

9. ГОСТ 8.558—93. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры.

10. Gouffe A. Estimation of perfection of black body model // Rev. opt. 1945. V. 24. P. 1—9.

11. Пелецкий В. Э., Тимрот Д. Л., Воскресенский В. Ю. Высокотемпературные исследования тепло- и электропроводности твердых тел. М.: Энергия, 1971.

12. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.

13. Графит как высокотемпературный материал / Под ред. К. П. Власова. М.: Мир, 1964.

14. Латыев Л. Н., Чеховской В. Я., Шестаков Е. Н. Экспериментальное определение излучательной способности вольфрама в видимой области спектра в диапазоне температур 1200—2600 К // Теплофизика высоких температур. 1969. Т. 7. № 4. С. 666—674.

15. Хрусталева Б. А., Раков А. М. // Теплообмен, гидродинамика и теплофизические свойства веществ. М.: Наука, 1968. С. 280.

16. Свойства конструкционных материалов на основе углерода: Справочник / Под ред. В. П. Соседова. М.: Металлургия, 1975.

17. Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials / Ed. Y. S. Touloukian. N. Y.: Macmillan Company, London: Collier-Macmillan Ltd., 1967.

18. Bapat S. C., Nickel H. Thermal Conductivity and Electrical Resistivity of POCO Grade AXF-Q1 Graphite to 3300K // Carbon. 1973. V. 11. P. 323—327.

19. Rasor N. S., McClelland J. D. Thermal Property Measurements at Very High Temperatures // Rev. Sci. Instrum. 1960. V. 31. N 6. P. 595—603.

20. Лутков А. И. // Материалы V конф. по теплофизическим свойствам веществ. Киев: Наука, 1976.

21. Powell R. W., Schofield F. H. The Thermal and Electrical Conductivities of Carbon and Graphite to High Temperatures // Proc. Phys. Soc. 1939. V. 51. P. 153—172.

22. Strauss H. E. Studies of Thermal Conductivity of Polycrystalline Graphite at High Temperature // Proc. 4th Conf. Carbon. 1960. P. 473—480.

Дата принятия 15.04.2010 г.

518.6:536.6

Программная реализация методов диагностирования теплофизических свойств материалов

А. И. ФЕСЕНКО*, И. Н. ИЩУК**

* Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия, e-mail: fesenkoai@rambler.ru

** Военный авиационный инженерный университет, Воронеж, Россия, e-mail: boerby@rambler.ru

Представлено решение прямой задачи теплопроводности при действии в плоскости контакта двух полуграниченных тел линейного импульсного источника тепла, полученное методом конечных разностей. Приведены результаты программной реализации и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: теплофизические свойства, разностные схемы, математическое моделирование.

The task solution by finite differences method of thermoconductivity at acting of two semibound bodies of linear pulsed heat source in contact plane is presented. The results of program realization and experimental studies are given.

Key words: thermophysical properties, difference schemes, mathematical modelling.

Переход к новой экономической системе в России предъявляет повышенные требования к технической диагностике сложных инженерных систем, контролю качества выпускаемой продукции, в связи с чем у производителей возрос интерес к недорогим, безопасным и простым в эксплуатации методам неразрушающего контроля.

Следует принять во внимание трагический итог эксплуатации системы «Space Shuttle»: из шести построенных космических аппаратов два потерпели техногенную катастрофу — «Челленджер» при запуске 28 января 1986 г. после десяти полетов и «Колумбия» при спуске с орбиты, что свидетельствует, в первую очередь, о низком уровне диагностики дефектов в межполетных периодах. Как показывает пред-

варительный анализ, одной из основных причин катастрофы космического аппарата «Колумбия» является нарушение теплоизоляционных характеристик наружной тепловой защиты при вхождении аппарата в атмосферу [1].

Развитие прикладной теплофизики и появление на рынке относительно недорогих средств измерений температуры дало новый толчок к применению теплового неразрушающего экспресс-контроля качества материалов, изделий и конструкций из них. К основным преимуществам теплового контроля можно отнести простоту аппаратной реализации, возможность контактного и бесконтактного измерений температуры, высокую производительность контроля с обработ-

кой результатов измерений в реальном режиме времени, большой перечень контролируемых объектов.

Рассмотрим физическую модель для исследования теплофизических свойств (ТФС) теплоизоляционных материалов импульсными контактными методами теплового неразрушающего контроля [2]. Два полуграниченных материала с различными ТФС (теплопроводность λ_1 , температуропроводность a_1 — одного; λ_2 , a_2 — другого) приведены в контакт, который создает термическое сопротивление. В плоскости контакта параллельно размещены линейный импульсный источник тепла и датчик температуры.

На основе физической модели построим методом конечных разностей (МКР) разностные схемы двумерной нелинейной задачи теплопроводности с разрывными коэффициентами с учетом влияния на теплоперенос контактного термического сопротивления (КТС) и конечной длительности теплового импульса. Данная краевая задача теплопроводности для изотропной среды описывается нелинейными дифференциальными уравнениями с частными производными

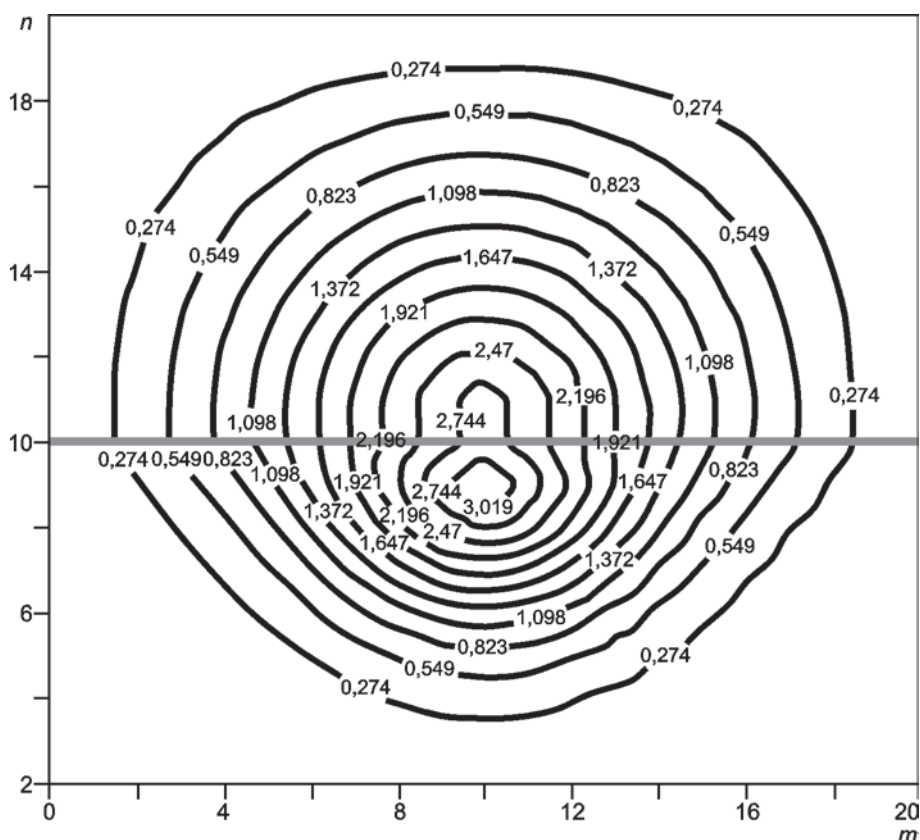


Рис. 1. Изотермы в момент времени $\tau = 4,5$ с

$$\frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left(a_i(T) \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a_i(T) \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial z} \right), \quad i = 1, 2;$$

граничные условия: $T(r, z, 0) = 0$, $T(r, 0^+, \tau) = T(r, 0^-, \tau)$, $T(r, \pm\infty, \tau) \rightarrow 0$;

$$\lambda_1(T) \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=0^+} - \lambda_2(T) \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=0^-} = q \delta(z) \delta(r) \delta(\tau),$$

где T — температура; r, z — координаты в плоскости контакта двух материалов и перпендикулярной контактной плоскости; τ — время; q — количество теплоты.

Решение данной задачи представлено в [3] и реализовано в виде специальной функции Boer2D(·) для математической среды моделирования MathCad.

Функция Boer2D(·) предназначена для моделирования распределения температурного поля в плоскости контакта двух материалов при действии линейного импульсного источника тепла с учетом КТС, конечной длительности теплового импульса, линейной зависимости ТФС материалов от температуры, релаксации теплового потока. Функция реализована в виде динамически связанной библиотеки (Dinamic Link Library — DLL) для использования в компьютерном математическом пакете MathCAD [4].

Функция Boer2D(·) реализует математическую модель, аппроксимирующую нестационарную задачу теплопроводности в двумерном пространстве на основе метода сеток, в частности, МКР. Входные данные функции в среде MathCAD записываются в виде

$$\text{Boer2D} \left(\begin{pmatrix} a_1 & \lambda_1 \\ a_2 & \lambda_2 \\ K_a & K_\lambda \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} N & T_u \\ K & q \\ n & \alpha \\ d & \mu \\ t & \beta \end{pmatrix} \right),$$

где $a_{1,2}$ — температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$, при 20°C ; $\lambda_{1,2}$ — теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, при 20°C ; K_a, K_λ — линейные коэффициенты зависимости ТФС от температуры; $a(T) = a_{1,2}(1 + K_a T)$; $\lambda(T) = \lambda_{1,2}(1 + K_\lambda T)$; рекомендуемые значения: $K_a = -0,0004$ (падение $a_{1,2}$ на 4 % на каждые 100°C), $K_\lambda = 0,001$ (рост $a_{1,2}$ на 10 % на каждые 100°C); N — число отсчетов по расстоянию, максимальное значение 100; K — число отсчетов по времени, максимальное значение 10000; h — шаг сетки по расстоянию, м; d — резервная переменная; t — шаг сетки по времени, с; T_u — длительность теплового импульса, с; q — тепловой поток за время t через площадь $h \times h$, $\text{Вт}/\text{м}^2$; α — контактная термическая проводимость, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; μ — сдвиг сетки для определения координаты точки контроля температуры; β — постоянная модели, учитывающая релаксацию теплового потока, $\beta > 0$.

Для получения физически оправданных результатов при численном решении задачи нестационарной теплопроводности следует соблюдать условие сходимости вычислений

$$t_{a_{1,2}} \leq h^3/2.$$

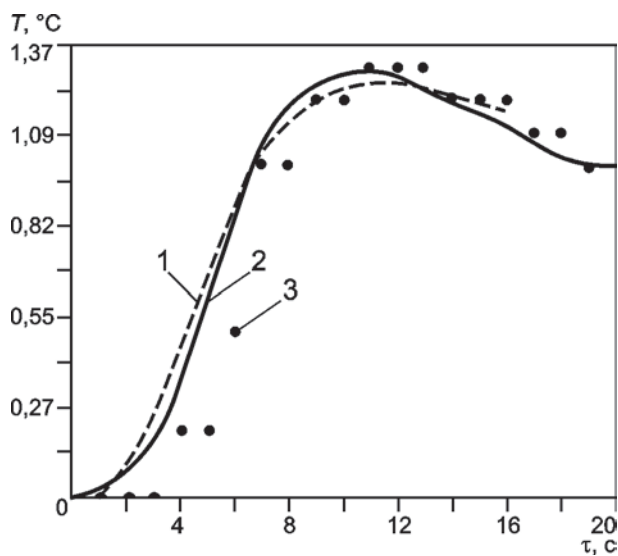


Рис. 2. Графики экспериментальных измерений (1) и обработанных данных по методике [3] (2) и при помощи функций Boer2D(.) и Gradient(.) (3)

Представим выходные данные функции.

При $\mu \geq 0$ функция Boer2D(.) генерирует двумерный массив значений температуры в точке $\{M + \mu, N\}$ от времени:

$$Boer2D(\mu \geq 0) = \begin{pmatrix} 0 & T(0) \\ t & T(t) \\ 2t & T(2t) \\ \dots & \dots \\ Kt & T(Kt) \end{pmatrix}.$$

При $\mu < 0$ функция Boer2D(.) генерирует двумерный массив значений температуры в пространстве в момент времени Kt :

$$Boer2D(\mu < 0) = \begin{pmatrix} T(0, 0) & T(1, 0) & \dots & T(2M, 0) \\ T(0, 1) & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ T(0, 2N) & \dots & \dots & T(2M, 2N) \end{pmatrix}.$$

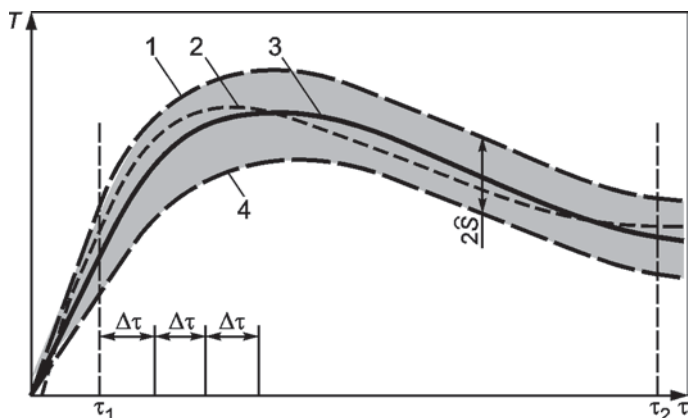


Рис. 3. Оценка погрешности испытаний:

1, 4 — верхний и нижний пределы; 2, 3 — расчетная и реальная зависимости

Массив $T(0, N) \dots T(2M, N)$ определяет значения температуры в плоскости контакта.

Пример использования функции Boer2D(.) при $\mu < 0$ представлен на рис. 1.

Разработанная функция Boer2D(.) позволяет решить прямую задачу теплопроводности в двумерном пространстве. Для решения обратной коэффициентной задачи теплопроводности разработаны функции Gradient(.) и Ident(.) [5].

Функция Gradient (.) предназначена для расчета среднего квадратического отклонения (СКО) температурной кривой математической модели, получаемой с помощью функции Boer2D(.), от температурной кривой реального испытания.

На основе алгоритма Boer2D(.) функция Gradient(.) реализует математическую модель, аппроксимирующую нестационарную задачу теплопроводности в двумерном пространстве на основе МКР, и в ходе последовательного приближения к данным натурного испытания идентифицирует ТФС (тепло- и температуропроводность) контролируемого образца.

Оценкой служит СКО, рассчитываемое на интервале наблюдения избыточной температуры $[\tau_1, \tau_2]$:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (T(i\Delta\tau) - \hat{T}(i\Delta\tau))^2}, \quad (1)$$

где $N = (\tau_2 - \tau_1) / \Delta\tau$ — шаг счета СКО по времени, с; $T(i\Delta\tau)$, $\hat{T}(i\Delta\tau)$ — значения избыточной температуры реального испытания и рассчитанное по математической модели для момента времени $\tau = i\Delta\tau$, °С.

Полученное значение СКО используется совместно с функцией Minimize(.) для идентификации ТФС испытываемого материала на основе вариационных методов анализа: градиента Конжунгеита или квазиньютонового.

Входные данные функции в среде MathCAD записываются в виде

$$Gradient \left(\begin{pmatrix} a_1 & \lambda_1 \\ a_2 & \lambda_2 \\ K_a & K_\lambda \\ Sdv & Sh \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} N & T_n \\ K & q \\ h & \alpha \\ d & \mu \\ t & \beta \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & T(0) \\ t & T(t) \\ 2t & T(2t) \\ \dots & \dots \\ Kt & T(Kt) \end{pmatrix} \right),$$

где Sdv — количество отсчетов значений температуры, входящих в интервал $[0, \tau_1]$; Sh — количество отсчетов значений температуры, укладываемых в шаг $\Delta\tau$ счета СКО; третья матрица содержит данные реального испытания, в которой первый столбец является массивом времени измерения температуры с шагом t , второй — массивом соответствующих значений избыточных температур.

В качестве выходных данных функция Gradient(.) обеспечивает генерацию СКО, рассчитанного для матрицы данных испытания в виде Gradient(.) = S.

Пример результата использования функции Gradient(.) для идентификации ТФС каучука ВК-9 с помощью переносной диагностирующей системы теплоизоляционных материалов представлен на рис. 2, где 1 — график эксперимен-

тальных измерений температуры переносной диагностирующей системой, 2 — график обработанных данных по методике [3] и 3 — изменения избыточной температуры, полученные при помощи функции Boer2D(·) на основе поиска минимального СКО, рассчитанного с использованием функции Gradient(·).

Функция Ident(·) предназначена для идентификации ТФС исследуемых теплоизоляционных материалов по результатам проведенного испытания образца продукции с оцениванием погрешности испытания. Алгоритм идентификации заключается в последовательном приближении температурных кривых математической модели, получаемой с помощью функции Boer2D(·), к температурным кривым реального испытания.

На основе алгоритма Boer2D(·) функция Ident(·) реализует математическую модель, аппроксимирующую нестационарную задачу теплопроводности в двумерном пространстве на основе МКР, и в ходе последовательного приближения к данным натурного испытания идентифицирует ТФС (тепло- и температуропроводность) контролируемого образца.

На рис. 3 изображены графики избыточных значений температур, изменяющихся во времени: 1, 4 — верхний и нижний пределы изменения температуры, построенные при помощи математической модели для значений оценки погрешности испытания $\pm S$; 2 — изменение температуры, построенное при помощи математической модели с минимальным значением оценки погрешности испытания; 3 — изменение температуры реального испытания.

В качестве оценки используется СКО, рассчитываемое на интервале наблюдения избыточной температуры $[\tau_1, \tau_2]$ согласно выражению (1). В результате идентификации значений ТФС графику верхнего предела изменения температуры на основании математической модели ставятся в соответствие значения $\{\hat{a}_B, \hat{\lambda}_B\}$, нижнему пределу — $\{\hat{a}_H, \hat{\lambda}_H\}$ при

выполнении условия $S \leq \hat{S}$, где $\hat{S}$ — заданный минимальный порог оценки погрешности испытания. Графику избыточной температуры, рассчитанной на основании математической модели, для которого СКО является минимально возможным значением, ставятся в соответствие значения ТФС $\{\hat{a}, \hat{\lambda}\}$ и определяется $S_{\min}$.

Входные данные функции в среде MathCAD записываются в виде

$$Ident \left(\begin{pmatrix} a_1 & \lambda_1 \\ a_2 & \lambda_2 \\ K_a & K_\lambda \\ a_3 & \lambda_3 \\ D_1 & D_2 \\ S_{dv} & S_h \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} N & T_u \\ K & q \\ h & \alpha \\ \hat{S} & \mu \\ t & \beta \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & T(0) \\ t & T(t) \\ 2t & T(2t) \\ \dots & \dots \\ Kt & T(Kt) \end{pmatrix} \right),$$

где D_1, D_2 — количество шагов счета в диапазоне идентификации соответственно температуропроводности и теплопроводности; третья матрица содержит данные реального испытания, в которой первый столбец является массивом времени измерения температуры с шагом t , второй — массивом соответствующих значений избыточных температур.

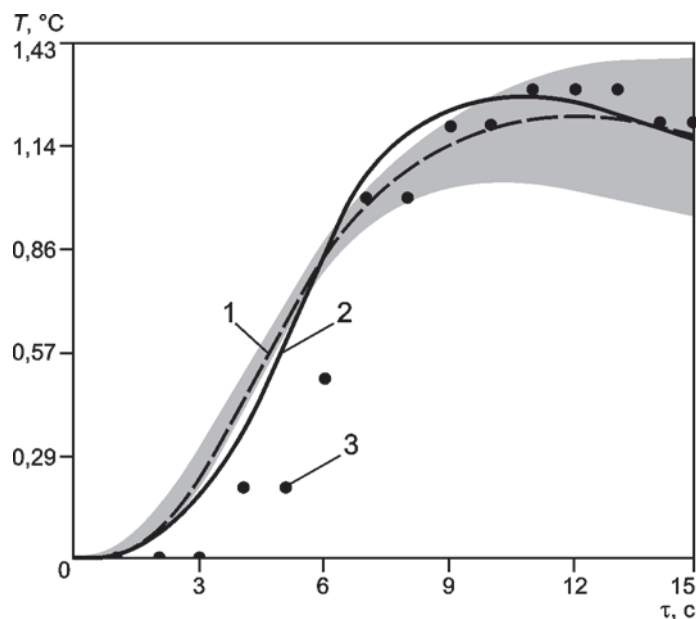


Рис. 4. Графики экспериментальных измерений (1) и обработанных данных по методике [3] (2) и при помощи функций Boer2D(·) и Ident(·) (3). Серым цветом отмечен интервал неопределенности

В качестве выходных данных функция Ident(·) обеспечивает генерацию двумерного массива идентифицированных ТФС испытываемого материала в виде

$$Ident(\cdot) = \begin{pmatrix} \hat{a}_B & \hat{\lambda}_B \\ \hat{a}_H & \hat{\lambda}_H \\ \hat{a} & \hat{\lambda} \\ \hat{S}_{\min} & c \end{pmatrix},$$

где $\{\hat{a}_B, \hat{\lambda}_B\}$, $\{\hat{a}_H, \hat{\lambda}_H\}$ — верхний и нижний пределы ТФС, для

которых выполняется условие $(S \leq \hat{S} \vee \hat{T} < T)$; $\{\hat{a}, \hat{\lambda}\}$ — ТФС испытываемого материала, идентифицированные с минимально возможным значением СКО математической модели $S_{\min}$ от данных реального испытания; c — незадействованная переменная.

Пример результата использования функции Ident(·) для идентификации ТФС каучука ВК-9 с помощью переносной диагностирующей системы теплоизоляционных материалов представлен на рис. 4, где 1 — график экспериментального измерения температуры переносной диагностирующей системой; 2 — график обработанных данных по методике [3], 3 — изменения избыточной температуры, полученные при помощи функции Boer2D(·) на основе поиска минимального СКО, рассчитанного с использованием функции Ident(·) и равного 9,7 %; серым цветом отмечен интервал неопределенности.

Разработанная функция Ident(·) позволяет решать обратную коэффициентную задачу теплопроводности с расчетом интервалов неопределенности идентификации ТФС.

Таким образом, на основании дискретной математической модели задачи теплопроводности разработана программная реализация алгоритма расчета изменения избыточной температуры в плоскости контакта двух материалов при действии линейного импульсного источника тепла с учетом длительности теплового импульса, релаксации теплоты, контактного термического сопротивления и зависимости теплофизических свойств от температуры. Решена обратная коэффициентная задача теплопроводности, алгоритм которой реализован программно на основе вариационных методов решения экстремальных задач, с возможностью оценки интервалов неопределенности идентификации теплофизических свойств материалов.

Л и т е р а т у р а

1. Казаров Ю. К. и др. Принципы многоразового использования космических аппаратов: концептуальные аспекты при авиационных происшествиях // Проблемы безопасности полетов. 2005. Вып. 3. С. 9—26.

2. Карташов Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высшая школа, 2001.

3. Ищук И. Н., Фесенко А. И. Тепловой неразрушающий контроль теплофизических свойств материалов на основе многофакторных функций преобразования // Измерительная техника. 2005. № 7. С. 44—49; Ishchuk I. N., Fesenko A. I. Thermal Nondestructive Testing of the Thermal Properties of Materials Using Multifactor Transformation Functions // Measurement Techniques. 2005. V. 48. N 7. P. 693—701.

4. Свид. 2008610687 РФ об офиц. регистрации программы для ЭВМ. Численная модель двумерной (трехмерной) нелинейной задачи теплопроводности с разрывными коэффициентами (Boer2D / Boer3D) / И. Н. Ищук, Ю. Ю. Громов // Программа для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных схем. 2008. № 2(63). Ч. 1. С. 165.

5. Свид. 2008611320 РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ. Численный алгоритм решения обратной коэффициентной задачи теплопроводности с разрывными коэффициентами (Ident) / И. Н. Ищук, Ю. Ю. Громов // Программа для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных схем. 2008. № 2(63). Ч. 2. С. 317, 318.

Дата принятия 20.07.2010 г.

519.233.5:532.57

Оценка достоверности результатов измерений в системах теплоснабжения с использованием уравнений баланса расходов теплоносителя

В. П. ЧИПУЛИС

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

Рассмотрены вопросы оценки достоверности результатов измерений в системах теплоснабжения. Проанализированы уравнения баланса расходов теплоносителя, отражающие закон сохранения масс, для различных типов систем. Приведены аналитические выражения, использование которых позволяет сделать заключение о допустимости результатов измерений при решении задач учета тепловой энергии.

Ключевые слова: достоверность результатов измерений, система теплоснабжения.

The problem of validity estimation of measurement results in heat supply systems is considered. The equations of balance of heating medium consumption for various types of systems are analyzed. Analytical dependences for the conclusion about admissibility of the measurement results in solving the tasks of thermal energy account are resulted.

Key words: validity of measurement results, heat supply system.

В настоящее время общепризнана и законодательно подкреплена необходимость установки приборов учета как у поставщиков, так и у потребителей тепловой энергии. Одним из основных требований, предъявляемых к системам технологического и коммерческого учета, является обеспечение достоверности результатов измерений. Использование недостоверных результатов в технологическом процессе может привести к нежелательным, а порой и необратимым последствиям. В случае коммерческого учета теплоты и теплоносителя недостоверные результаты ведут к нарушению справедливого экономического баланса во взаимоотношениях поставщика (продавца) и потребителя (покупателя). Очевидно, что недостоверные результаты не могут быть

приняты в качестве основы для оплаты потребляемых ресурсов.

Интуитивно понятно, что достоверность результатов измерений связана с их точностью, которая, в свою очередь, определяется погрешностью измерений [1]. Однако в среде специалистов по коммерческому учету теплоты нет достаточно четкой однозначной формальной трактовки понятия достоверности измерений, как нет и однозначного понимания того, в каких случаях и каким образом можно оценить достоверность конкретных результатов измерений без применения трудоемкой процедуры поверки измерительного оборудования. Ниже сделана попытка уточнить указанные понятия и, в конечном счете, предложить формальные спосо-