыре статьи депонированы ВИНТИ. Также опубликованы материалы в сборниках трудов трех Всероссийских конференций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы, показана новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен анализ современного состояния проблемы погрешностей и условий применения импульсных методов определения ТФХ материалов. Показано, что возможности аналитических или приближенных решений не позволяют учитывать такие важнейшие факторы, как нелинейные эффекты, связанные с теплоотводом с нагреваемой и «холодной» поверхностей образца материала за счет излучения, локальность теплового воздействия лазерного импульса, неоднородность процессов теплопроводности в образце.

Отмечено, что во всех публикациях по применению импульсных методов определения ТФХ материалов в качестве примеров рассматриваются задачи для

материалов с высокой теплопроводностью (металлы и сплавы). В реальной же практике наибольший интерес представляют теплофизические характеристики новых неметаллических материалов, для которых существуют жесткие ограничения по максимально допустимым температурам разогрева.

Во второй главе приведена методика исследований по сформулированной проблеме, сущность которой заключается в решении комплекса задач теплопроводности, соответствующих реальным условиям экспериментов (неоднородность теплопереноса в образце, локальность воздействия лазерного луча, ограниченность мощности лазерного воздействия, распределение энергии излучения по поперечной координате и др.) по определению ТФХ материалов импульсными лазерными методами. Учет факторов, соответствующих реальным условиям экспериментов, исключает возможность применения аналитических или приближенных методов решения задач теплопроводности. Поэтому все исследования проводились методом численного моделирования процессов теплопроводности в образцах материалов. Решение всех задач выполнено методом конечных разностей.

Анализ влияния группы факторов на погрешности определения теплофизических характеристик материалов проводился на основе одномерной, двумерной и трехмерной моделей теплопроводности для области решения с неоднородными и нестационарными граничными условиями.

Представлены физическая и математическая постановка задачи при лазерном нагреве поверхности образца материала тепловым потоком конечной величины и продолжительности импульса. Рассматривается нестационарная

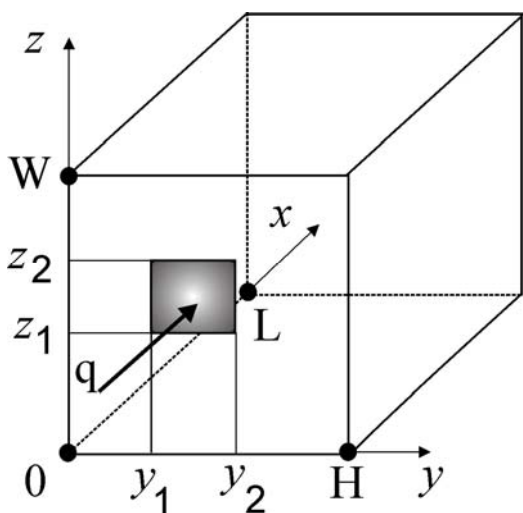


Рис.1. Схема области решения: L – толщина, H – ширина, Z – высота образца; $(y_2, y_1 - z_2, z_1)$ – размеры зоны лазерного нагрева; q – плотность теплового потока.

нелинейная задача теплопроводности материала при локальном воздействии на его поверхность теплового импульса конечной величины и временной протяженности. Температура исследуемого материала в начальный момент времени постоянна и равна T_0 . Участок «горячей» поверхности ($x = 0$) нагревается импульсом энергии теплового потока q (рис. 1). При этом происходит нагрев приповерхностного слоя материала с дальнейшим процессом теплопереноса внутри образца. Учитывается теплообмен с окружающей средой за счет конвекции и излучения. Вклад радиационной теплопередачи с поверхностями материала определен законом Стефана-Больцмана, что приводит к рассмотрению нелинейных

граничных условий. При постановке задачи приняты следующие допущения: 1) материал образца однородный и гомогенный; 2) теплофизические параметры материала не зависят от температуры. Учитывались основные физические процессы, протекающие при воздействии

импульсного лазерного излучения на материалы: теплообмен с окружающей средой, локальность и пространственная неоднородность лазерного воздействия, продолжительность импульса нагрева, неоднородность процесса теплопереноса в материале. Соответственно решения задач рассматривались в одномерной, двухмерной и трехмерной нестационарных постановках.

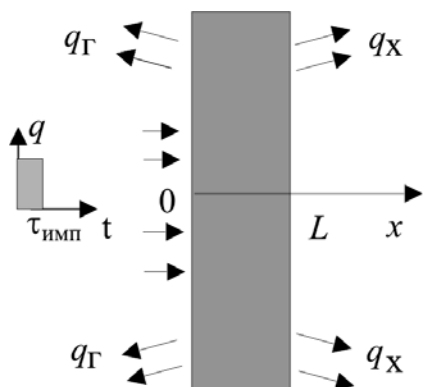


Рис. 2. Схема области решения.

конечные значения теплового потока q и времени его действия $\tau_{\text{имп}}$, а также нелинейность граничных условий.

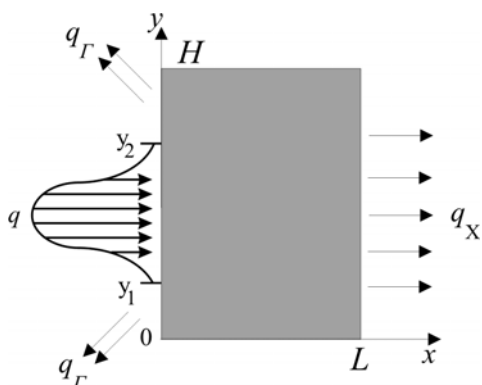


Рис.3. Схема области решения.

определения ТФХ материалов импульсным методом сводится к решению двумерной задачи теплопроводности при воздействии теплового импульса на поверхность ($x=0$) пластины. Область решения задачи представляет пластину толщиной L и шириной H (рис. 3), участок ($x=0$) которой нагревается мощным импульсом энергии q на участке $y_1 \dots y_2$. Математическая постановка задачи, учитывающая теплообмен с поверхностями образца конвекцией и излучением, включает в себя двумерное нестационарное уравнение теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями.

При постановке задачи в трехмерной постановке учитывались не рассматривавшиеся ранее факторы: 1) неоднородность процесса теплопереноса в образце конечных размеров, обусловленная локальным воздействием лазерного луча постоянной энергетической плотности при отсутствии теплообмена с окружающей средой; 2) влияние теплообмена с поверхностями образца при локальном воздействии лазерного луча постоянной энергетической плотности; 3) учет воздействия лазерного луча переменной по его сечению

энергетической плотности. Область решения представляет пластину в форме прямоугольного параллелепипеда толщиной L , шириной H и высотой W . Участок поверхности $x=0$ нагревается импульсом энергии q (рис. 1). Задача сводится к решению трехмерного нестационарного уравнения теплопроводности (1) с граничными (2)–(9) и начальным (10) условиями при учете конвективного теплообмена с поверхностями образца и интенсивности импульса энергии $q(y, z)$:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad \begin{array}{l} t > 0, 0 < x < L, \\ 0 < y < H, \\ 0 < z < W; \end{array} \quad (1)$$

$$x = 0: \quad -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) = q(y, z) + \alpha_r (T_e - T), \quad \begin{array}{l} y_1 \leq y \leq y_2, \\ z_1 \leq z \leq z_2, \\ t \leq \tau_{\text{имп}}; \end{array} \quad (2)$$

$$x = 0: \quad -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) = \alpha_r (T_e - T), \quad \begin{array}{l} y < y_1; y > y_2, \\ z < z_1; z > z_2, \\ t \leq \tau_{\text{имп}}; \end{array} \quad (3)$$

$$x = 0: \quad -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) = \alpha_r (T_e - T), \quad \begin{array}{l} 0 < y < H, \\ 0 < z < W, \\ t > \tau_{\text{имп}}; \end{array} \quad (4)$$

$$x = L: \quad \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) = \alpha_x (T_e - T), \quad \begin{array}{l} 0 < y < H, \\ 0 < z < W, \\ t > 0; \end{array} \quad (5)$$

$$y = 0: \quad -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0, \quad \begin{array}{l} 0 < x < L, \\ 0 < z < W, \\ t > 0; \end{array} \quad (6)$$

$$y = H: \quad \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0, \quad \begin{array}{l} 0 < x < L, \\ 0 < z < W, \\ t > 0; \end{array} \quad (7)$$

$$z = 0: \quad -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0, \quad \begin{array}{l} 0 < x < L, \\ 0 < y < H, \\ t > 0; \end{array} \quad (8)$$

$$z = W: \quad \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0, \quad \begin{array}{l} 0 < x < L, \\ 0 < y < H; \\ t > 0; \end{array} \quad (9)$$

$$t = 0: \quad T = T_0, \quad \begin{array}{l} 0 \leq x \leq L, \\ 0 \leq y \leq H, \\ 0 \leq z \leq W. \end{array} \quad (10)$$

Разностные аналоги исходных дифференциальных уравнений решены методом конечных разностей с применением неявной четырехточечной разностной схемы. Одномерные нелинейные разностные уравнения решены методом итераций с применением метода прогонки на каждом шаге итераций.

Особенность рассматриваемой задачи заключается в том, что в реальном возможном диапазоне изменения условий воздействия лазерного излучения на материалы в тонком приповерхностном слое образца возникают очень 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. Анализ результатов показывает, что относительная погрешность вычисления поля температуры составляет не более 0,03 %. Поэтому имеется основание для заключения о корректности выбранного метода численного расчета.

В третьей главе представлены результаты численного исследования процессов теплопроводности в материале и анализ погрешностей, соответствующих реальным условиям проведения экспериментов по определению ТФХ материалов импульсными лазерными методами.

В качестве материалов исследуемых образцов рассматривались медь, сталь, карбид циркония и полимерные материалы. Выбор таких материалов не накладывает каких-либо существенных ограничений на общность полученных результатов.

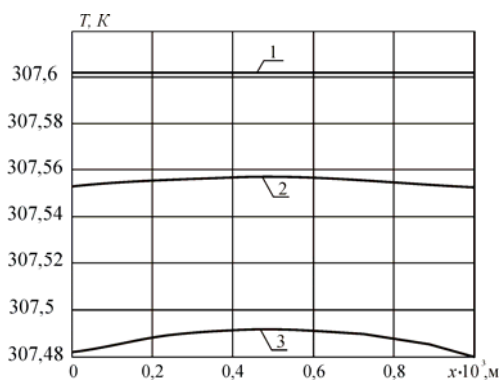


Рис. 4. Распределение $T(x)$, $t=0,3$ с, при α : 1) 0; 2) 10; 3) 25 Вт/(м²К).

Для установления масштабов влияния конвективного и лучистого теплообмена с нагреваемой и «холодной» поверхностями материала на результаты определения теплофизических характеристик проведено численное решение одномерной задачи теплопроводности при конечной величине интенсивности импульса лазерного нагрева.

На рис. 4 приведены типичные результаты численного моделирования для стальной пластины в виде распределения $T(x)$ для момента времени $t=0,3$ с с учетом конвективного теплоотвода на «горячей» и «холодной» поверхностях при температурах $T_0 = 293$ К и $T_e = 273$ К. Из рис. 4 видно, что с увеличением коэффициента конвективного теплообмена, как и следовало ожидать, наблюдается уменьшение значения максимальной температуры «холодной» поверхности образца.

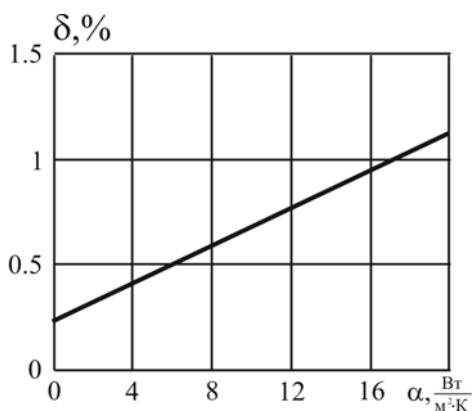


Рис. 5. Зависимость погрешности δ определения удельной теплоемкости от коэффициента конвективного теплообмена α

На рис. 5 приведена зависимость погрешности определения удельной теплоемкости δ от величины коэффициента конвективного теплообмена. Рис. 5

показывает, что с увеличением интенсивности естественной конвекции

величина погрешности возрастает и достигает 1,1 % при значении коэффициента конвективного теплообмена $20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Решение одномерной задачи теплопереноса проведено также на примере карбида циркония. Распространение тепла в карбиде циркония аналогично процессу теплопереноса стали. Влияние конвективного и лучистого теплообмена при малых величинах температур материала и среды приводят к незначительному росту погрешности определения удельной теплоемкости и температуропроводности. В реальных условиях при локальном разогреве поверхности до 1000 К и более при использовании более мощного источника нагрева интенсивность естественной конвекции и излучения в окрестности зоны нагрева может быть существенно выше, что приведет к увеличению погрешности определения теплофизических характеристик материалов.

В работе обоснованы условия применения метода лазерного импульса для многочисленных материалов с относительно низкой теплопроводностью ($\lambda = 0,2 \dots 0,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$) в зависимости от величины и продолжительности теплового импульса, толщины образца, типа материала, которые ранее отсутствовали. Для установления влияния величины импульсного теплового потока к поверхности материала и толщины экспериментальных образцов (в зависимости от типа материала), обеспечивающих достоверность определения теплофизических характеристик импульсным методом, была численно решена одномерная задача теплопроводности при конечной величине интенсивности импульса лазерного нагрева. Численный анализ температурных полей проводился для типичных полимерных материалов (полиэтилен, полиамид, полибутилентерефталат).

Распределения $T(x)$ для образцов полимерных материалов при длительности импульса $0,1 \text{ с}$ и величине теплового потока $q = 10^8 \text{ Вт}/\text{м}^2$ показали наличие жестких ограничений по величине теплового потока, длительности импульса, толщинам образцов. Не для всех материалов возможна реализация импульсных методов определения ТФХ вследствие превышения температуры нагреваемой поверхности образца выше температуры начала деструкции материала. Установлена необходимость существенного уменьшения величин предельных (максимальных) тепловых потоков для определения ТФХ материалов с низкой теплопроводностью импульсным методом. При толщине образца 5 мм величина максимального теплового потока составила: для полиэтилена высокой плотности $2,76 \cdot 10^5 \text{ Вт}/\text{м}^2$; полиамида ПА-610 – $3,42 \cdot 10^5 \text{ Вт}/\text{м}^2$; полибутилентерефталата – $5,06 \cdot 10^5 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Численные исследования показали необходимость существенного уменьшения толщин образцов для определения ТФХ материалов с низкой теплопроводностью импульсным методом. Максимальные значения толщин образцов, при которых температура «холодной» стенки возрастает не менее чем на необходимое для расчетов ТФХ значение $T_{\text{max}} = 3 \dots 6 \text{ К}$ (при предельных величинах теплового потока), составляют: для полиэтилена высокой плотности $1,8 \text{ мм}$; полиамида ПА-610 – $2,0 \text{ мм}$; для полибутилентерефталата – 1 мм . Полученные результаты показывают, что при определении ТФХ материалов с

низкой теплопроводностью импульсными методами существуют ограничения по величине теплового потока и толщине образцов, что накладывает ограничения на типы исследуемых материалов, для которых возможно изготовление образцов толщиной 1–2 мм без изменения их характерной структуры.

Для установления влияния продолжительности импульса $\tau_{\text{имп}}$ на результаты определения теплофизических характеристик проведено численное решение одномерной задачи теплопроводности при конечной величине теплового потока лазерного нагрева с учетом радиационного теплоотвода на «горячей» и «холодной» поверхности образца.

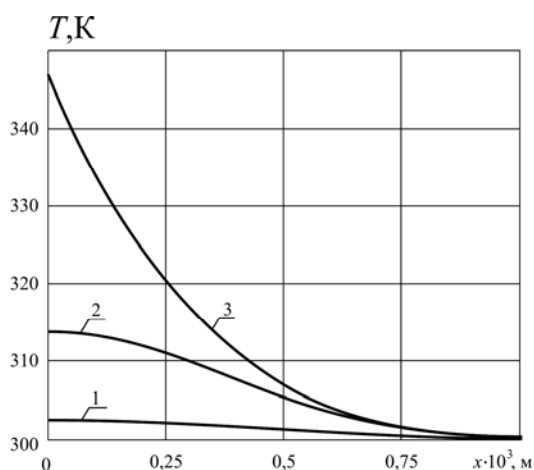


Рис. 6. Распределение $T(x)$, $t=20$ мс, при $\tau_{\text{имп}}$: 1) 0,1; 2) 5,0; 3) 10,0 мс.

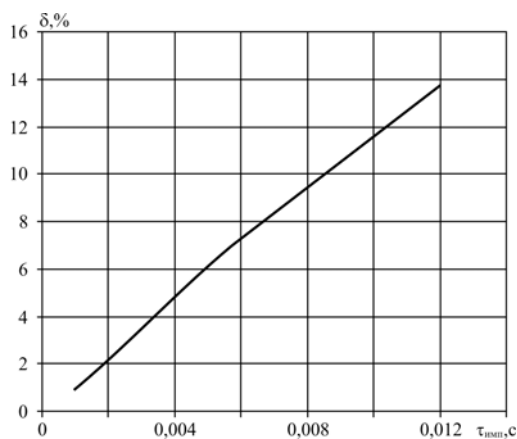


Рис.7. Зависимость погрешности определения коэффициента температуропроводности δ от продолжительности импульса $\tau_{\text{имп}}$.

На рис. 6 приведены типичные результаты численного моделирования поля температур стали 1X18Н9Т. Установлено, что, как и следовало ожидать, с увеличением длительности импульса растет температура на «горячей» поверхности образца. Проведено определение характеристик T_{max} и $\tau_{0,5}$ при условии постоянства величины теплового потока q и изменения длительности импульса $\tau_{\text{имп}} = 0,1 \dots 12$ мс. Установлено, что при увеличении продолжительности импульса значения T_{max} и $\tau_{0,5}$ растут с увеличением $\tau_{\text{имп}}$, что подтверждается также аналитическими расчетами. Расчет удельной теплоемкости на примере стали 1X18Н9Т показывает только незначительное возрастание погрешности (до 0,2 %) с увеличением продолжительности импульса, т. к. с увеличением $\tau_{\text{имп}}$ возрастает значение поглощенной образцом теплоты Q . На рис. 7 приведена зависимость погрешности определения коэффициента температуропроводности стали 1X18Н9Т δ от величины длительности импульса $\tau_{\text{имп}}$. С увеличением $\tau_{\text{имп}}$ погрешность определения a возрастает существенно и

достигает 14 % при значении времени импульса $\tau_{\text{имп}} = 0,012$ с. Аналогичные результаты получены и для других материалов. Проведенные численные исследования позволяют сделать вывод, что с ростом длительности импульса существенно увеличиваются погрешности определения коэффициентов температуропроводности и теплопроводности материалов.

Для анализа влияния локальности воздействия в условиях энергетической однородности лазерного луча проведены численные исследования процесса теплопроводности в двумерной постановке. На рис 8. показаны типичные распределения температуры $T(x, y)$ в образце стали Ст. 10 в моменты времени $t \approx 0,02$ с и $t \approx 0,06$ с при $\tau_{\text{имп}} = 0,0015$ с.

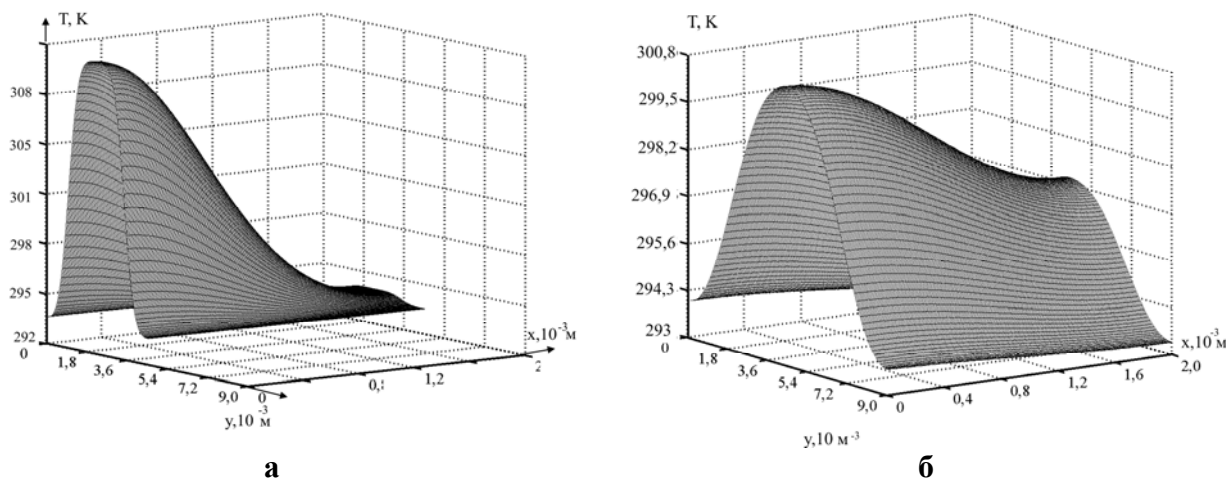


Рис. 8. Распределение $T(x, y)$ в момент времени t : а) 0,02; б) 0,06 с.

При воздействии лазерного импульса на границе $x = 0$ распространение тепла осуществляется не только по координатному направлению x , но и по координатному направлению y . При этом температурный профиль имеет ярко выраженный максимум в центре действия лазерного луча. Температура в зоне лазерного нагрева достигает 304 К. В направлении от центра зоны лазерного нагрева к внешним граням пластины температура резко снижается (рис. 8а). В момент времени $t \approx 0,06$ с (рис. 8б) происходит выравнивание температур «горячей» и «холодной» поверхностей пластины в зоне лазерного нагрева с продолжением перетока тепла по поперечной координате y . Полученные результаты позволяют сделать вывод о существенно неоднородном процессе распространения тепла в исследуемой системе. Этот вывод может показаться очевидным, если не принимать во внимание, что в подавляющем большинстве работ по моделированию лазерного импульсного воздействия на материалы рассматривались одномерные модели.

Типичными являются результаты численного анализа погрешностей определения ТФХ стали Ст. 10. При сравнении результатов численного моделирования с аналитическими результатами решения одномерной задачи импульсного лазерного нагрева установлено, что погрешность определения температуры T_{max} составляет около 0,3 %, а погрешность определения времени $\tau_{0,5}$ – до 11 %, что сказывается при расчете ТФХ. Так погрешность определения удельной теплоемкости стали составляет до 23 %, коэффициента температуропроводности до 12 %, коэффициента теплопроводности до 35 %.

Учет конвективного и лучистого теплообмена на поверхностях пластины приводит, как и следовало ожидать, к увеличению погрешности. Погрешность

определения теплоемкости при значении коэффициента конвективного теплообмена в режиме свободной конвекции при $\alpha = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ и степени черноты поверхностей $\varepsilon = 0,5$ составляет до 36 %.

Решение двухмерной задачи теплопереноса проведено также на примерах карбида циркония и полиамида ПА-610. Распространение тепла в карбиде циркония и полиамиде аналогично процессу теплопереноса в стали. Однако процесс теплопереноса в полиамиде происходит с существенно меньшей интенсивностью по сравнению со сталью. Выделенная особенность обусловлена различием коэффициентов теплопроводности полиамида и стали.

Для анализа влияния локальности воздействия и энергетической неоднородности лазерного луча

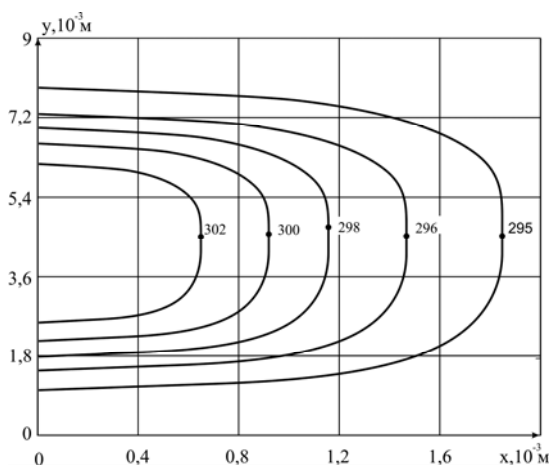


Рис. 9. Распределение $T(x, y)$ стали в плоскости оси лазерного луча.

проведен численный анализ погрешностей определения ТФХ на базе двухмерной модели теплопроводности при конечной величине теплового потока лазерного нагрева.

Величина теплового потока лазерных установок не является постоянной по пространственным координатам ввиду наличия поперечных мод, определяемых условиями резонанса внутри установки. Пространственная неоднородность энергетической характеристики источника лазерного излучения определяется выражением:

$q(y) = q_0 \cdot \exp(-y^2 / k^2)$, где q_0 – максимальная плотность теплового потока в центре лазерного луча, $\text{Вт}/\text{м}^2$; k – коэффициент сосредоточенности потока.

На рис. 9 показано распределение температуры (положения характерных изотерм) стали Ст.10 в момент времени $t=0,02 \text{ с}$ в плоскости оси лазерного луча. Распространение тепла осуществляется не только по координатному направлению оси x , но и по координатному направлению y . При этом температурный профиль имеет ярко выраженный максимум в точке, соответствующей наибольшему значению величины теплового потока. Температура в центре зоны лазерного нагрева достигает 302 К при $q_0 = 2,25 \cdot 10^7 \text{ Дж}/\text{м}^2$. В направлении к границам пластины температура постепенно уменьшается. Полученные результаты позволяют сделать обоснованный вывод о существенно нестационарном и двухмерном характере процесса распространения тепла в исследуемом материале, что приводит уменьшению значения T_{max} на «холодной» поверхности образца по сравнению с одномерной постановкой задачи, не учитывающей неоднородности теплового потока по сечению лазерного луча.

Сравнение результатов проведенного численного моделирования $T(x, y)$ при значении коэффициента сосредоточенности теплового потока $k = 0,06$ с полученными аналитически по методике Паркера значениями температуры T_{max}

и времени $\tau_{0,5}$ показало, что погрешность определения температуры T_{\max} составляет около 0,36 %, а отклонение в определении времени $\tau_{0,5}$ до 13,5 %. Последнее соответственно сказывается при вычислении ТФХ. Так погрешность определения удельной теплоемкости рассматриваемой стали составляет до 30 %, коэффициента температуропроводности до 14 %, коэффициента теплопроводности до 44 %. Полученные результаты позволяют сделать обоснованный вывод о существенно нестационарном и двухмерном характере процесса распространения тепла в исследуемом материале, что приводит уменьшению значения T_{\max} на «холодной» поверхности образца по сравнению с постановкой задачи, не учитывающей неоднородности теплового потока по сечению лазерного луча.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в реальной практике определение теплофизических характеристик материалов методом импульсного нагрева сопряжено с очень высокими (и неприемлемыми во многих практически важных приложениях) ошибками. Из приведенных результатов можно также сделать вывод, что двухмерная модель существенно более точно описывает температурное поле материала при воздействии импульсного лазерного источника. При этом масштабы погрешностей настолько велики, что можно сделать вывод о необходимости существенных ограничений размеров образца материала, как по толщине, так и по поперечным направлениям. Очевидно, что методами импульсного лазерного нагрева нецелесообразно определять теплофизические характеристики широко распространенных конструкционных материалов стекло– и углепластиков, а также резиноподобных армированных теплозащитных и теплоизоляционных материалов с наполнением в виде гранул, нитей, капсул, в виду невозможности изготовления образцов без нарушения целостности структуры материала.

Анализ влияния неоднородности процесса теплопереноса в материале

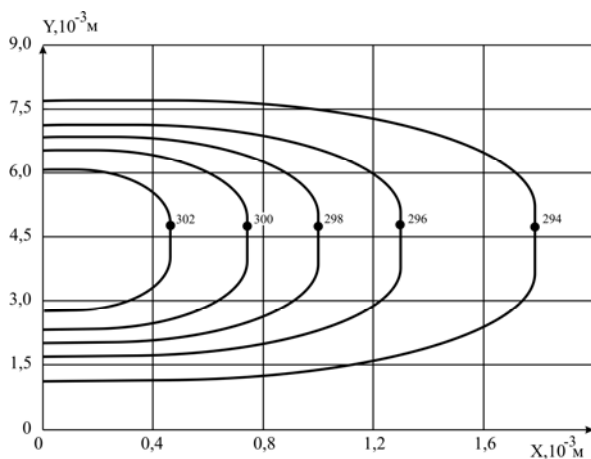


Рис. 10. Положения характерных изотерм стали в плоскости $z = 4,5$ мм при $t = 20$ мс

проведён путём численного решения трехмерной задачи теплопроводности при конечной величине теплового потока лазерного нагрева. На рис. 10 показано типичное положение характерных изотерм стали Ст. 10 в плоскости $Z = 4,5$ мм при $t = 20$ мс. Из рис. 10 следует, что температура изменяется не только по толщине пластины, но и по поперечным координатам, что приводит к существенному снижению значения T_{\max} на «холодной» поверхности образца по сравнению с одномерной постановкой задачи.

При сравнении результатов численного моделирования с одномерными аналитическими расчетами по методике Паркера установлено, что погрешность определения температуры T_{\max} и времени $\tau_{0,5}$ составляет соответственно около 0,06 % и 0,04 % при нагреве всей «горячей» поверхности образца лазерным импульсом, что сказывается при расчете ТФХ. Так погрешность определения удельной теплоемкости составляет около 4 %, а коэффициента температуропроводности 0,1%. При уменьшении площади зоны лазерного нагрева S_n и неизменной «горячей» поверхности S_r погрешности определения ТФХ возрастают. На рис. 11 приведена зависимость погрешности определения

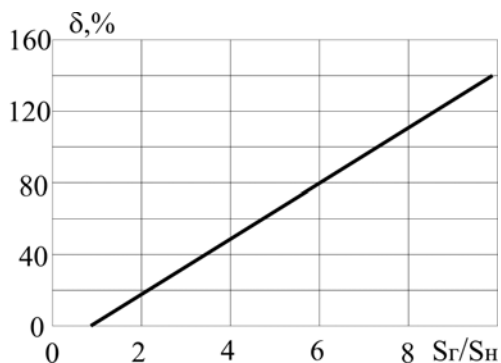


Рис. 11. Зависимость погрешности определения удельной теплоемкости δ от S_r/S_n .

удельной теплоемкости стали δ от величины отношения площадей S_r/S_n . Хорошо видно, что с уменьшением площади зоны лазерного нагрева S_n величина погрешности определения удельной теплоемкости достигает 140 % при $S_r/S_n = 9$. Погрешность определения коэффициента теплопроводности превышает погрешность определения удельной теплоемкости.

ВЫВОДЫ

1. Впервые сформулирован подход к анализу погрешностей и условий применения импульсных методов определения ТФХ материалов, в основе которого лежит численное моделирование реальных температурных полей, формирующихся в образцах в процессе экспериментов, из решения нестационарной задачи теплопроводности с нелинейными граничными условиями при высоких градиентах температур в приповерхностном слое образца, высоких темпах нагрева, локальности теплового воздействия и сравнение вычисленных по результатам численных экспериментов значений теплофизических характеристик материалов с истинными.

2. Проведен анализ влияния группы факторов на погрешности определения ТФХ материалов на основе одномерной, двухмерной и трехмерной моделей теплопроводности для области решения с неоднородными и нестационарными граничными условиями при высоких градиентах температур в приповерхностном слое образца и темпах нагрева, а также локальности теплового воздействия.

3. Результаты, полученные при решении одномерной задачи теплопроводности в условиях импульсного нагрева, позволяют сделать вывод об увеличении погрешности определения удельной теплоемкости с учетом теплообмена на всех открытых границах образца. Для материалов с низкой теплопроводностью при решении одномерной задачи установлены границы диапазонов возможного изменения интенсивности импульсного теплового потока, продолжительности импульса и толщины образца (в зависимости от типа материала), обеспечивающих достоверность определения ТФХ.

4. При решении двумерной задачи теплопроводности импульсного нагрева показано влияние на погрешность определения ТФХ локального воздействия лазерного импульса и неоднородности распределения энергии по поперечной координате. Установлено, что неучет этих факторов приводит к погрешностям определения удельной теплоемкости стали до 25 %, коэффициента температуропроводности до 13%, коэффициента теплопроводности – до 38 %. Показано, что неоднородность пространственной энергетической плотности лазерного потока на поверхности пластины приводит к увеличению погрешностей. Так погрешность определения теплоемкости при значении коэффициента сосредоточенности теплового потока $k = 0,06$ составляет до 30 %, коэффициента температуропроводности до 14 %, коэффициента теплопроводности до 44 %.

5. Результаты, полученные при решении трехмерной задачи теплопроводности в условиях импульсного нагрева, позволяют сделать вывод о влиянии на погрешность определения ТФХ неоднородного теплопереноса в образце при локальности воздействия лазерного луча. Установлено, что на методику определения ТФХ импульсным методом накладываются жесткие ограничения по размерам образца. Площадь нагреваемой поверхности образца должна соответствовать площади лазерного нагрева.

6. Результаты проведенных исследований показали, что теоретическая оценка погрешностей метода лазерного импульса создает условия для достоверного определения ТФХ любых материалов с установлением методических ошибок, которые можно называть систематическими. Кроме того, знание масштабов этих ошибок создает предпосылки для постановки новых задач по снижению погрешностей определения ТФХ этим методом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ПРЕДСТАВЛЕНЫ В ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Загромов Ю.А., Кац М.Д. Расчет теплофизических характеристик покрытия, нанесенного на металлическое основание, с использованием импульсного метода. ТПУ. – Томск. – 17с. Деп. в ВИНТИ 09.03.87, №1686-B87.

2. Андык В.С., Загромов Ю.А., Кац М.Д. Использование импульсного метода для измерения теплоемкости материалов. ТПУ. – Томск. – 8 с. Деп. в ВИНТИ 12.11.87, №17999-B87.

3. А.с. 1465751СССР: МКИ³ G 01 N 25/18. Устройство для определения коэффициента температуропроводности твердых материалов: / В.П. Вавилов, А.И. Иванов, В.В. Ширяев, А.И. Суппес, М.Д. Кац.– заяв. 1.06.87; опубл. 15.03.89, Бюл. №10.– 3с.

4. Загромов Ю. А., Кац М. Д. Усилитель постоянного напряжения для регистрации малых изменений температуры //Материалы Всесоюзной конференции «Теплофизика и гидродинамика технологических процессов». – Томск: Изд-во ТПУ. – 1989.– С. 128–131.

5. Кац М.Д., Карауш С.А., Загромов Ю.А., Бугаев И.В. Об учете теплообмена с поверхности образца при измерении теплофизических характеристик покрытий импульсным методом. // Материалы Всесоюзной

- конференции «Вопросы теплообмена в строительстве». – Ростов н/Д: Ростовский инж. строит. ин-т. – 1990. – С. 136–141.
6. Кац М.Д., Карауш С.А., Бугаев И.В. Влияние теплотерь с поверхности двухслойного образца на измерение теплофизических характеристик импульсным методом // Инженерно-физический журнал. – 1991. – Т. 60. – №1. – С. 127–130.
7. Кац М.Д. Расчет температурных полей покрытия на металлическом основании при наличии теплообмена с окружающей средой // Материалы четвертой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд-во ТПУ, 1998. – С. 96–97.
8. Кузнецов Г.В., Кац М.Д. Об условиях применения импульсных методов определения теплофизических характеристик конструкционных материалов // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – №4. – С. 10-13.
9. Кац М.Д. О погрешностях определения теплофизических характеристик конструкционных материалов импульсным методом // Материалы четырнадцатой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – С. 79–81.
10. Кузнецов Г.В., Кац М.Д. Анализ погрешностей определения импульсными методами теплофизических характеристик конструкционных материалов // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – №4. – С. 5–8.
11. 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.
12. 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. 45–48.
13. Кузнецов Г.В., Кац М.Д. Расчет нестационарного двухмерного температурного поля пластины при локальном импульсном тепловом воздействии малой временной протяженности с теплоотводом на границах // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2009612866. – Бюлл. прогр. №6, 2009.
14. Кузнецов Г.В., Кац М.Д. Погрешности определения теплофизических характеристик карбида циркония импульсным методом, обусловленные локальным воздействием лазерного луча. ТПУ. – Томск. – 12с. Деп. ВИНТИ 18.06.09, № 382 – В2009.
15. Кузнецов Г.В., Кац М.Д. Оценка погрешности определения теплофизических характеристик карбида циркония импульсным методом при пространственной неоднородности лазерного луча. ТПУ. – Томск. – 10с. Деп. ВИНТИ 01.07.09, № 419 – В2009.