

УДК 536.629.7

ДЕКУША Л.В., ВОРОБЬЕВ Л.И.,
ГРИЩЕНКО Т.Г., ДЕКУША О.Л., ПАРХОМЕНКО Г.А.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА

Розглянуто особливості проектування перетворювачів теплового потоку для дослідження нестационарних процесів теплообміну та різні конструкції перетворювачів теплового потоку. Наведено рекомендації щодо конструювання та виготовлення перетворювачів з коректуючою термобатареею.

Рассмотрены особенности проектирования преобразователей теплового потока для исследования нестационарного теплообмена и различные конструкции преобразователей теплового потока. Даны рекомендации по разработке и конструированию преобразователей с корректирующей термобатареей.

We consider the specific features of designing of heat flow meters for studying transient heat exchange. Different constructions of heat flow meters are considered. Recommendations are given on the development and constructing of sensors with a correcting thermopile.

b – скорость изменения температуры;
 h – высота ПТП;
 m – соотношение чувствительностей основной и корректирующей термобатарей;
 n – количество сечений пластины ПТП, между которыми измеряется разность температуры;
 q – плотность теплового потока;
 x – координата;
 Fo – число Фурье;
 N – уровень сигнала относительно стационарного значения;

T – температура;
 ξ – остаточный член;
 η – безразмерная координата;
 λ – коэффициент теплопроводности
 θ – относительная температура;
 τ – время;
 χ – безразмерное расстояние;
КБ – корректирующая термобатарея;
ПТП – преобразователь теплового потока.

Наибольшее распространение для измерения плотности теплового потока получили первичные преобразователи вида вспомогательной стенки (ПТП) [1–3]. Однако если для измерения стационарных тепловых потоков с помощью ПТП конечной высоты достаточно осуществить измерение разности температуры на торцевых поверхностях термобатарей, то есть выполнить численное дифференцирование между двумя его сечениями, то в случае измерения нестационарных тепловых потоков количество сечений, между которыми выполняется дифференцирование, должно быть увеличено. При этом формулы для определения плотности теплового потока через тепловоспринимающую поверхность ПТП ($x = 0$), по-

лученные методами вычислительной математики [4] при использовании равномерно распределенных по высоте сечений, имеют вид соответственно:

– для количества сечений $n = 3$:

$$q(x = 0, \tau) = -\lambda \left(\frac{1}{h} (3T(0, \tau) - 4T(0,5, \tau) + T(1, \tau)) + \xi \right)$$

или

$$q(x = 0, \tau) = -\lambda \left(\frac{1}{h} (3(T(0, \tau) - T(0,5, \tau)) - (T(0,5, \tau) - T(1, \tau)) + \xi) \right); \quad (1)$$

– для количества сечений $n = 4$:

$$q(x=0, \tau) = -\lambda \left(\frac{1}{3h} (11T(0, \tau) - 18T(1/3, \tau) + \right.$$

$$\left. + 9T(2/3, \tau) - 2T(1, \tau) \right) + \xi \quad \text{или}$$

$$q(x=0, \tau) = -\lambda \left(\frac{1}{3h} (11(T(0, \tau) - T(1/3, \tau)) - \right.$$

$$\left. - 7(T(1/3, \tau) - T(2/3, \tau) + 2(T(2/3, \tau) - T(1, \tau))) \right) + \xi); (2)$$

– для количества сечений $n = 5$:

$$q(x=0, \tau) = -\lambda \left(\frac{1}{6h} (25T(0, \tau) - 48T(0,25, \tau) + \right.$$

$$\left. + 36T(0,5, \tau) - 16T(0,75, \tau) + 3T(1, \tau) \right) + \xi)$$

или

$$q(x=0, \tau) = -\lambda \left(\frac{1}{6h} (25(T(0, \tau) - T(0,25, \tau)) - \right.$$

$$\left. - 23(T(0,25, \tau) - T(0,5, \tau)) + 13(T(0,5, \tau) - T(0,75, \tau)) - \right.$$

$$\left. - 3(T(0,75, \tau) - T(1, \tau)) \right) + \xi). \quad (3)$$

Рассмотрим ПТП, размещенный одной стороной на термостатированной поверхности, а на другой его стороне в момент времени $\tau = 0$ тепловой поток ступенчато изменяется от 0 до стационарного значения q_0 . Для анализа нестационарного температурного поля в ПТП решена задача для бесконечной пластины, имитирующей ПТП толщиной h , при начальном условии:

$$T(x, \tau = 0) = T_0 = \text{const}$$

и граничных условиях:

$$T(x = h, \tau) = T_0,$$

$$-\lambda \frac{\partial T(x=0, \tau)}{\partial x} = q_0 = \text{const}.$$

Из решения задачи в такой постановке получена функция температуры следующего вида [5]:

$$T(\eta, \tau) = T_0 + q_0 h / \lambda \theta(\eta, \tau), \quad (4)$$

где $\eta = x/h$ – безразмерная координата,

$$\theta(\eta, \tau) = 1 - \eta - \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \sin(\mu_k (1 - \eta)) \exp(-\mu_k^2 Fo),$$

$$\text{где } \mu_k = (2k - 1)\pi/2,$$

$$A_k = (-1)^{k+1} 2 / \mu_k^2.$$

Из (4) получено выражение для разности температуры двух различных сечений (i и j) по высоте пластины вида:

$$T(\eta_i, \tau) - T(\eta_j, \tau) = h / \lambda q_0 (\theta(\eta_i, \tau) - \theta(\eta_j, \tau)). \quad (5)$$

С учетом выражения (5) и расчетных формул (1)–(3) получены необходимые для численного дифференцирования при вариации количества сечений ($n = \text{var}$) следующие расчетные зависимости:

– для $n = 3$:

$$\frac{q(0, \tau)}{q_0} = 3((\theta(0, \tau) - \theta(0,5, \tau)) - \frac{1}{3}(\theta(0,5, \tau) - \theta(1, \tau))) + \xi; \quad (6)$$

– для $n = 4$:

$$\frac{q(0, \tau)}{q_0} = \frac{11}{3}((\theta(0, \tau) - \theta(1/3, \tau)) - \frac{7}{11}(\theta(1/3, \tau) - \theta(2/3, \tau))) + \frac{2}{11}(\theta(2/3, \tau) - \theta(1, \tau)) + \xi; \quad (7)$$

– для $n = 5$:

$$\frac{q(0, \tau)}{q_0} = \frac{25}{6}((\theta(0, \tau) - \theta(1/4, \tau)) - \frac{23}{25}(\theta(1/4, \tau) - \theta(1/2, \tau))) + \frac{13}{25}(\theta(1/2, \tau) - \theta(3/4, \tau)) - \frac{3}{25}(\theta(3/4, \tau) - \theta(1, \tau)) + \xi. \quad (8)$$

Рассмотрим преобразователь, в котором происходит измерение разностей температуры между различными его сечениями и сложение сигналов в пропорции, задаваемой коэффициентами в формулах (6)–(8). Значения относительного выходного сигнала такого преобразователя $\frac{q_{\text{п}}(\tau)}{q_0}$

отличаются от значений $\frac{q(0, \tau)}{q_0}$, полученных по

формулам (6)–(8) на величину остаточного члена. Результаты математического моделирования с использованием расчетных формул (6)–(8) и при пренебрежении остаточным членом ξ графически представлены на рис.1 (кривые 2, 3, 4).

Для сравнения там же представлены результаты расчета для традиционного ПТП вида вспомогательной стенки (кривая 1), то есть для случая дифференцирования между двумя сечениями. Счет выполнен по формуле

$$\frac{q_{\Pi}(\tau)}{q_0} = \theta(0, \tau) - \theta(1, \tau). \quad (9)$$

Из полученных графиков изменения во времени плотности измеренного теплового потока $q_{\Pi}(\tau)$ относительно плотности теплового потока q_0 , поступающего на тепловоспринимающую поверхность ПТП, следует, что при увеличении количества сечений по высоте, между которыми выполняется численное дифференцирование, существенно уменьшается время реакции ПТП на внешнее тепловое воздействие.

Реализация такого способа уменьшения инерционности ПТП требует увеличения в составе ПТП количества измерителей разности температуры между соответствующими сечениями. Наиболее очевидным техническим решением по увеличению количества сечений, между которыми измеряется разность температуры, является изготовление ПТП из нескольких обычных ПТП, набранных в столбик, то есть расположенных относительно теплового потока последовательно и соединенных дифференциально по электрическому сигналу [1].

Однако изготовление многослойного ПТП путем введения дополнительных ПТП не приводит к ожидаемому уменьшению его постоянной времени из-за увеличения общей толщины многослойного ПТП и уменьшения его эффективных теплопроводности и температуропроводности. Последнее происходит из-за появления дополнительных контактных сопротивлений при склейке набираемых в пакет ПТП.

Более совершенным способом коррекции инерционности ПТП является изготовление ПТП с одной или несколькими корректирующими

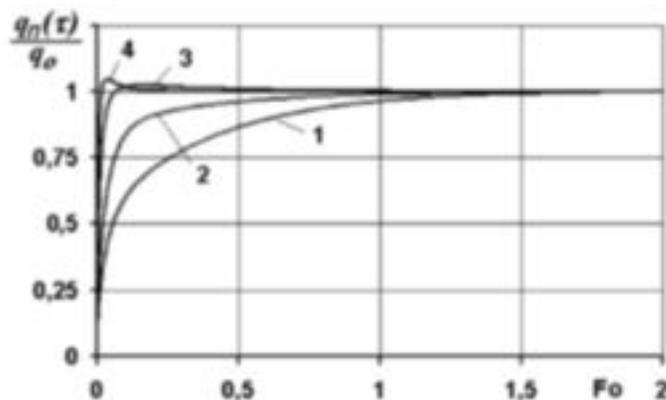


Рис. 1. Зависимости относительной плотности теплового потока $\frac{q_{\Pi}(\tau)}{q_0}$ от безразмерного времени (Fo) при вариации количества сечений n ПТП, между которыми выполняется численное дифференцирование. 1 – $n = 2$ (обычный ПТП вида вспомогательной стенки); 2 – $n = 3$; 3 – $n = 4$; 4 – $n = 5$.

ми батареями термоэлементов. Принцип построения таких ПТП состоит во введении в конструкцию ПТП дополнительных батарей термоэлементов, включаемых дифференциально, которые формируют сигнал, пропорциональный скорости изменения температуры определенного слоя вспомогательной стенки. Как показали исследования, ПТП может быть выполнен двухслойным, при этом количество сечений $n = 3$, а уменьшение его инерционности не хуже, чем при наличии четырех или пяти сечений.

Как следует из выражений (6)–(8), для увеличения быстродействия ПТП необходимо суммировать в определенной пропорции сигналы, соответствующие разностям температуры в слоях пластины. В общем случае соотношение сигналов может быть различным. По аналогии с выражениями (6)–(8) уравнение, соответствующее измеряемому сигналу $q_{\Pi}(\tau)$, который формируется с помощью термобатарей, спаи которых расположены в сечениях 0, 1, η и $(1-\eta)$, имеет вид:

$$\frac{q_{\Pi}(\tau)}{q_0} = \frac{\lambda}{h\eta} \left\{ \left[\theta(0, \tau) - \theta(\eta, \tau) \right] + m \left[\theta(0, \tau) - \theta(\eta, \tau) - (\theta(1-\eta, \tau) - \theta(1, \tau)) \right] \right\}. \quad (10)$$

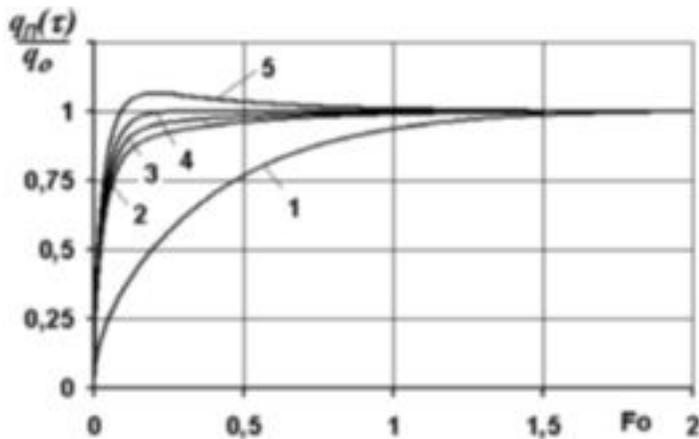


Рис. 2. Зависимости относительной плотности

теплового потока $\frac{q_{\pi}(\tau)}{q_0}$ при $\eta = 0,5$ от безразмерного

времени (Fo) при вариации параметра m :

1 – для ПТП без корректирующей термобатареи, то есть $n = 2$, при $m = 0$;

2 – для двухслойного ПТП с корректирующей термобатареей, то есть $n = 3$, $m = 0,5$;

3 – $m = 0,56$; 4 – $m = 0,62$; 5 – $m = 0,705$.

На рис. 2 представлены результаты математического моделирования с использованием уравнения (10), для случая $\eta = 0,5$, при вариации значений параметра m ($m = 0,5; 0,56; 0,62; 0,705$).

Из анализа представленных на рис.2 графиков следует, что при наличии только трех сечений (для случая $\eta = 0,5$), между которыми измеряется разность температуры, путем подбора числа m , можно получить результат по снижению инерционности ПТП, не уступающий результатам, полученным для случаев, соответствующих $n = 4; 5$ (и более) (см. рис.1).

Чаще всего ПТП с корректирующей термобатареей (далее – ПТП_{КБ}) выполняют из двух термобатарей, одна из которых – основная (на тепловоспринимающую поверхность которой поступает тепловой поток, подлежащий измерению), вторая – корректирующая, горячие спаи которой размещены вблизи сечения холодных спаев основной термобатареи, и включена с основной дифференциально.

Возможные принципиальные схемы размещения спиралей термоэлементов в ПТП с корректирующей термобатареей приведены на рис. 3.

Как видим, холодные спаи основной термобатареи и горячие спаи корректирующей термоба-

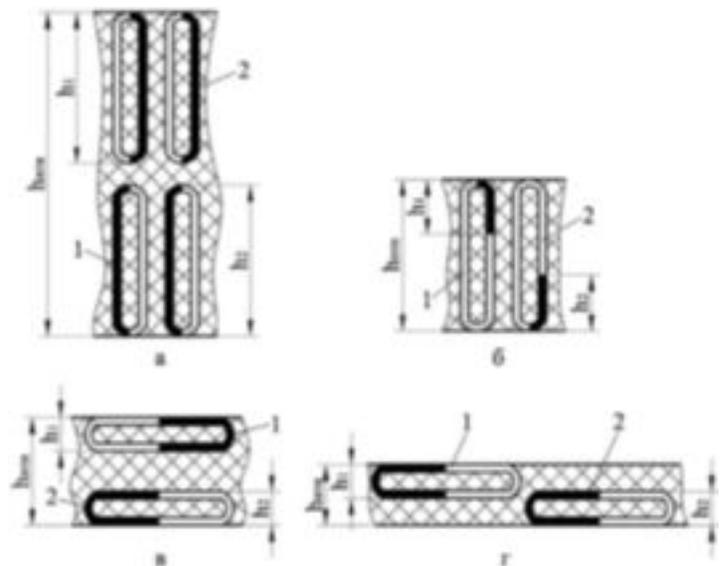


Рис. 3. Варианты конструктивного исполнения ПТП с корректирующей термобатареей (схемы а, б, в, г): 1 – основная термобатарея; 2 – корректирующая термобатарея.

тареи могут не располагаться в срединном сечении ПТП_{КБ}.

Рассмотрим другой случай граничных условий – ПТП расположен на теплоизоляционном основании. Для моделирования тепловых полей и анализа возможной инерционности ПТП_{КБ} значения параметра m могут быть определены путем решения задачи при том же начальном условии: $T(x, \tau = 0) = T_0$ и следующих граничных условиях:

$$T(x = 0; \tau) = T_0 + b\tau ;$$

$$\frac{\partial T(x = h, \tau)}{\partial x} = 0 ,$$

где b – скорость изменения температуры, К/с.

Решение [5] для температуры в этом случае имеет вид функции (4), в которой:

$$\theta(\eta, \tau) = Fo - \eta + 0,5\eta^2 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_k}{\mu_k^2} \cos(\mu_k(1-\eta)) \exp(-\mu_k^2 Fo) , \quad (11)$$

$$\text{где } \mu_k = (2k-1)\frac{\pi}{2} , A_k = (-1)^{k+1} \cdot 2/\mu_k .$$

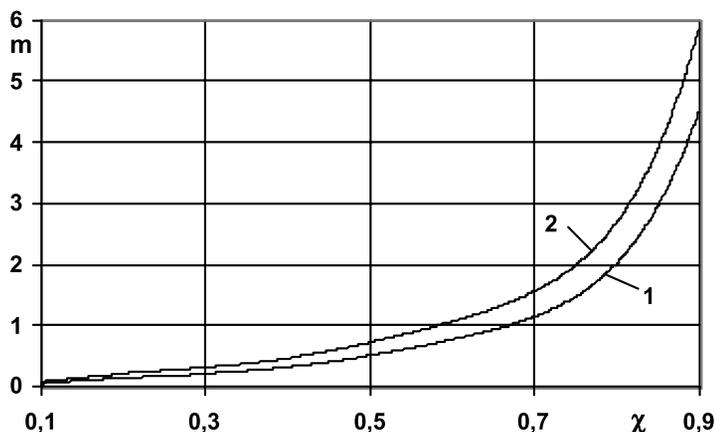


Рис. 4. Зависимости $m = f(\chi)$

1 – результаты расчета по формуле (13);
2 – результаты подбора в соответствии с полиномом (14).

При значениях критерия Фурье $Fo > 0,5$ выражение (11) упрощается и функция (4) принимает вид:

$$T(\eta, \tau) = T_0 + (Fo - \eta + 0,5\eta^2)q_0 h / \lambda . \quad (12)$$

Из уравнения (10) и решения этой задачи получена формула для определения значений параметра m :

$$m = f(\chi) = (0,5\chi^2 - \chi + 0,5) / (1 - \chi - 0,5(1 - \chi)^2) , \quad (13)$$

где $\chi = h_1 / h$, причем h_1 – расстояние между сечениями, в которых расположены холодные спаи

основной термобатареи и горячие спаи корректирующей термобатареи ПТП_{КБ}; h – высота ПТП_{КБ}.

Результаты расчета по формуле (13) представлены на рис. 4, при этом кривая 1 построена по расчетным значениям параметра m , полученным по формуле (13), а кривая 2 дает значения параметра m , которое подобрано при математическом моделировании для наилучшего воспроизведения измеряемого теплового потока. Для подобранных значений параметра m получен аппроксимирующий полином

$$m = 256,5\chi^6 - 566,87\chi^5 + 476,57\chi^4 - 183,42\chi^3 + 32,456\chi^2 - 1,0876\chi . \quad (14)$$

Для случая изменения температуры поверхности, на которой установлен ПТП, при выборе m необходимо пользоваться расчетной зависимостью (13). При размещении ПТП на термостатированной поверхности целесообразно использовать значения, рассчитанные по формуле (14).

На рис. 5 представлены результаты расчета по определению чисел Фурье, соответствующих времени реакции ПТП_{КБ} на входное воздействие постоянным тепловым потоком по уровню $N = 0,63$ (рис. 5, а) и по уровню $N = 0,95$ (рис. 5, б). При этом кривые 1 соответствуют случаю, когда значения m взяты с кривой 1 рис. 4, а кривые 2 соответствуют случаям с компенсацией при значениях параметра m , определенных с помощью

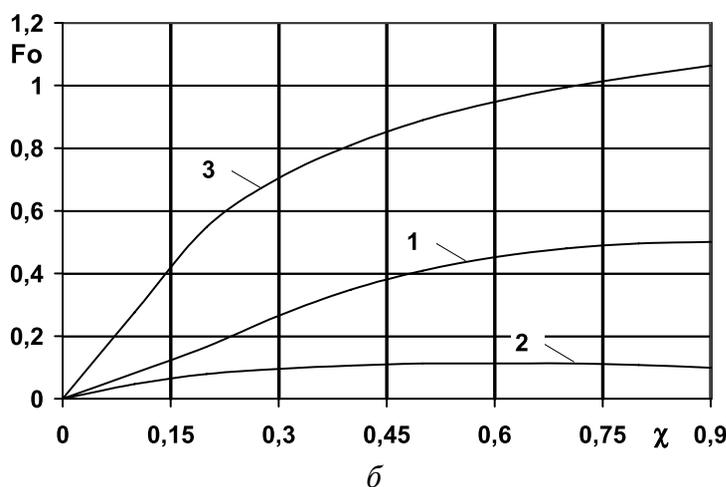
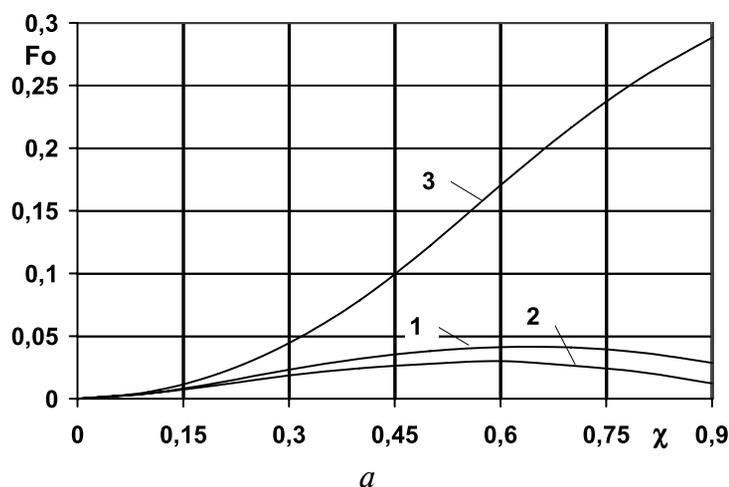


Рис. 5. Зависимости безразмерного времени достижения уровней $N = 0,63$ (а) и $0,95$ (б) в зависимости от относительного расстояния при вариации параметра m .

1 – m из уравнения (13); 2 – m из уравнения (14); 3 – $m = 0$.

кривой 2 рис. 4. Для сравнения на этих же рисунках приведены кривые 3, которые соответствуют реакции обычного ПТП, то есть при $m = 0$, на входное тепловое воздействие.

Из сопоставления кривых, приведенных на рис. 5 а, б, следует, что выигрыш от применения корректирующей термобатареи при значениях безразмерной координаты $\chi < 0,2$ – незначителен. Однако для времени реакции ПТП_{КБ} на тепловое воздействие по уровню $N = 0,95$ (рис. 5, б) видно, что введение в ПТП корректирующей термобатареи дает эффект уменьшения инерционности практически для любого значения χ .

Отсюда следует, что технологические требования к обеспечению определенного расстояния между сечениями, в которых должны быть размещены, соответственно, горячие спаи основной и холодные спаи корректирующей термобатареи, существенно снижаются.

Однако следует учитывать, что увеличение значения η приводит к снижению чувствительности ПТП за счет того, что при этом уменьшается доля основной термобатареи, участвующей в выработке полезного сигнала ПТП.

Таким образом, на основании анализа нестационарных тепловых процессов в преобразовате-

лях созданы теоретические основы проектирования малоинерционных термоэлектрических батарейных преобразователей с корректирующей батареей термоэлементов, которые имеют время реакции на входную тепловую нагрузку на порядок меньше по сравнению с традиционными ПТП.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Геращенко О.А.* Основы теплотрии. – К.: Наук. думка, 1971. – 192 с.
2. *F. van der Graaf:* „Heat Flux Sensors», chapter 8 of Volume 4: „Thermal Sensors» of the multi-volume work „Sensors, a comprehensive series», Göpel, Ed. 1990.
3. *Декуша Л.В.* Теплотрические измерительные преобразователи для исследования сложного теплообмена / Дис. канд. техн. наук. – Киев, 1990. – 311 с.
4. *Березин И.С., Житков Н.П.* Методы вычислений. – Т.1. – М.: Наука, 1966. – 632 с.
5. *Пехович А.И., Жидких В.М.* Расчеты теплового режима твердых тел. – Л.: Энергия, 1968. – 304 с.

Получено 11.01.2008 г.