

**Выводы**

1. Предложена методика испытаний и обработки экспериментальных данных инфракрасного термографического контроля плазменных покрытий, включающая моделирование дефектов методами теории теплопроводности; оптимизацию эксперимента, анализ шумов; компьютерную обработку последовательностей изображений, построение бинарных карт дефектов с оценкой их параметров.

2. Метод обеспечивает распознавание отслоений и неравномерностей толщины покрытий. Алгоритмы обработки последовательностей термограмм обеспечивают количественную оценку параметров дефектов покрытия при существенном повышении соотношения сигнал/шум.
3. Экспериментальные данные по контролю эталонных и реальных образцов показывают правильность используемого подхода.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 09-08-99022 – р\_офи.*

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Marinetti S., Vavilov V., Bison P.G., Grinzato E., Cernuschi F. Quantitative infrared thermographic nondestructive testing of thermal barrier coatings // Mater. Evaluation. – 2003. – V. 61. – № 6. – P. 773–780.
2. Mailliet D., Andre S., Batsale J.-C., et al. Thermal quadrupoles: Solving the heat equation through integral transforms. – London: John Wiley & Sons Publ., 2000. – 360 p.

3. Zalameda J.N., Rajic N., Winfree W.P. A comparison of image processing algorithms for thermal nondestructive evaluation // Thermosense–XXV: Proc. SPIE. – Orlando, USA, 2003. – V. 5073. – P. 374–385.

*Поступила 09.06.2010 г.*

УДК 536.2.083

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ ПРИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА

Г.В. Кузнецов, М.Д. Кац

Томский политехнический университет

E-mail: Katz@tpu.ru

*Численно решена задача о пространственном нестационарном температурном поле образца материала при локальном неоднородном воздействии на его поверхность теплового импульса малой временной протяженности. Проведена оценка масштабов погрешностей определения теплофизических характеристик материала импульсным методом, связанная с предположением об одномерности процесса теплопереноса в образце и пространственной однородности лазерного импульса.*

**Ключевые слова:**

*Теплофизические характеристики, импульсный метод, методические погрешности, температуропроводность, удельная теплоемкость, теплопроводность.*

**Key words:**

*Thermophysical characteristics, pulse method, truncation error, thermal diffusivity, specific heat capacity, heat conductivity.*

**Введение**

В последние десятилетия повышенное внимание привлекают импульсные методы определения коэффициентов температуропроводности и теплопроводности, а также теплоемкости материалов в условиях достаточно высоких температур. Наибольший интерес для решения этих задач представляет метод лазерного импульса [1–3], 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.

Полученная по итогам однократного эксперимента информация позволяет рассчитать удельную

теплоемкость, а также коэффициенты температуропроводности и теплопроводности материала с использованием выражений:

$$a = 1,37 L^2 / (\pi^2 \tau_{0,5}); \quad (1)$$

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

$$\lambda = ac\rho, \quad (3)$$

где  $L$  – толщина образца, м;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $a$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с;  $\tau_{0,5}$  – время достижения половины максимальной температуры перегрева «холодной» (ненагреваемой) поверхности образца, с;  $c$  – теплоемкость, Дж/(кг·К);  $Q$  – плотность теплового потока, поглощенная об-

разном, Вт/м<sup>2</sup>;  $T_{\max}$  – максимальная температура перегрева «холодной» поверхности образца относительно его начальной температуры  $T_0$ , К;  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К).

Однако практическая реализация импульсного метода существенно отличается от идеализированной математической модели, заложенной в [1], что приводит к погрешностям определения ТФХ.

Неоднородное нагревание поверхности образца является одним из самых значимых источников погрешности в измерении ТФХ импульсным лазерным методом [3]. Импульсные лазеры большой мощности, используемые в экспериментальных установках, работают, как правило, в многомодовом режиме, что создает энергетическую неоднородность в сечении лазерного пучка [7, 8].

Учет неоднородности пучка лазерного импульса и моделирование тепловых процессов в материале исследовался ранее в работах [4–7]. При этом использовались математические модели, представляющие собой решение дифференциального уравнения теплопроводности в линейной постановке с использованием линейных или линеаризованных граничных условий. Такие модели просты и удобны в применении. Однако расчеты с их использованием не всегда обеспечивают хорошее совпадение с экспериментальными данными по определению ТФХ материалов. Из-за отсутствия общих приемов точного решения нелинейных задач теплопроводности авторы [4–7] применяли приближенные способы, сущность которых сводится к введению поправок, учитывающих влияние тех или иных факторов на величины ТФХ, или достижение условий эксперимента, при которых воздействие этих факторов сводится к минимуму.

В данной работе проведен анализ погрешностей измерения ТФХ, обусловленный локальностью и пространственной неоднородностью лазерного луча, имеющих место при проведении реальных экспериментов. Учет этих факторов исключает возможность применения аналитических или приближенных методов решения задач теплопроводности. Поэтому исследования проводились методом численного моделирования процессов теплопроводности в образцах материалов – методом конечных разностей [11]. Анализ выполнен на примере типичного конструкционного материала – стали для образцов прямоугольной и цилиндрической формы.

Погрешности вычислений ТФХ материала методом лазерного импульса находили из сравнения действительных значений теплофизических характеристик материалов со значениями, полученными в результате численного моделирования условий реализации экспериментов по их определению рассматриваемым методом, с учетом ряда факторов, неучитываемых при постановке задачи [1]. В этом случае абсолютная погрешность метода равна разности между известным (действительным) значением ТФХ –  $x_d$  (коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , температуропроводности  $a$ , удельной теплоемкости  $c$ ) и полученным в результате

численного эксперимента по его характеристическим параметрам –  $x_q$  (максимальной температуре перегрева  $T_{\max}$  и времени  $\tau_{0,5}$  достижения половины максимальной температуры ненагреваемой поверхности образца). Относительную погрешность определения ТФХ рассчитывали по формуле

$$\delta = \frac{|x_q - x_d|}{x_d} \cdot 100 \, \%.$$

#### Постановка задачи

При исследовании образцов в форме параллелепипеда область решения задачи представляла пластину толщиной  $L$  и шириной  $H$  (рис. 1), участок поверхности  $x=0$  которой нагревался мощным локальным импульсом энергии  $q(y)$ . Зависимость  $q=f(y)$  описывается гауссовым пространственным распределением, что характерно для лазеров [8].

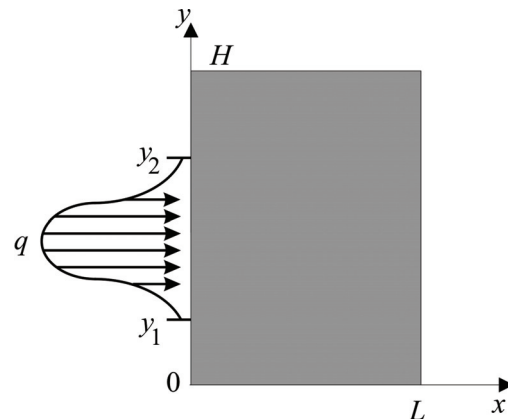


Рис. 1. Область решения в декартовой системе координат

Теплообмен с окружающей средой отсутствовал. Погрешности вычисления ТФХ определялись путем сравнения значений  $T_{\max}$  и  $\tau_{0,5}$ , полученных теоретически, с учетом и без учета рассматриваемого фактора. Задача сводилась к решению нестационарного уравнения теплопроводности (4) с граничными (5–8) и начальным (9) условиями:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (4)$$

$$x=0: -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q(y), \quad y_1 \leq y \leq y_2, \quad t \leq t_{\text{имп}}; \quad (5)$$

$$x=0: -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad y_1 > y, \quad y > y_2, \quad t > 0; \quad (6)$$

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

$$y=0: -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad 0 \leq x \leq L, \quad t > 0; \quad (8)$$

$$y=H: \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad 0 \leq x \leq L, \quad t > 0; \quad (9)$$

$$t = 0; \quad T = T_0, \quad (10)$$

где  $T$  – температура образца;  $T_0$  – начальная температура образца;  $t$  – время.

В реальных методиках импульсного определения ТФХ материалов используют образцы не только в форме параллелепипеда, но и в форме цилиндра. В этом случае область решения задачи представляет собой цилиндр радиусом  $R$  и толщиной  $L$ . Лазерный луч в поперечном сечении, как правило, представляет собой круг. Задача сводилась к решению нестационарного уравнения теплопроводности (12) с граничными и начальным условиями:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad 0 < r < R; \quad (12)$$

$$z = 0: -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) = q(r), \quad r \leq R_{\text{нагр}}, \quad t \leq \tau_{\text{имп}};$$

$$z = 0: -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0, \quad r > R_{\text{нагр}}, \quad t > 0;$$

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

$$z = L: \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0, \quad 0 < r < R, \quad t > 0;$$

$$r = 0: \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0, \quad 0 < z < L, \quad t > 0;$$

$$r = R: \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0, \quad 0 < z < L, \quad t > 0;$$

$$t = 0; \quad T = T_0.$$

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.

Для решения систем (4)–(10) и (12) использован метод конечных разностей [11]. Разностные аналоги дифференциального уравнения и краевые условия решены методом прогонки с использованием неявной итерационной четырехточечной разностной схемы [11].

### Результаты и обсуждение

На рис. 2, 3 приведены типичные результаты численного моделирования поля температур в образце стали Ст10 в форме параллелепипеда с теплофизическими характеристиками:  $\lambda=46$  Вт/(м·К),  $c=460$  Дж/(кг·К),  $\rho=7800$  кг/м<sup>3</sup> [12] при времени нагрева  $t=0,02$  с. Следует отметить, что продолжи-

тельность импульса выбиралась такой, чтобы обеспечить устойчивое, хорошо регистрируемое изменение температуры «холодной» (ненагреваемой) поверхности образца.

Выбор параметров теплового потока и длительности теплового нагрева проведен в соответствии с реальными возможными значениями лазерного источника в экспериментальных установках для определения ТФХ материалов, а также с учетом общих положений метода [1]: получение «температурного перегрева» на «холодной» поверхности образца не менее 5...6 К. Таким условиям соответствуют параметры лазерного источника установки «Квант» [8]: плотность потока  $q=2,25 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, продолжительность импульса  $\tau_{\text{имп}}=1,5$  мс, длина волны излучения 1,06 мкм.

Численный анализ проведен при типовых для рассматриваемых экспериментов значениях:  $T_0=293$  К,  $L=0,002$  м,  $H=0,009$  м. В [9] показано, что отношение площадей нагреваемой поверхности и площади лазерного нагрева должно быть минимальным для минимизации погрешностей определения ТФХ материалов при проведении эксперимента методом лазерного импульса. Однако для исключения краевых эффектов взаимодействия лазерного излучения с изоляционным слоем отношения площадей поверхности и лазерного нагрева должны отличаться хотя бы на 10 %. Поэтому ширина зоны нагрева составила  $H_{\text{нагр}}=0,007$  м при  $H=0,009$  м.

Проведено определение характеристик  $\tau_{0,5}$  и  $T_{0,5}$  при условии постоянства величины теплового потока  $q$  по координате  $y$ . Использовалась разностная сетка с шагами по времени до  $\tau=2 \cdot 10^{-5}$  с и по пространству до  $h=1 \cdot 10^{-6}$  м.

Установлено (рис. 2, 3), что при локальном однородном тепловом потоке в зоне нагрева температура изменяется не только по толщине пластины, но и по поперечной координате, что приводит уменьшению значения  $T_{\text{max}}$  на «холодной» поверхности образца по сравнению с одномерной постановкой задачи.

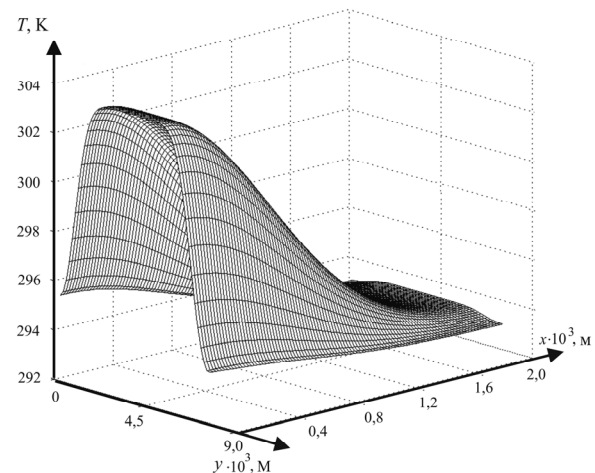
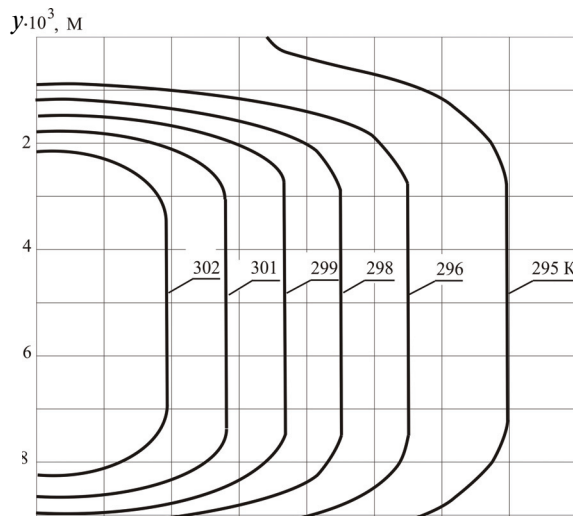


Рис. 2. Однородное температурное распределение теплового потока ( $t=0,02$  с)



**Рис. 3.** Положения характерных изотерм в плоскости лазерного луча ( $t=0,02$  с) при однородном распределении теплового потока по координате  $y$

Полученные результаты позволяют сделать обоснованный вывод о существенно неоднородном распределении теплоты в исследуемой системе и ее влиянии на погрешности определения ТФХ материала.

Пространственная неоднородность энергетических характеристик реальных источников лазерного излучения определялась выражением [10]:

$$q(y) = q_0 \exp(-k^2 y^2),$$

где  $q_0$  — максимальная плотность теплового потока в центре лазерного пятна, Вт/м²;  $k$  — коэффициент сосредоточенности потока, м⁻¹.

Результаты численного решения двумерной нестационарной задачи теплопроводности в декартовой системе координат приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Результаты численного решения двумерной нестационарной задачи теплопроводности в декартовой системе координат

| $k, \text{м}^{-1}$ | $T_{\text{max}}, \text{К}$ | $\tau_{0,5}, \text{с}$ | $\delta\epsilon, \%$ | $\delta\alpha, \%$ | $\delta\lambda, \%$ |
|--------------------|----------------------------|------------------------|----------------------|--------------------|---------------------|
| 0                  | 297,27                     | 0,0409                 | 10,17                | 5,68               | 15,85               |
| 50                 | 297,24                     | 0,0408                 | 10,87                | 5,96               | 16,83               |
| 100                | 297,16                     | 0,0406                 | 12,94                | 6,77               | 19,71               |
| 150                | 297,043                    | 0,0401                 | 16,3                 | 8,05               | 24,35               |
| 200                | 296,89                     | 0,0394                 | 20,97                | 9,70               | 30,67               |

Установлено, что при численном решении задачи в декартовой системе координат погрешности определения удельной теплоемкости  $\delta\epsilon$ , коэффициентов температуропроводности  $\delta\alpha$  и теплопро-

водности  $\delta\lambda$  стали, при характерном размере источника лазерного нагрева 7 мм, увеличиваются с возрастанием коэффициента  $k$  и составляют соответственно 21, 10 и 31 % при значении  $k=200 \text{ м}^{-1}$ .

Результаты численного решения двумерной нестационарной задачи теплопроводности в цилиндрической системе координат показаны в табл. 2. Радиус нагреваемой поверхности образца 4,5 мм.

**Таблица 2.** Результаты численного решения двумерной нестационарной задачи теплопроводности в цилиндрической системе координат

| $k, \text{м}^{-1}$ | $T_{\text{max}}, \text{К}$ | $\tau_{0,5}, \text{с}$ | $\delta\epsilon, \%$ | $\delta\alpha, \%$ | $\delta\lambda, \%$ |
|--------------------|----------------------------|------------------------|----------------------|--------------------|---------------------|
| 0                  | 296,847                    | 0,0387                 | 22,26                | 11,93              | 34,19               |
| 50                 | 296,809                    | 0,03856                | 23,47                | 12,29              | 35,76               |
| 100                | 296,697                    | 0,03819                | 27,22                | 13,40              | 40,62               |
| 150                | 296,522                    | 0,03762                | 33,54                | 15,11              | 48,65               |
| 200                | 296,302                    | 0,03687                | 42,43                | 17,45              | 59,98               |

При решении задачи в цилиндрической системе координат погрешности определения ТФХ материала существенно возрастают с увеличением коэффициента  $k$  (табл. 2). Так при использовании лазерного луча радиусом 3,5 мм погрешность определения удельной теплоемкости составляет около 42 %, а погрешности определения коэффициентов температуропроводности и теплопроводности соответственно около 17 и 60 % при  $k=200 \text{ м}^{-1}$ .

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что неучет изменения интенсивности излучения лазерного импульса по поперечной координате может привести к возникающим погрешностям в определении  $\alpha$ ,  $\epsilon$ , и  $\lambda$ . Эти погрешности нельзя не учитывать при разработке конкретных технологий диагностики теплофизических характеристик.

## Заключение

На основании результатов численного моделирования температурных полей в образце металла в ситуациях, соответствующих условиям определения теплофизических характеристик материала импульсным методом лазерного воздействия, установлено, что погрешности вычисления удельной теплоемкости, температуропроводности и теплопроводности материала, увеличиваются при пространственной неоднородности энергетических характеристик лазерного луча и могут достигать 60 % при величине коэффициента сосредоточенности потока  $200 \text{ м}^{-1}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P., et al. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity // J. of Appl. Physics. — 1961. — V. 32. — № 9. — P. 1675–1684.
2. Baba T., Ono A. Improvement of the laser flash method to reduce uncertainty in thermal diffusivity measurements // Meas. Sci. Technol. — 2001. — № 12. — P. 2046–2057.
3. Akoshima M., Baba T. Study on a thermal-diffusivity standard for laser flash method measurements // Int. J. Thermophys. — 2006. — V. 27. — № 4. — P. 1189–1203.
4. Watt D.A. Theory of thermal diffusivity by pulse technique // Brit. J. Appl. Phys. — 1966. — V. 17. — P. 231–240.
5. Schriempf J.T. A Laser Flash Technique for Determining Thermal Diffusivity of Liquid Metals at Elevated Temperatures // Rev. of Scientific Instruments. — 1972. — V. 32. — № 5. — P. 781–786.

6. McKay J., Schriempf J.T. Corrections for nonuniform surface-heating errors in flash-method thermal-diffusivity measurements // J. Appl. Phys. — 1976. — V. 47. — № 4. — P. 1668–1671.
7. Beedham R., Dalmple I.P. The measurement of thermal diffusivity by flash method. An investigation into errors arising from boundary conditions // Revue Int. Hautes Temp. Refract. — 1970. — V. 7. — P. 278–283.
8. Технологические лазеры. Справочник в 2-х т. / под ред. Г.А. Абилюсинова. — М.: Машиностроение, 1991. — Т. 1. — 431 с.
9. Кузнецов Г.В., Кац М.Д. Теоретический анализ методических погрешностей определения теплофизических характеристик конструкционных материалов импульсным методом в образце конечных размеров // Измерительная техника. — 2009. — № 4. — С. 34–36.
10. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник. — М.: Машиностроение, 1985. — 276 с.
11. Самарский А.А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1983. — 616 с.
12. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. — М.: Атомиздат, 1968. — 484 с.

Поступила 31.05.2010 г.

УДК 536.24

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПЕРЕПАДА НА РЕЖИМЫ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ В ЗАМКНУТОМ ДВУХФАЗНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ТЕРМОСИФОНЕ

Г.В. Кузнецов, М.А. Аль-Ани, М.А. Шеремет

Томский политехнический университет  
E-mail: maathe\_a@yahoo.com

*Проведено математическое моделирование тепловых режимов замкнутого двухфазного термосифона при изменении перепада температур на внешних границах устройства. Краевая задача математической физики сформулирована на основе законов сохранения массы, импульса и энергии в безразмерных переменных «функция тока – вектор завихренности скорости – температура» в цилиндрических координатах. Получены распределения линий тока, поля скорости и температуры, отражающие масштабы влияния числа Рэлея на термогидродинамические режимы.*

### **Ключевые слова:**

*Замкнутый двухфазный термосифон, естественная конвекция, сопряженный теплоперенос, цилиндрические координаты, испарение, конденсация.*

### **Key words:**

*Two-phase closed thermosiphon, natural convection, conjugate heat transfer, cylindrical coordinates, evaporation, condensation.*

### **Введение**

Замкнутые двухфазные термосифоны представляют собой автономные теплопередающие устройства с фазовым превращением промежуточного теплоносителя и использованием гравитационных сил, инициирующих его движение. Последнее определяет относительно простоту этих устройств и широкий спектр их применения. Разнообразны также практические задачи, решаемые на основе замкнутых двухфазных термосифонов в различных технологических системах.

В работах предшественников [1] экспериментально исследовались тепловые режимы типичного термосифона с различными рабочими жидкостями: вода, диэлектрические жидкости — FC-84, FC-77 и FC-3283. Использовался медный термосифон высотой 200 мм, диаметр парового канала — 6 мм, длина испарителя — 40 мм, длина холодильника — 60 мм. Такой теплообменник можно считать достаточно малым по сравнению с другими, рассматриваемыми ранее в литературе. Полученные результаты [1] хорошо согласуются с теоретическими данными. Установлено, что водный термосифон превосходит термосифоны с диэлектри-

ческими жидкостями как по эффективности теплового сопротивления, так и по интенсивности теплопереноса. Все рассмотренные жидкости отражают преимущества диэлектрических сред, что является оптимальным при охлаждении элементов электронной техники, работающих в диапазоне рассеиваемой мощности 30...50 Вт.

Результаты экспериментального исследования кипения газового водонагревателя в замкнутом двухфазном термосифоне представлены в [2]. Установлены масштабы влияния определяющих параметров процесса, таких, как коэффициент наполнения, геометрический параметр и массовый поток хладагента, на продолжительность и интенсивность кипения при нормальных условиях. Исследовались термосифоны высотой 1000 мм с диаметром паровых каналов 15 и 25 мм. В качестве рабочей жидкости рассматривался метанол. Установлено, что уменьшение продолжительности кипения обусловлено увеличением тепловой нагрузки и геометрического параметра, а также уменьшением коэффициента наполнения.

Моделирование газожидкостного двухфазного течения при наличии испарения и конденсации