

УДК 536.08:536.3:621.362

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЕДИНИЦЫ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОвого
ПОТОКА КОНДУКТИВНЫМ МЕТОДОМ

Л.В. Декуша, Т.Г. Грищенко, Т.В. Менделеева

Институт технической теплофизики НАН Украины

*Представлена членом редколлегии профессором С.В. Мищенко,
членом редколлегии спецвыпуска профессором С.В. Пономаревым*

Ключевые слова и фразы: градуировочные устройства; единица поверхностной плотности теплового потока; искажение теплового потока; метрология; образцовые средства измерения; теплопоточные измерения; эталоны.

Аннотация: Приведены теоретические обоснования основных требований к проектированию установок высшей точности для воспроизведения единицы плотности теплового потока.

Обозначения

$Bi = \alpha r_{ППП} / \lambda_{ППП}$ – число Био;

$D_{ППП}$, $h_{ППП}$ – диаметр и высота ППП, м;

q – плотность теплового потока, Вт/м²;

$x = z/h_{ППП}$, $\rho = r/r_{ППП}$ – безразмерные цилиндрические координаты;

$\beta = R_K/R_{ППП}$ – отношение контактного термического сопротивления к термическому сопротивлению ППП;

$\gamma = R_{ППП}/R_{бок}$ – отношение термического сопротивления ППП к боковому термическому сопротивлению;

$\delta = D_{ППП}/h_{ППП}$ – отношение диаметра ППП к его высоте;

$\theta = (T(z,r) - T_c) / T_c$ – безразмерная температура.

Индексы

0 – бесконечная пластина;

1 – вход в ППП;

2 – выход из ППП;

K – контактное термическое сопротивление;

ППП – преобразователь теплового потока;

C – среда;

ТБ – термобатарея.

Среди параметров, подлежащих измерению, контролю и регулированию, значительное место занимает тепловой поток, ставший сегодня таким же информативным параметром, как температура, давление, расход.

Особую актуальность приобретает необходимость обеспечения единства и правильности измерений теплового потока как в научных исследованиях, так и в промышленном производстве, учитывая то обстоятельство, что этот вид измерений стал стандартизованным с момента утверждения в 1998 году межгосударственного стандарта ГОСТ 30619-98 «Энергосбережение. Преобразователи теплового потока термоэлектрические общего назначения. Общие технические условия» (ДСТУ 3756-98).

Из трех способов передачи теплоты - кондукции, теплового излучения, конвекции – первые два наиболее точно поддаются эталонированию. Не случайно в рамках проблемы государственного обеспечения единства и правильности в области теплопо-

точных измерений созданы поверочные схемы, эталоны и образцовые средства измерений именно для кондуктивной и радиационной градуировок [1, 2].

Применение существующей поверочной схемы [1] в Украине затруднено отсутствием установки высшей точности (УВТ), на которой должны аттестовываться и поверять образцовые средства измерения первого разряда

В области теплоточных измерений к настоящему времени наиболее развитой является метрология измерений теплового потока и поверхностной плотности теплового потока с помощью плоских преобразователей теплового потока (ППП) генераторного типа, реализующих метод вспомогательной стенки.

При любом способе задания нормированного теплового потока для достижения высокой точности измерения обязательным требованием к градуировочному устройству является возможность обеспечения одномерности теплового потока, проходящего через градуируемый ППП. Как отмечает О.А. Сергеев [3], решение этой задачи должно быть первичным, так как только такое решение позволяет сформулировать основные требования к градуированию. Практически же в известных градуировочных установках реальные погрешности измерения теплового потока или его поверхностной плотности достаточно высоки по сравнению с погрешностями, характерными для электрических измерений. При кондуктивном способе задания теплового потока влияющими факторами являются:

- контактные термические сопротивления между торцовыми поверхностями ППП и поверхностями источника и стока теплоты;
- условия теплообмена на боковой поверхности ППП;
- собственное термическое сопротивление ППП;
- соотношение между диаметром ППП и его высотой.

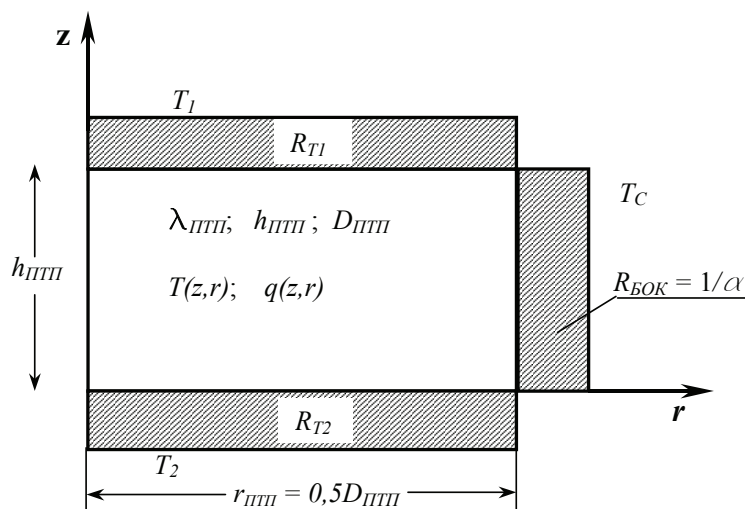


Рис. 1 Тепловая модель метрологической установки с изотермическим нагревателем

Аналитическое исследование вышеперечисленных факторов, обуславливающих погрешность измерения нормированной плотности теплового потока преобразователем вида вспомогательной стенки в градуировочном устройстве, сводится к определению в ППП поля тепловых потоков как локальных, так и среднеинтегральных по его поверхности, а также тепловых условий и геометрических параметров, при которых тепловые потоки остаются одномерными.

Тепловая модель рассмотренного градуировочного устройства приведена на рис. 1. Математическую задачу в общем виде можно сформулировать следующим образом. Требуется определить стационарное осесимметричное распределение тепловых потоков в ограниченном коротком цилиндре высотой $h_{ППП}$ и диаметром $D_{ППП} = 2r_{ППП}$. На торцах

цилиндра заданы термические сопротивления R_{T_1} и R_{T_2} , которые обусловлены контактным термическим сопротивлением на каждом из торцов ПТП, соприкасающихся с объектами, имеющими в общем случае постоянные не равные между собой температуры T_1 и T_2 . На боковой поверхности цилиндра происходит теплообмен с воздушной средой постоянной температуры T_c и коэффициентом теплообмена α . При условии независимости теплофизических свойств ПТП от температуры и осевой симметрии стационарное распределение температуры T в массиве ПТП описывается уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах r и z [4] с соответствующими граничными условиями, которые в безразмерной форме имеют вид:

$$\frac{\delta^2}{4} \cdot \frac{\partial^2 \theta(x, \rho)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta(x, \rho)}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \theta(x, \rho)}{\partial \rho} = 0, \quad (1)$$

$$\beta \cdot \frac{\partial \theta(x, \rho)}{\partial x} = -\theta(x, \rho) \text{ при } x = 1; \quad (2)$$

$$\beta \cdot \frac{\partial \theta(x, \rho)}{\partial x} = \theta(x, \rho) + 1 \text{ при } x = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta(x, \rho)}{\partial \rho} + \text{Bi} \cdot \theta(x, \rho) = 0 \text{ при } \rho = 1, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta(x, \rho)}{\partial \rho} = 0 \text{ при } \rho = 0. \quad (5)$$

Дифференциальное уравнение (1) линейно. Поэтому к нему можно применить один из классических методов разделения переменных либо интегральных преобразований [4].

Решение уравнения (1) при граничных условиях (2)–(5) для функции температуры в безразмерной форме имеет вид [5]:

$$\theta(x, \rho) = K_t \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_0(v_n \rho) S_n(x), \quad (6)$$

где $J_0(v_n \rho)$ - функция Бесселя первого рода нулевого порядка, v_n - собственные числа, определяемые из характеристического уравнения

$$v J_0'(v) + \text{Bi} \cdot J_0(v) = 0; \quad (7)$$

$$K_t = \delta/2\beta; \quad (8)$$

$$A_n = \frac{2\text{Bi}}{(v_n) J_0(v_n) (\text{Bi}^2 + v_n^2)}; \quad (9)$$

$$S_n(x) = [B_n(x) + C_n(x)] / Z_n(M), \quad (10)$$

$$B_n(x) = \theta_1 (sh(v_n M x) + D_{n,2} ch(v_n M x)), \quad (11)$$

$$C_n(x) = \theta_2 (sh(v_n M (1-x)) + D_{n,1} ch(v_n M (1-x))), \quad (12)$$

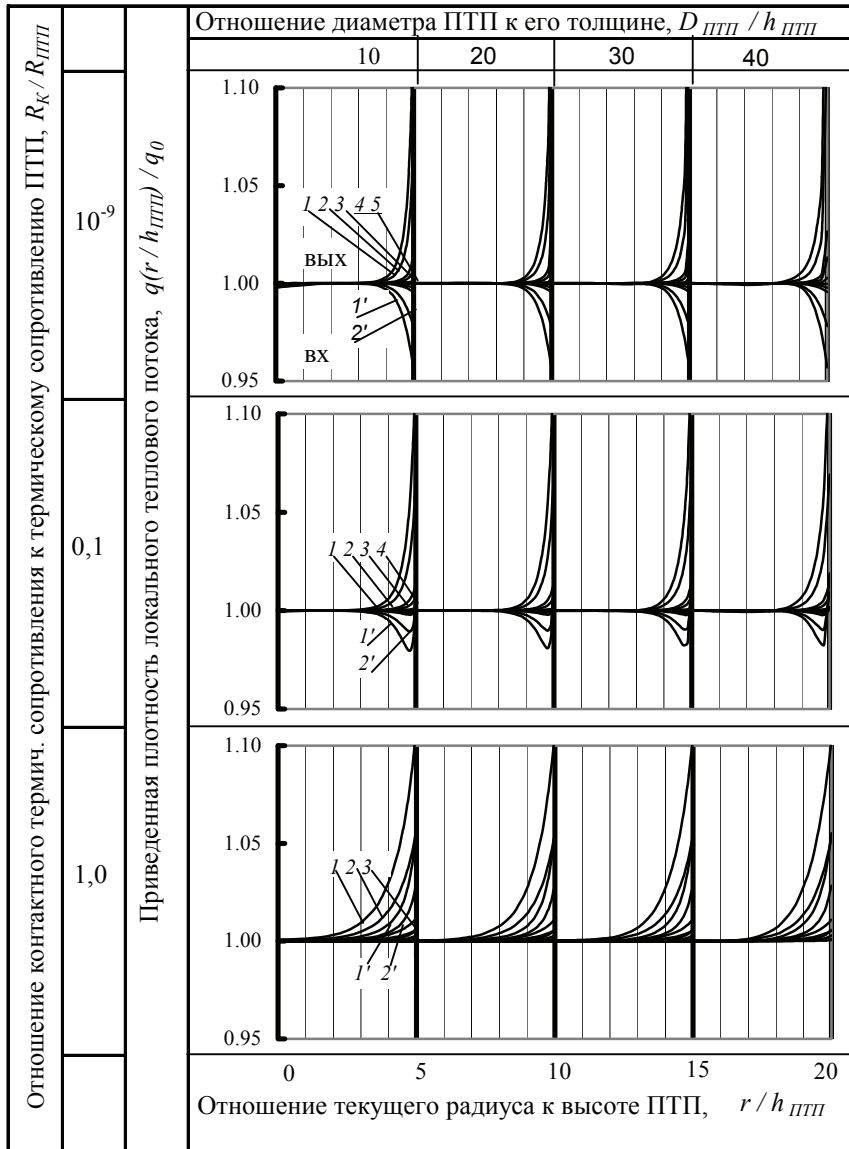
$$Z_n(M) = (D_{n,2} + D_{n,1}^{-1}) sh(v_n M) + (1 + D_{n,2}/D_{n,1}) ch(v_n M), \quad (13)$$

$$D_{n,1} = D_{n,2} = 2 \cdot \beta \cdot v_n / \delta. \quad (14)$$

Исходя из (6), для безразмерной локальной производной от температуры получим следующее выражение:

$$\frac{\partial \theta(x, \rho)}{\partial x} = K_q \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot v_n \cdot J_0(v_n \rho) \cdot P_n(x), \quad (15)$$

Зависимость приведенной плотности локального теплового потока от геометрических размеров ПТП, контактного и бокового термических сопротивлений



вход 1' - $R_{ПТП} / R_{БОК} = 0,1$; 2' - 0,05

выход 1 - $R_{ПТП} / R_{БОК} = 0,1$; 2 - 0,05; 3 - 0,01; 4 - 0,005; 5 - 0,001

где

$$K_q = 1/\beta; \quad (16)$$

$$P_n(x) = (G_n(x) + H_n(x))/Z_n(M); \quad (17)$$

$$G_n(x) = \theta_1 (ch(v_n Mx) + D_{n,2} sh(v_n Mx)); \quad (18)$$

$$H_n(x) = \theta_2 (ch(v_n M(1-x)) + D_{n,1} sh(v_n M(1-x))). \quad (19)$$

Отношение плотности локального теплового потока к плотности теплового потока в отсутствие теплообмена на боковой поверхности определится следующим выражением:

$$\bar{q}_{\text{лок}}(x, \rho) = \frac{q_{\text{лок}}}{q_0} = (1 + 2\beta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x}. \quad (20)$$

Для исследования влияния различных факторов на точность передачи единицы нормированной плотности теплового потока аттестуемому образцовому ПТП в метрологической установке кондуктивного типа с применением изотермического нагревателя проведен вычислительный эксперимент с использованием полученного решения (20) для условия $R_{T_1} = R_{T_2} = R_K$.

Расчеты проводились для следующих значений.

- безразмерного геометрического параметра ПТП: $\delta = D_{\text{ПТП}}/h_{\text{ПТП}} = 10; 20; 30$ и 40 ;
- безразмерного контактного термического параметра $\beta = R_K/R_{\text{ПТП}} = 10^{-9}; 0,001; 0,01; 0,1; 0,5$; и $1,0$;
- безразмерного бокового термического параметра $\gamma = R_{\text{ПТП}}/R_{\text{БОК}} = 0,001; 0,005; 0,01; 0,05$ и $0,1$, являющегося показателем интенсивности теплообмена в зазоре между боковой поверхностью ПТП и теплозащитным экраном.

В табл. 1 систематизированы и графически представлены распределения относительных плотностей локального теплового потока q_i/q_0 вдоль безразмерного текущего радиуса ПТП $r/h_{\text{ПТП}}$ в сечениях $x = 1$ (индекс «вх») и $x = 0$ (индекс «вых»), соответствующих входу теплового потока в ПТП и выходу из него. Варианты расчетов обозначены в таблицах и охватывают широкий диапазон значений контактных термических сопротивлений, боковых тепловых условий и отношений диаметра ПТП к его высоте.

Поскольку сигнал преобразователя, выполненного в виде вспомогательной стенки с конкретными размерами и теплофизическими свойствами, пропорционален значению не локального, а среднеинтегрального по поверхности чувствительного элемента ПТП теплового потока, кроме относительной плотности локального теплового потока, рассчитаем также относительные плотности среднеинтегрального по торцевой поверхности теплового потока по формуле

$$\bar{q}_{\text{ср}}(x, \rho) = (1 + 2\beta) \cdot q_{\text{ср}}(x, \rho), \quad (21)$$

где $q_{\text{ср}}(x, \rho)$ определяется соотношением

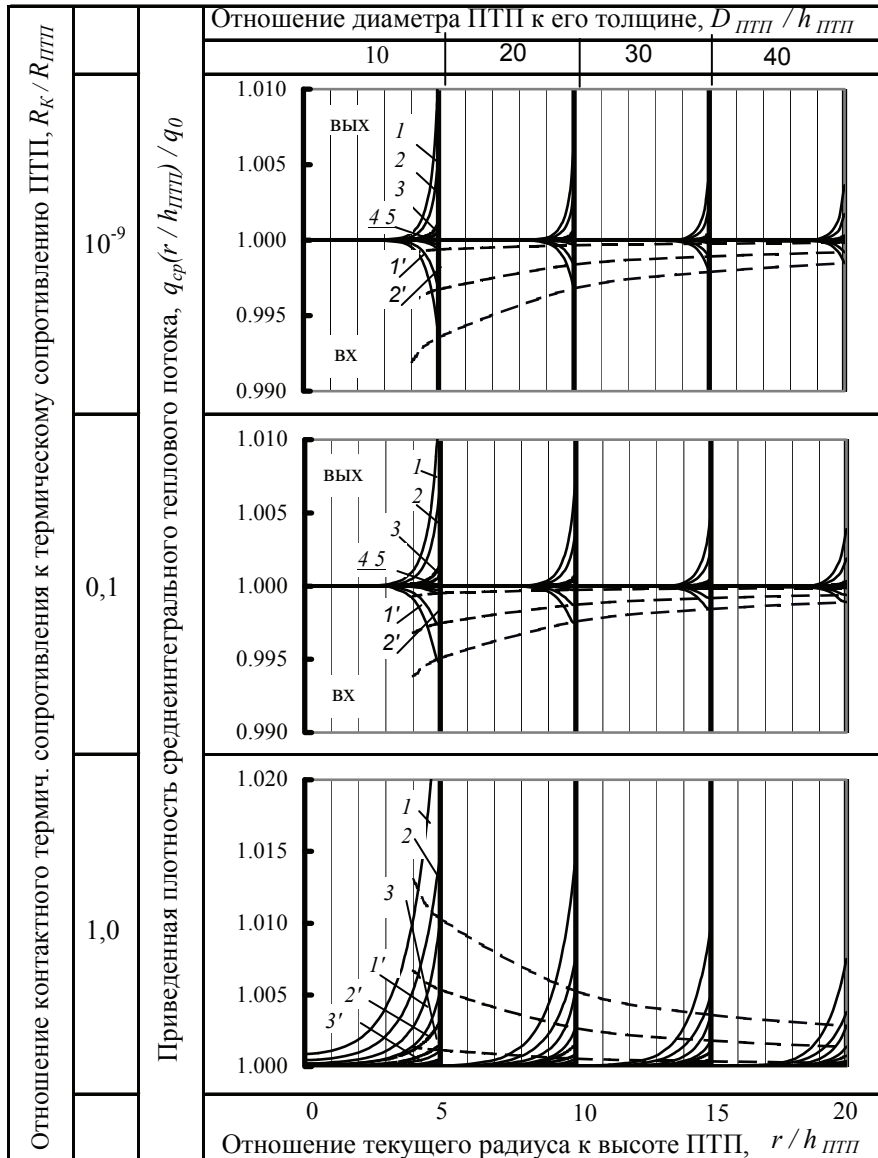
$$q_{\text{ср}}(x, \rho) = \frac{1}{\pi \rho^2} \int_0^\rho \frac{\partial \theta(x, \rho)}{\partial x} 2\pi \rho d\rho = 2K_q \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{J_1(v_n \rho)}{\rho} P_n(x), \quad (22)$$

а K_q , A_n и $P_n(x)$ - формулами (16), (9) и (17).

Преобразователями вышеуказанного типа разность температур измеряется на площадках, которые расположены на определенном слое вспомогательной стенки. В зоне одномерности соотношение между относительной плотностью среднеинтегрального теплового потока, разностью среднеинтегральных безразмерных температур $\Delta\theta_{\text{ср}}$ и относительной высотой термобатареи $h_{\text{ТБ}}/h_{\text{ПТП}}$ определяется формулой

$$\bar{q}_{\text{ср}} = \Delta\theta_{\text{ср}} \cdot (1 + 2\beta) / (h_{\text{ТБ}} / h_{\text{ПТП}}), \quad (23)$$

Зависимость приведенной плотности среднеинтегрального по поверхности ПТП теплового потока от геометрических размеров ПТП, контактного и бокового термических сопротивлений



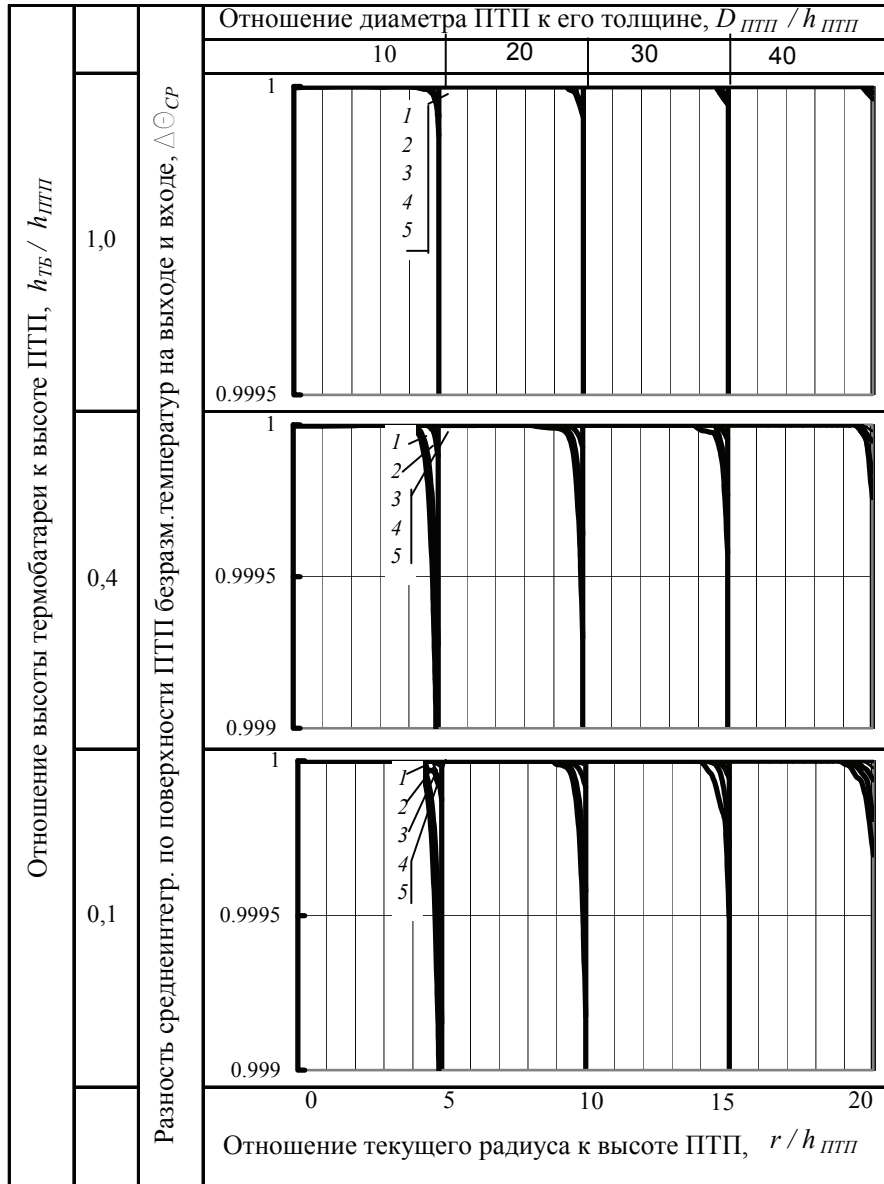
вход 1' - $R_{ПТП} / R_{БОК} = 0,1$; 2' - 0,05

выход 1 - $R_{ПТП} / R_{БОК} = 0,1$; 2 - 0,05; 3 - 0,01; 4 - 0,005; 5 - 0,001

где среднеинтегральная по плоской поверхности безразмерная температура

$$\theta_{cp} = \frac{1}{\pi \rho^2} \int_0^{\rho} \theta(x, \rho) 2\pi \rho d\rho = \frac{\delta}{\beta} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{J_1(v_n \rho)}{v_n \rho} F_n(x). \quad (24)$$

Зависимость разности среднеинтегральных температур на выходе от геометрических размеров ПТП и термобатареи и величины бокового термического сопротивления



1 - $R_{ПТП} / R_{БОК} = 0,1$; 2 - 0,05; 3 - 0,01; 4 - 0,005; 5 - 0,001

В табл. 2 представлены графики распределения относительных плотностей среднеинтегральных (22) по поверхности чувствительного элемента ПТП тепловых потоков.

В табл. 3 графически представлены зависимости разности безразмерных среднеинтегральных температур (24) на выходе и входе от геометрических параметров ПТП и относительной толщины термобатареи для $R_{ПТП} = 0,01$.

Графики табл. 1 показывают, что применение в качестве источника теплового потока изотермического нагревателя, обеспечивающего режим теплопоточной градуировки при граничном условии первого рода (т.е. при $T_1 = \text{const}$ и $T_2 = \text{const}$), вполне допустимо, так как при этом на тепловоспринимающей и теплоотдающей поверхностях ПТП имеются зоны одномерного теплового потока, для которых относительные плотности q_i/q_0 стремятся к единице.

Как следует из графиков, поле плотностей тепловых потоков обладает одномерностью в центральной области и сильно зависит не только от условий теплообмена на боковой поверхности ПТП, но и от соотношения его геометрических размеров и теплопроводности. Расширению области одномерного теплового потока по поверхности ПТП способствует наличие охранной зоны вокруг чувствительного элемента ПТП.

Однако выбор эффективных размеров охранной зоны, а также геометрических размеров ПТП и его теплопроводности необходимо производить, пользуясь графиками табл. 2, так как сигнал преобразователя пропорционален значению именно среднеинтегрального теплового потока. С повышением теплопроводности ПТП и увеличением отношения $D_{\text{ПТП}}/h_{\text{ПТП}}$ зона одномерности теплового потока по поверхности ПТП расширяется. Из этой же таблицы следует, что в некоторых конкретных случаях нет необходимости добиваться минимального контактного или бокового термических сопротивлений.

Чтобы обеспечить высокую точность при аттестации образцовых ПТП, необходимо их выполнять с охранной зоной и обеспечивать комплекс тепловых условий и геометрических размеров, руководствуясь графиками приведенных таблиц.

Поскольку при кондуктивном подведении от источника теплоты нормированного теплового потока к ПТП при заданных граничных условиях первого рода входящий среднеинтегральный по поверхности тепловой поток является по существу передаточным звеном метрологической аттестации, то условие $q_1/q_0 = 1$ должно быть обеспечено с наивысшей точностью.

В этом случае плотность именно входящего среднеинтегрального по поверхности теплового потока выступает в качестве нормированной плотности теплового потока.

Графики табл. 3 дают возможность сделать вывод о том, что даже для самого небольшого отношения высоты термобатареи к высоте ПТП искажения разности среднеинтегральных температур распространяются от края боковой поверхности ПТП не более чем на величину, равную значению одной высоты ПТП.

Совокупность всех построенных графиков позволяет сделать вывод о том, что можно изготовить образцовый ПТП, предназначенный для передачи единицы теплового потока или плотности теплового потока от установки высшей точности рабочим средствам измерения, с такой охранной зоной, чтобы чувствительный элемент ПТП всей своей поверхностью воспринимал одномерный тепловой поток.

Список литературы

1. МИ1855-88 Государственная поверочная схема для средств измерений поверхностной плотности теплового потока в диапазоне $10 \div 2000 \text{ Вт/м}^2$ / Методические указания – М.: Изд-во стандартов, 1988. - 5 с.
2. КНД 50-031-94 Державна повірна схема для засобів вимірювання енергетичної освітленості малих рівнів. – Київ: Держстандарт України, 1996.
3. Сергеев О.А. Метрология и средства измерений тепловых величин // Сб.: Итоги науки и техники. Метрология и измерительная техника. Т.5 - М.: ВИНТИ, 1982. - С.179 - 223.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности.- М.: Высшая школа, 1967. - 599 с.
5. Грищенко Т.Г. Теплотрический экспресс-метод и прибор для определения коэффициента теплопроводности неметаллических материалов: Дисс. ... канд. техн. наук. - Киев, 1977. - 198 с.

Reproduction of Thermal Flow Density Unit by Means of Conductive Method

L.V. Dekusha, T.G. Grischenko, T.V. Mendeleeva

Institute of Technical Thermal Physics, NAS Ukraine

Key words and phrases: graduation devices; surface density of thermal flow unit; thermal flow distortion; metrology; sample measurement means; thermal flow measurements; standards.

Abstract: Theoretical grounds of main requirements for design of the strictest accuracy sets for reproduction of thermal flow density unit are given.

Reproduktion der Dichteeinheit der Wärmeströmung durch die Konduktivmethode

Zusammenfassung: Es sind theoretische Begründungen der Hauptforderungen zur Projektierung der Anlagen mit der höchsten Genauigkeit für die Reproduktion der Dichteeinheit der Wärmeströmung angeführt.

Reproduction de l'unité de la densité du courant thermique par une méthode de conduction

Résumé: On a fait les fondements théoriques des exigences essentiels pour la conception des installations de la haute précision pour la reproduction de l'unité de la densité du courant thermique.
