

УДК 536.5: 536.6: 621.36: 006.05

Ковтун С.И., Декуша Л.В., Грищенко Т.Г.

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

## ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭТАЛОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

Наведені результати дослідження ступеню впливу різних факторів на одномірність поля теплового потоку в тілі перетворювача теплового потоку, які дозволяють аргументовано підбирати оптимальні параметри еталонних ПТП.

Представлены результаты исследования степени влияния различных факторов на одномерность поля теплового потока в теле преобразователя теплового потока, позволяющие аргументировано подбирать оптимальные параметры эталонных ПТП.

The research results of different factors influence rate on the heat flow field one-dimensionality in the body of the heat flow transducers are presented, permissive to select correctly the optimal parameters of standard HFT.

$B_i$  – числа Био;

$D$  – диаметр;

$h$  – высота;

$J$  – модифицированная функция Бесселя первого рода;

$q$  – плотность теплового потока;

$r, z$  – цилиндрические координаты;

$r$  – радиус;

$R$  – тепловое сопротивление;

$T$  – температура;

$\alpha$  – коэффициент конвективного теплообмена;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности;

$\rho, \zeta$  – безразмерные цилиндрические координаты;

$\vartheta$  – безразмерная температура;

АЧТ – абсолютно черное тело;

ИТИ – источник теплового излучения;

ПТП – преобразователь теплового потока;

СНИИМ – Сибирский научно-исследовательский институт метрологии.

### Нижние индексы:

0 – исходное значение;

1, 2 – поверхности ПТП;

бок – боковой;

верх – верхний;

НАГ – нагреватель;

ОС – окружающая среда;

ср – среднеинтегральный;

ТБ – термобатарея;

ТС – теплосток;

ХОЛ – холодильник;

Э – эталонный.

В настоящее время теория теплотрии и созданные на ее основе средства измерения позволяют обеспечить внедрение ряда национальных стандартов Украины в области энергосбережения и строительной индустрии [1-8], в которых рекомендовано проводить тепловые измерения с применением преобразователей теплового потока, выполненных по ДСТУ 3756-98 [9], поэтому вопрос государственного обеспечения единства в данной области измерений становится более чем актуальным.

Еще в конце восьмидесятых годов в ИТТФ были созданы образцовые установки моделей КГУ-3-20 и КГУ-1-25 с кондуктивным под-

водом энергии, предназначенные для аттестации эталонных ПТП диаметром 20 мм и 25 мм, соответственно [10]. Эти ПТП впоследствии применялись для аттестации и поверки рабочих средств измерения поверхностной плотности теплового потока посредством компарирования в установках, как с кондуктивным, так и радиационным подведением теплоты.

В 1991 году совместно со СНИИМ были проведены сличения, в результате которых было установлено, что расхождения в определении заданного значения единицы измерения не превышали 1,5 %, что вполне удовлетворяет практике теплоточных измерений и сегодня.

Однако при проведении компарирования, особенно с радиационным способом подведения тепловой энергии, в ПТП такого типоразмера наблюдались значительные краевые эффекты [11, 12], приводившие в результате к погрешностям на уровне 5...6%. Этот факт послужил поводом для проведения аналитического исследования искажения температурных и тепловых полей в ПТП при компарировании с целью выбора его оптимальных параметров.

Основными характеристиками эталонных ПТП являются их чувствительность к измеряемой величине, теплофизические характеристики, соотношение размеров чувствительной и охранной зон и геометрические размеры. Для выбора этих параметров рассмотрен характер изменения полей температуры и плотности теплового потока. С этой целью решена задача передачи теплоты через ПТП с использованием уравнения теплопроводности при соответствующих граничных условиях.

Тепловая модель задачи для ПТП, помещенного в установку кондуктивного типа, представлена на рисунке 1.

Поставленная задача решена путем определения распределения стационарного теплового потока в теле ПТП, представляющем собой ограниченный короткий цилиндр высотой  $h_{\text{ПТП}}$  и диаметром  $D_{\text{ПТП}} = 2r_{\text{ПТП}}$ . В сечениях с координатой  $z = 0$  и  $z = h_{\text{ПТП}}$ , соответствующих торцам ПТП, задано тепловое сопротивление  $R_{T1} = R_{T2} = R_K$ , которое обусловлено контактным тепловым сопротивлением на поверхностях ПТП, соприкасающихся с источником и стоком теплоты, имеющими в общем случае постоянные неодинаковые температуры  $T_1 \neq T_2$ .

Между боковой поверхностью цилиндра и теплозащитным экраном происходит теплообмен через газовую прослойку при постоянной температуре  $T_{\text{ОС}}$  и эффективном коэффициенте теплообмена  $\alpha_{\text{бок}}$ . Тепловое сопротивление теплообмену на боковой поверхности равно  $R_{\text{бок}} = 1/\alpha_{\text{бок}}$ .

При условии осевой симметрии и независимости теплофизических свойств ПТП от температуры, стационарное распределение тем-

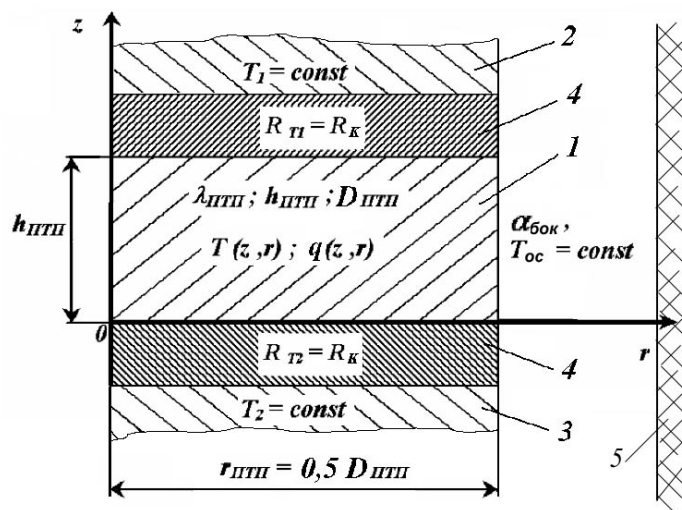


Рис. 1. Тепловая модель ПТП, помещенного в установку с кондуктивным подводом тепловой энергии: 1 – ПТП, 2 – источник теплоты, 3 – теплосток, 4 – слои контактного теплового сопротивления, 5 – теплозащитный экран.

пературы в массиве ПТП  $T(z, r)$  описывается известным уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах  $z$  и  $r$  [13]:

$$\frac{\partial^2 T(z, r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(z, r)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(z, r)}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

с граничными условиями:

$$\begin{cases} \lambda \frac{\partial T(z, r)}{\partial z} = \frac{1}{R_{T1}} \cdot (T_1 - T(z, r)) & \text{при } z = h_{\text{ПТП}}, \\ \lambda \frac{\partial T(z, r)}{\partial z} = \frac{1}{R_{T2}} \cdot (T(z, r) - T_2) & \text{при } z = 0, \\ \lambda \frac{\partial T(z, r)}{\partial r} = \alpha_{\text{бок}} \cdot (T_{\text{ОС}} - T(z, r)) & \text{при } r = r_{\text{ПТП}}, \\ \frac{\partial T(z, r)}{\partial r} = 0 & \text{при } r = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Путем перехода к безразмерным координатам:

$$\zeta = z/h_{\text{ПТП}}, \quad 0 \leq \zeta \leq 1; \quad \rho = r/r_{\text{ПТП}}, \quad 0 \leq \rho \leq 1;$$

$$\vartheta(\zeta, \rho) = \frac{T(z, r) - T_{\text{ОС}}}{T_{\text{ОС}}}; \quad \vartheta_i = \frac{T_i - T_{\text{ОС}}}{T_{\text{ОС}}}, \quad \text{где } i = 1, 2 \quad (3)$$

и введения обозначений:  $R_{\text{ПТП}} = h_{\text{ПТП}}/\lambda_{\text{ПТП}}$ ;  $R_{\text{бок}} = 1/\alpha_{\text{бок}}$ ;  $\chi_{\text{ПТП}} = D_{\text{ПТП}}/h_{\text{ПТП}}$ ;  $H = R_K/R_{\text{ПТП}}$  или  $H_i = R_{T_i}/R_{\text{ПТП}}$ ;  $\gamma = R_{\text{ПТП}}/R_{\text{бок}}$ ;  $Bi_{\text{бок}} = \alpha_{\text{бок}} \cdot r_{\text{ПТП}}/\lambda_{\text{ПТП}}$  уравнение (1) и граничные условия (2) преобразуются к виду:

$$\frac{\chi^2}{4} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta(\zeta, \rho)}{\partial \zeta^2} + \frac{\partial^2 \vartheta(\zeta, \rho)}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \vartheta(\zeta, \rho)}{\partial \rho} = 0, \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{H_1} \cdot \frac{\partial \vartheta(\zeta, \rho)}{\partial \zeta} = \vartheta_1 - \vartheta(\zeta, \rho) \quad \text{при } \zeta = 1, \\ \frac{1}{H_2} \cdot \frac{\partial \vartheta(\zeta, \rho)}{\partial \zeta} = \vartheta(\zeta, \rho) - \vartheta_2 \quad \text{при } \zeta = 0, \\ \frac{\partial \vartheta(\zeta, \rho)}{\partial \rho} + Bi_{\text{бок}} \cdot \vartheta(\zeta, \rho) = 0 \quad \text{при } \rho = 1, \\ \frac{\partial \vartheta(\zeta, \rho)}{\partial \rho} = 0 \quad \text{при } \rho = 0. \end{array} \right. \quad (5)$$

Решение уравнения (4) при граничных условиях (5) для функции температуры в безразмерной форме было получено в работе [14] и имеет вид:

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

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

$$\begin{aligned} v \cdot J'_0(v) + Bi \cdot J_0(v); \\ K_t = Bi_{\text{бок}} / (\alpha_{\text{бок}} \cdot R_{T1}); \\ A_n = 2Bi_{\text{бок}} / (v_n \cdot J_0(v_n) \cdot (Bi_{\text{бок}}^2 + v_n^2)), \\ S_n(\zeta) = (B_n(\zeta) + C_n(\zeta)) / Z_n(M), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $B_n(\zeta) = \vartheta_1 \cdot (\text{sh}(v_n M \zeta) + D_{n,2} \cdot \text{ch}(v_n M \zeta))$ ,  
 $C_n(\zeta) = \vartheta_2 \cdot (\text{sh}(v_n M (1 - \zeta)) + D_{n,1} \cdot \text{ch}(v_n M (1 - \zeta)))$ ,  
 $Z_n(M) = (D_{n,2} + D_{n,1}^{-1}) \cdot \text{sh}(v_n M) + (1 + D_{n,2}/D_{n,1}) \cdot \text{ch}(v_n M)$ ,  
 при  $D_{n,1} = v_n \cdot \alpha_{\text{бок}} \cdot R_{T1} / Bi_{\text{бок}}$ ,  $D_{n,2} = v_n \cdot \alpha_{\text{бок}} \cdot R_{T2} / Bi_{\text{бок}}$ ,  
 $M = 2/\chi$ .

На основании (6) для производной от локальной температуры в безразмерном виде получено выражение:

$$\frac{\partial \vartheta(\zeta, \rho)}{\partial \zeta} = K_q \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot v_n \cdot J_0(v_n \rho) \cdot P_n(\zeta), \quad (8)$$

$$\text{где } K_q = 2K_t/\chi, P_n(\zeta) = (G_n(\zeta) - N_n(\zeta))/Z_n(M), \quad (9)$$

$$\text{при } G_n(\zeta) = \vartheta_1 \cdot (\text{ch}(v_n M \zeta) - D_{n,2} \cdot \text{sh}(v_n M \zeta)),$$

$$N_n(\zeta) = \vartheta_2 \cdot (\text{ch}(v_n M (1 - \zeta)) + D_{n,1} \cdot \text{sh}(v_n M (1 - \zeta))).$$

Плотность теплового потока по нормали к торцевой поверхности в отсутствие теплообмена на боковой поверхности  $q_0$  рассматриваемого цилиндра конечных размеров, что соответствует неискаженному тепловому потоку, рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} q_0 &= -(T_1 - T_2) / (h_{\text{ПТП}}/\lambda_{\text{ПТП}} + R_{T1} + R_{T2}) = \\ &= -\lambda_{\text{ПТП}} \cdot T_{\text{ос}} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) / (h_{\text{ПТП}} \cdot (1 + R_{T1}/R_{\text{ПТП}} + R_{T2}/R_{\text{ПТП}})). \end{aligned} \quad (10)$$

Сигнал ПТП, выполненного в виде вспомогательной стенки с конкретными конечными размерами и теплофизическими свойствами, пропорционален значению среднеинтегрального теплового потока по поверхности чувствительного элемента ПТП, а не локального, поэтому исходя из определения среднеинтегральной по поверхности плотности теплового потока [15] и выражения (8) для производной от локальной безразмерной температуры, расчетная формула для плотности среднеинтегрального теплового потока запишется как:

$$\begin{aligned} q_{\text{ср}}(\zeta, \rho) &= \frac{1}{\pi \rho^2} \int_0^{\rho} \frac{\partial \vartheta(\zeta, \rho)}{\partial \zeta} \cdot 2\pi \rho \cdot d\rho = \\ &= 2K_q \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \frac{J_1(v_n \rho)}{\rho} \cdot P_n(\zeta). \end{aligned} \quad (11)$$

Аналогично получена расчетная формула для среднеинтегральной по поверхности температуры в безразмерном виде:

$$\vartheta_{\text{ср}} = \frac{1}{\pi \rho^2} \cdot \int_0^{\rho} \vartheta(\zeta, \rho) \cdot 2\pi \rho \cdot d\rho =$$

$$= 2K_t \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \frac{J_1(v_n \rho)}{v_n \cdot \rho} \cdot S_n(\zeta) \quad (12)$$

Учитывая выражения (10) и (11), приведенная плотность среднеинтегрального по поверхности ПТП теплового потока по отношению к неискаженному тепловому потоку  $q_{cp}/q_0$  определяется следующим соотношением:

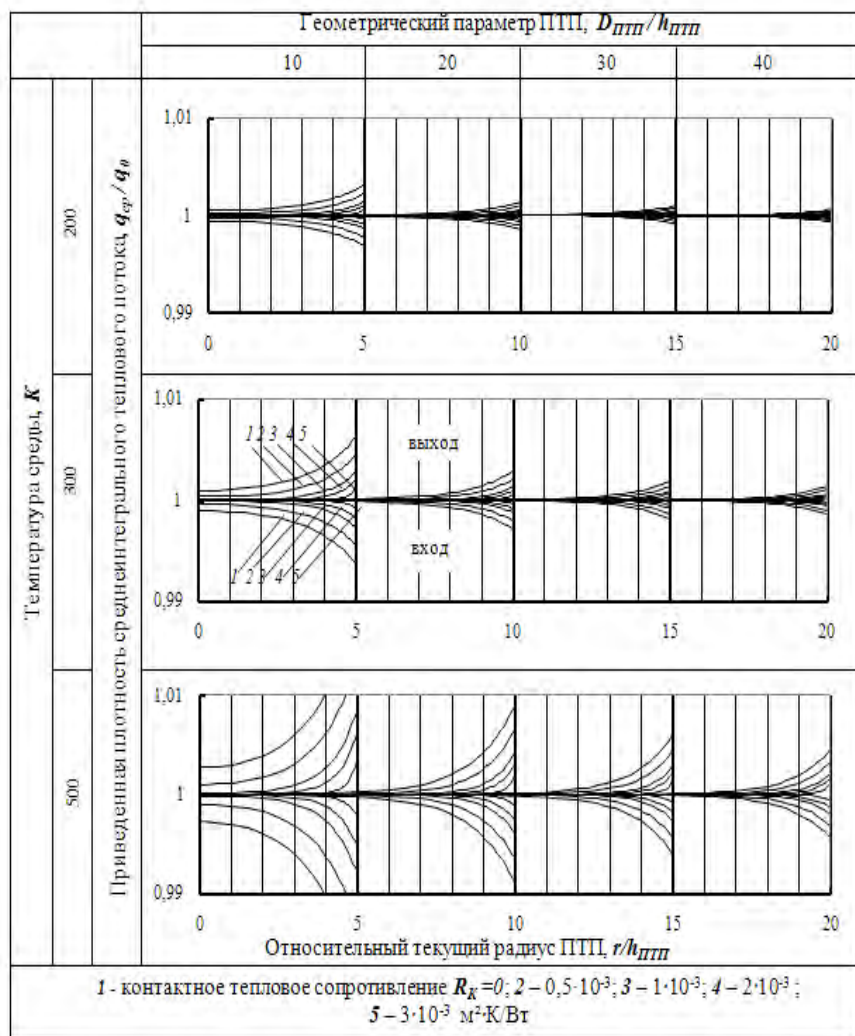
$$q_{cp}/q_0 = q_{cp}(1 + R_{T1}/R_{ПТП} + R_{T2}/R_{ПТП})/\Delta\vartheta, \quad (13)$$

где  $\Delta\vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_2$ .

Отношение (13) является критерием степени распространения искажения теплового потока.

В таблице 1 систематизированы результаты счета по формуле (13) в виде графиков, представляющих распределение значений приведенной плотности среднеинтегрального по поверхности ПТП теплового потока  $q_{cp1}/q_0$  в зависимости от текущего относительного радиуса  $r/h_{ПТП}$  в сечениях  $\zeta = 0$  и  $\zeta = 1$ , соответствующих тепловоспринимающему (вход) и теплоотдающему (выход) торцам ПТП, соответственно, в отсутствие бокового теплообмена.

Табл. 1. Распределение приведенной плотности среднеинтегрального по поверхности ПТП теплового потока на входе и выходе в зависимости от относительного текущего радиуса при вариации геометрического параметра ПТП, температуры отнесения и контактного теплового сопротивления в отсутствие теплообмена на боковой поверхности





Эти результаты позволяют сделать вывод, что искажения теплового потока далее пяти толщин ПТП в глубину от боковой поверхности преобразователя не проникают.

Необходимо учитывать, что в ПТП вида вспомогательной стенки разность температуры измеряется термоэлементами, спаян которых расположены на определенной глубине вспомогательной стенки, как показано на рисунке 2.

Поэтому, для определения распределения среднеинтегрального теплового потока в зависимости от глубины заделки термобатарей в ПТП, плотность среднеинтегрального теплового потока на выходе из термобатарей запишем через разность среднеинтегральных значений температуры:

$$q_{cp} = \lambda_{ПТП} \cdot (T_{cp}(r, h_1) - T_{cp}(r, h_2)) / h_{TB} = \\ = \lambda_{ПТП} \cdot (T_{cp}(r, h_1) - T_{cp}(r, h_2)) / (h_{ПТП} \cdot (h_{TB} / h_{ПТП})), \quad (14)$$

где  $h_{TB}$  – высота термобатарей,  $h_1$  и  $h_2$  – безразмерные параметры термобатарей в ПТП:

$$h_1 = 0,5(1 - h_{TB} / h_{ПТП}), h_2 = 1 - 0,5(1 - h_{TB} / h_{ПТП}). \quad (15)$$

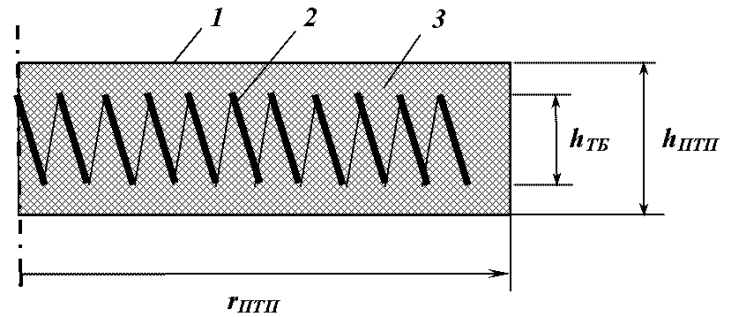
Критерий степени распространения искажения среднеинтегрального теплового потока с учетом (14) и (15) имеет вид:

$$q_{cp} / q_0 = (\vartheta_{cp}(r, h_1) - \vartheta_{cp}(r, h_2)) / (h_{TB} / h_{ПТП}), \quad (16)$$

где среднеинтегральная безразмерная температура определена формулой (12).

Результаты по формуле (16) в зависимости от безразмерного текущего радиуса при вариации относительной высоты термобатарей  $h_{TB} / h_{ПТП}$  представлены семействами графиков в таблице 2.

Основной вывод из этих результатов состоит в том, что при изотермическом исполнении нагревателя и теплостока чувствительность ПТП, у которого толщина внешних защитных слоев по обе стороны термобатарей, вмонтированной в ПТП, равна 0,1 мм и более, стабилизируется и перестает зависеть от теплового контактного сопротивления, что совпадает с рекомендациями [16, 17] по проекти-



**Рис. 2. Схема расположения термобатарей в ПТП вида вспомогательной стенки:**  
1 – ПТП, 2 – термобатарея,  
3 – электроизоляционный компаунд.

рованию ПТП. Зона распространения искажений теплового поля не превышает двух толщин ПТП в самом неблагоприятном случае (при максимальной интенсивности теплообмена по боковой поверхности ПТП, что имеет место при высоких температурах).

Особенностью всех кондуктивных компараторов является соосное и последовательное расположение одного или двух эталонных и одного аттестуемого рабочего ПТП по направлению заданного теплового потока, пронизывающего этот «столбик» из ПТП. Поэтому существенным является решение задачи о минимизации боковых тепловых потерь и контактного теплового сопротивления.

При выборе условий проведения компарирования необходимо регламентировать определенным образом температуру среды (или защитного экрана), от значения которой зависит интенсивность теплообмена по боковой поверхности столбика и, следовательно, характер распределения плотности теплового потока и температуры в преобразователях. Конструктивно удобный защитный экран располагать на холодильнике или на нагревателе, при этом температура экрана будет равна в первом случае температуре стока теплоты, во втором – температуре источника, либо же выполнять защитный экран таким образом, чтобы его температура была равна среднему арифметическому значению температуры источника и стока теплоты.

Таблица 3 дает иллюстрацию того, что происходит с искажениями среднеинтегрального теплового потока и температуры, если изменять температуру защитного экрана.

Для упрощения расчетов в качестве безразмерной температуры взято выражение  $\vartheta(\zeta, \rho) = (T(\zeta, r) - T_{\text{ХОЛ}}) / (T_{\text{НАГ}} - T_{\text{ХОЛ}})$ . Из результатов, представленных в этой таблице, следует, что при температуре бокового экрана, равной среднему арифметическому температур источника и стока теплоты (нагревателя и холодильника), зона одномерности максимальна. При этом поля температур в аттестуемом и эталонном ПТП зеркально симметричны и отношение средне-

интегральных по поверхности и высоте тепловых потоков, проходящих через аттестуемый и эталонный ПТП, равно единице.

Это позволяет при анализе погрешностей компарирования составляющую из-за теплообмена по боковой поверхности и контактных тепловых сопротивлений не учитывать.

Для получения искомым распределений плотностей теплового потока и температуры при радиационном компарировании также решена задача передачи теплоты с учетом радиационного теплообмена между источником теплового излучения и поверхностями ПТП [11] с использованием уравнения теплопро-

Табл. 2. Распределение разности среднеинтегральной безразмерной температуры на выходе и входе ПТП в зависимости от безразмерного текущего радиуса при вариации геометрического параметра ПТП, относительной высоты термобатареи и отношения контактного теплового сопротивления ПТП к сопротивлению боковому теплообмену

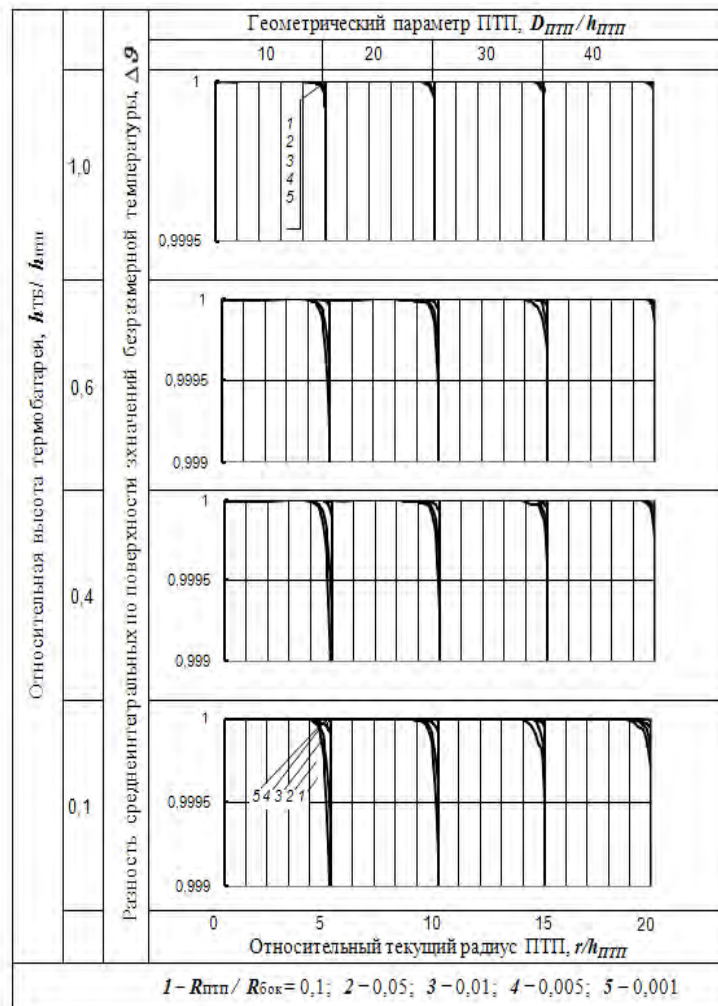
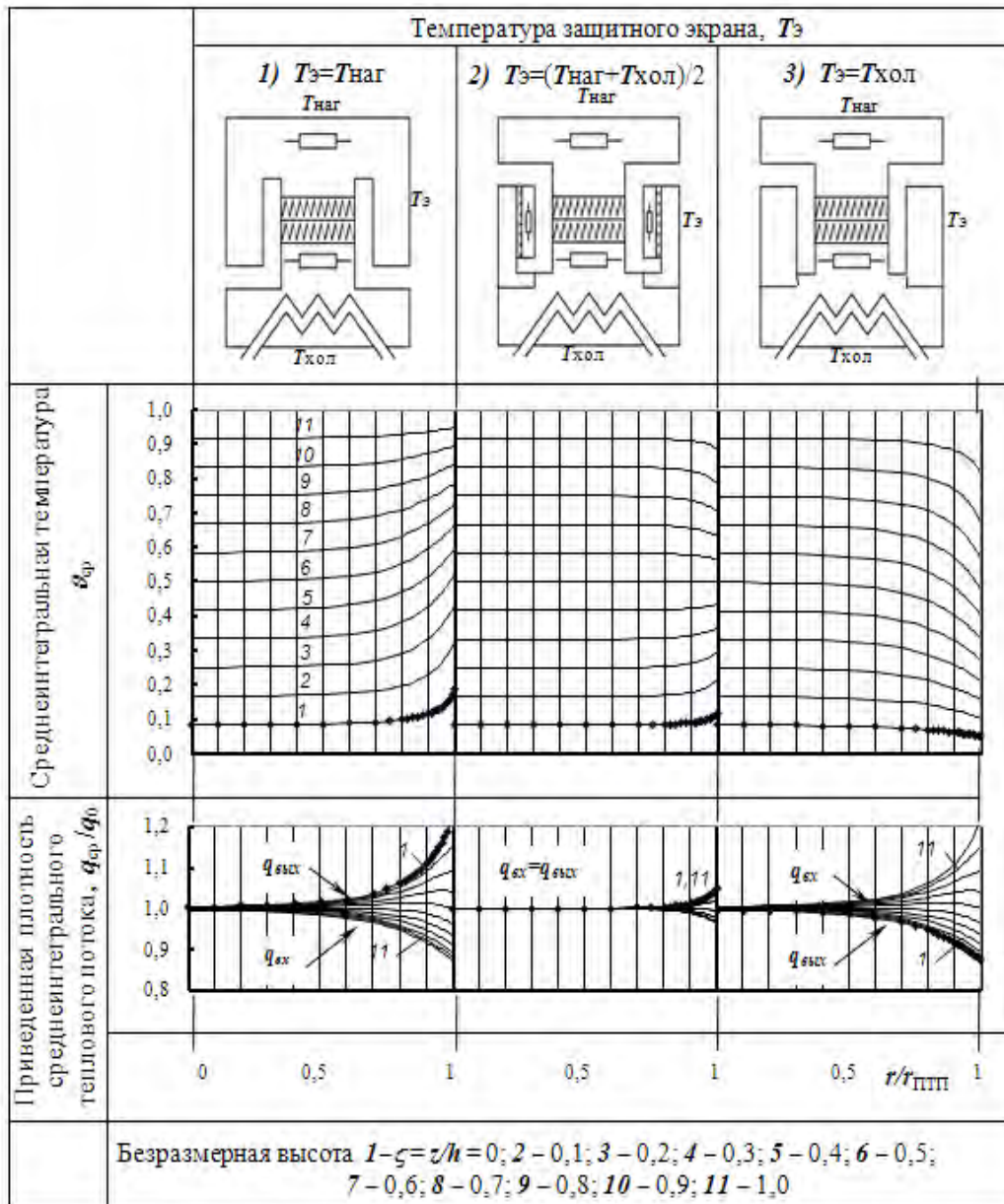


Табл. 3. Характер искажений среднеинтегральной температуры и приведенной плотности среднего интегрального теплового потока для трех различных вариантов задания температуры защитного экрана в зависимости от относительного текущего радиуса при вариации безразмерной высоты термостолбика



водности в безразмерном виде (4).

Тепловая модель для данной задачи приведена на рисунке 3.

В данном случае безразмерная температура  $\vartheta(\zeta, \rho) = (T(z, r) - T_{\text{ПТП}}) / T_{\text{ПТП}}$ , при этом граничное условие на верхнем торце ПТП следующее:

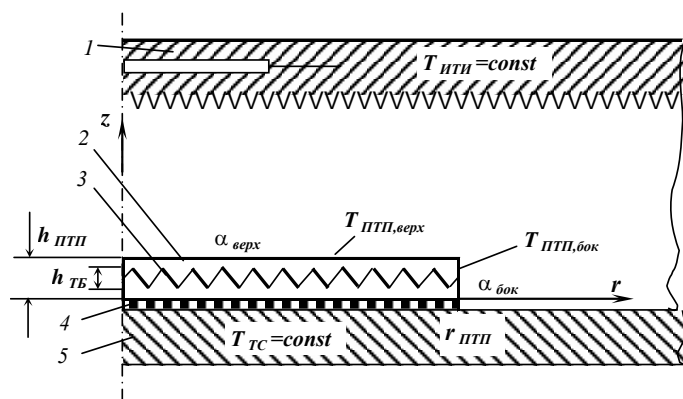
$$\partial\vartheta(\zeta, \rho) / \partial\zeta + \text{Vi}_{\text{верх}} \cdot \vartheta(\zeta, \rho) = 0 \quad \text{при } \zeta = 1, \quad (17)$$

а на нижнем:

$$1/H \cdot \partial\vartheta(\zeta, \rho) / \partial\zeta = \vartheta(\zeta, \rho) + \vartheta_2, \quad \text{при } \zeta = 0, \quad (18)$$

где  $\text{Vi}_{\text{верх}} = \alpha_{\text{верх}} \cdot h_{\text{ПТП}} / \lambda_{\text{ПТП}}$ ,  $\vartheta_2 = (T_{\text{ТС}} - T_{\text{ПТП}}) / T_{\text{ПТП}} = -1$  (при допущении, что  $T_{\text{ТС}} = 0$  и  $R_{\text{К}} = 0$ ).

Решение для функции температуры в безразмерной форме, также как и при кондуктив-



**Рис. 3. Принципиальная схема радиационного компарирования: 1 – ИТИ (АЧТ), 2 – ПТП, 3 – термобатарея, 4 – слой контактного теплового сопротивления  $R_k$ , 5 – тепlostок.**

ном теплообмене, имеет вид (6), однако, множители в случае радиационного теплообмена находят следующим образом:

$$K_t = 0,5 \cdot \chi \cdot \text{Bi}_{\text{верх}},$$

$$A_n = 2\text{Bi}_{\text{верх}} / (v_n J_0(v_n) (\text{Bi}_{\text{верх}}^2 + v_n^2)),$$

$$S_n(\zeta) = [B_n(\zeta) + C_n(\zeta)] / Z_n(M), \quad (19)$$

$$\text{при } B_n(\zeta) = \mathfrak{I}_1(\text{sh}(v_n M \zeta) + D_{n,2} \text{ch}(v_n M \zeta)), \quad C_n(\zeta) =$$

$$= \mathfrak{I}_2(\text{sh}(v_n M (1 - \zeta)) + D_{n,1} \text{ch}(v_n M (1 - \zeta))), \quad Z_n(M) =$$

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

$$D_{n,1} = v_n \cdot \lambda_{\text{ПТП}} / (\alpha_{\text{верх}} \cdot r_{\text{ПТП}}), \quad D_{n,2} = v_n \cdot \lambda_{\text{ПТП}} \cdot R_k / r_{\text{ПТП}}$$

$$M = h_{\text{ПТП}} / r_{\text{ПТП}}$$

Соответственно и производная от безразмерной температуры имеет вид (8) с тем лишь отличием, что здесь

$$K_q = \text{Bi}_{\text{верх}}. \quad (20)$$

Отношение плотности среднеинтегрального теплового потока к плотности теплового потока в отсутствие теплообмена на боковой поверхности, т. е. приведенная плотность среднеинтегрального теплового потока, определяется следующим выражением:

$$q_{\text{cp}}(z, r) / q_0 = q_{\text{cp}}(\zeta, \rho) \cdot (1 + 1/\text{Bi}_{\text{верх}} + R_{T2} / R_{\text{ПТП}}), \quad (21)$$

где  $q_{\text{cp}}(\zeta, \rho)$  определяется по формуле (11) с учетом (19) и (20).

Вычислительный эксперимент по формуле (21) выполнен для ПТП, толщина которого  $h_{\text{ПТП}} = 2$  мм и коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{ПТП}} = 1,5$  Вт/(м·К); значения геометрического параметра ПТП  $D_{\text{ПТП}}/h_{\text{ПТП}} = 40, 30, 20$  и  $10$ , которым при данной фиксированной толщине  $h_{\text{ПТП}}$  соответствуют радиусы ПТП  $r_{\text{ПТП}} = 40, 30, 20$  и  $10$  мм; значения контактного теплового сопротивления взяты равными  $R_k = 0; 0,0005; 0,001; 0,002$  и  $0,003$  м<sup>2</sup>·К/Вт; температуры обеих рассматриваемых поверхностей ПТП равны:  $T_{\text{ПТП,верх}} = T_{\text{ПТП,бок}} = 300$  К. Отношение высоты полости к ее радиусу принято равным  $2,25$ .

Результаты расчета представлены на графиках таблицы 4.

Полученные результаты однозначно подтверждают, что минимальные размеры эталонного ПТП должны быть определены из условия:  $D_{\text{ПТП}}/h_{\text{ПТП}} = 30$ , а геометрический параметр чувствительного элемента – не более  $20$ .

Критерий степени распространения искажения среднеинтегрального теплового потока с учетом глубины заделки термобатареи в теле ПТП при радиационном компарировании определяется выражением:

$$q_{\text{cp}}/q_0 = \Delta\mathfrak{I} (1 + 1/\text{Bi}_{\text{верх}} + R_{T2}/R_{\text{ПТП}}) / (h_{\text{ТБ}}/h_{\text{ПТП}}), \quad (22)$$

$$\text{где } \Delta\mathfrak{I} = \mathfrak{I}_1 - \mathfrak{I}_2.$$

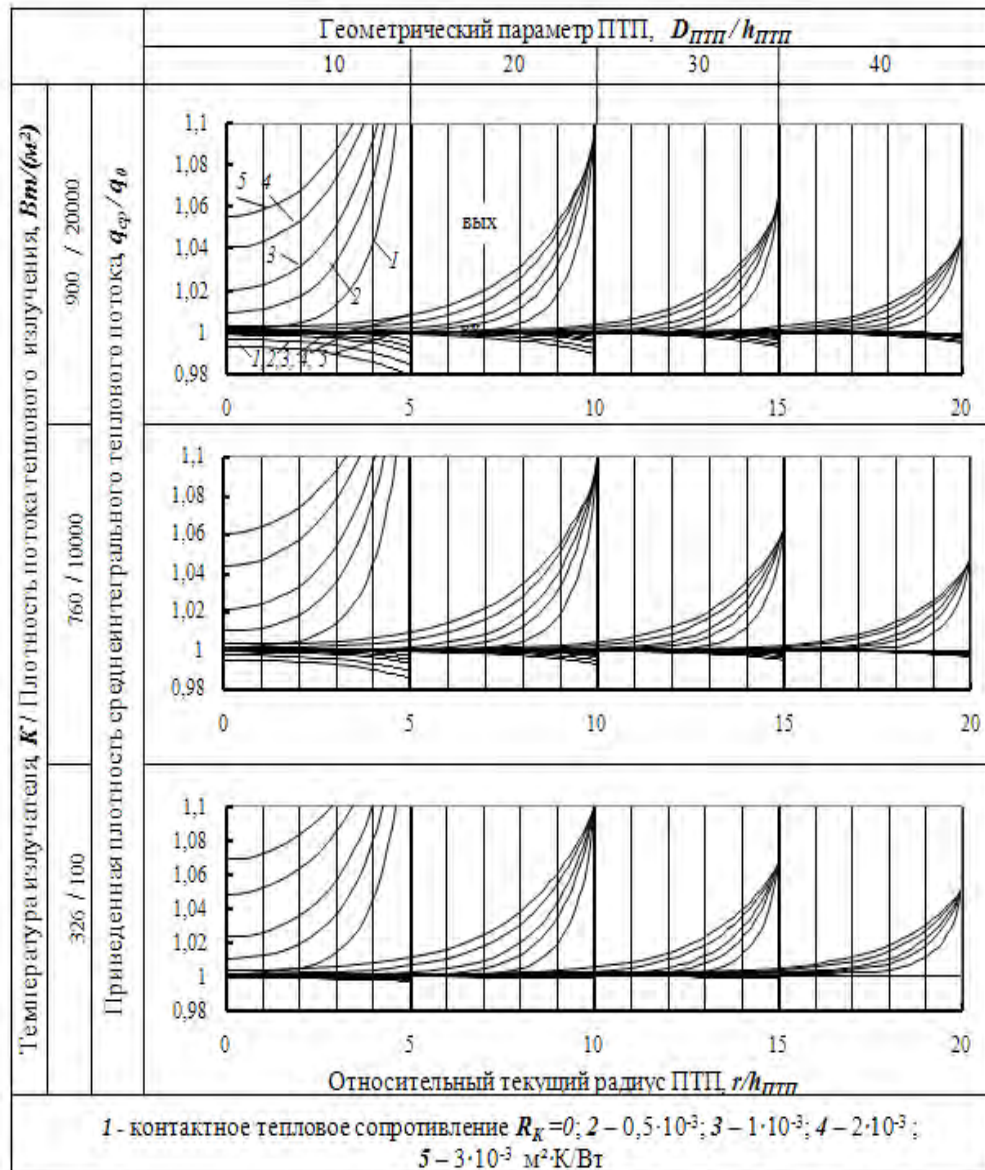
Результаты расчетов приведенных плотностей среднеинтегрального теплового потока по формуле (22) для значения относительной высоты  $h_{\text{ТБ}}/h_{\text{ПТП}} = 0,8$  представлены на графиках таблицы 5.

### Выводы

Полученные результаты исследования степени влияния различных факторов на одномерность поля теплового потока в теле ПТП позволяют аргументировано принять практические меры по предотвращению возможных его искажений в зоне расположения чувствительного элемента. Так, для обеспечения одномерности теплового потока внутри ПТП он должен быть выполнен с равномерным тепловым сопротив-



Табл. 4. Распределение приведенной плотности среднеинтегрального теплового потока на входе в ПТП и выходе из него в зависимости от относительного текущего радиуса при вариации геометрического параметра ПТП, температуры излучателя и контактного теплового сопротивления



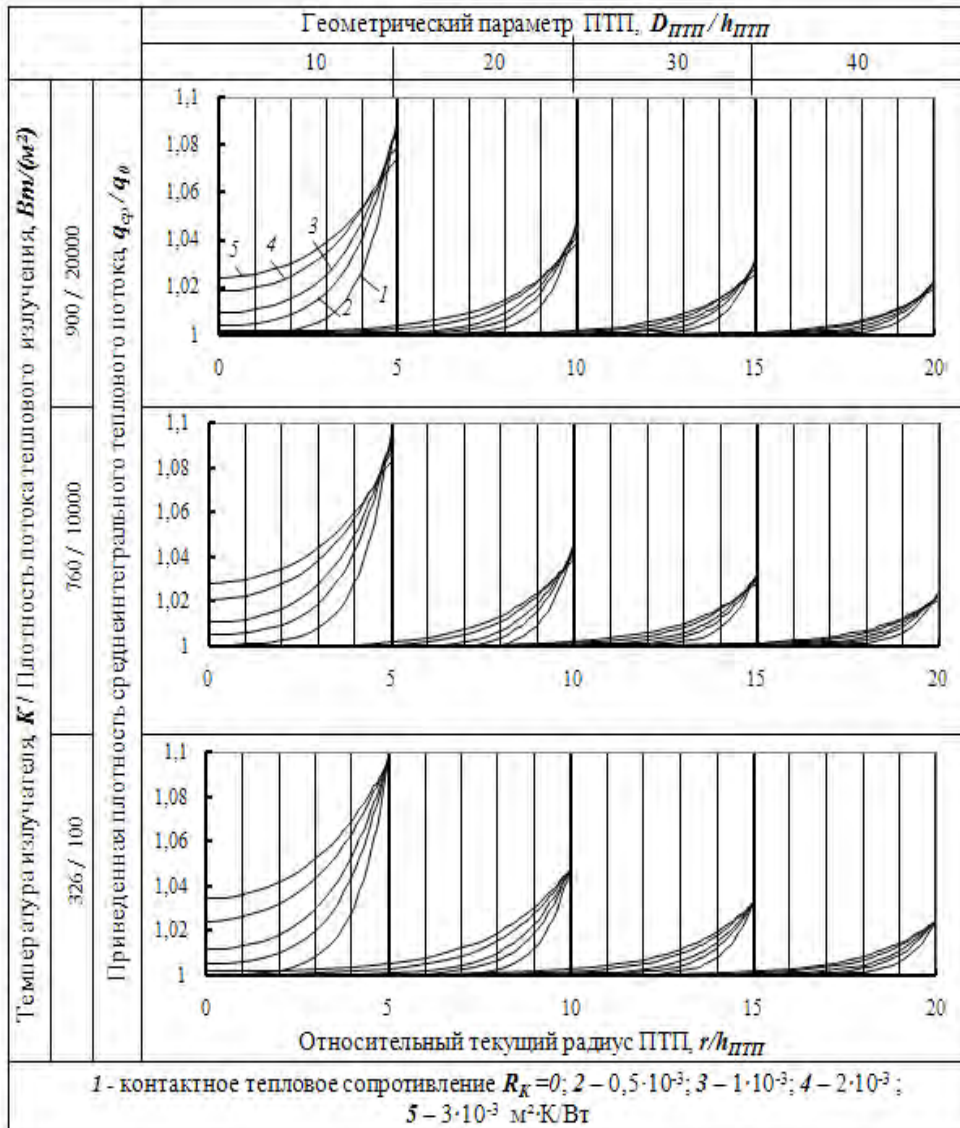
лением. Это требование может быть удовлетворено путем изготовления ПТП с охранной зоной вокруг чувствительного элемента. При этом охранная зона должна иметь одинаковое с чувствительным элементом ПТП тепловое сопротивление. Ширина охранной зоны должна выбираться исходя из наиболее неблагоприятных условий работы эталонных ПТП, которые наблюдаются при радиационном компарировании вследствие теплопритоков через боковую

поверхность, причем искажения теплового поля в данном случае распространяются от боковой кромки ПТП на глубину, равную пяти толщинам ПТП.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ДСТУ 4035-2001. Энергозбереження. Будівлі та споруди. Методи вимірювання поверхневої густини теплових потоків та визначення коефіцієнтів теплообміну між огороджу-

Табл. 5. Распределение приведенной плотности среднеинтегрального теплового потока на выходе из ПТП в зависимости от относительного текущего радиуса и геометрического параметра ПТП, температуры излучателя и контактного теплового сопротивления при относительной высоте термобатарей



вальними конструкціями та доквіллям. – Київ: Держстандарт України, 2001. – 44 с.

2. ДСТУ Б В.2.6-101:2010. Конструкції будинків і споруд. Метод визначення опору теплопередач огорожувальних конструкцій. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. – 53 с.

3. ДСТУ Б В.2.6-17-2000 (ГОСТ 26602.1-99) Блоки віконні та дверні. Методи визначення опору теплопередачі. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2000. – 25 с.

4. ДСТУ Б В.2.7-105-2000 (ГОСТ 7076-99). Матеріали і вироби будівельні. Метод визначення теплопровідності і термічного опору при стаціонарному тепловому режимі. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2001. – 21 с.

5. ДСТУ Б В.2.7-228:2010. Будівельні матеріали. Скło з низькоемісійним м'яким покриттям. Технічні умови (ГОСТ 31364-2007, MOD). – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 68 с.

6. ДСТУ ISO 8301:2007 Теплоізоляція. Виз-

начення теплового опору та відповідних характеристик в стаціонарному режимі. Вимірювачі теплового потоку. (ISO 8301:1991, IDT). – Київ: Держстандарт України, 2011. – 40 с.

7. *ДСТУ-П CEN/TS 1159-4:2010* Кераміка технічна спеціальна Теплофізичні характеристики керамічних композиційних матеріалів. Ч.4 Визначення коефіцієнта теплопровідності. (CEN/TS 1159-4:2004, IDT). – Київ: Держстандарт України, 2012. – 10 с.

8. *ДСТУ ISO 9869:2007* Теплоізоляція. Будівельні елементи. Натурні вимірювання теплового опору та коефіцієнта теплопередавання (ISO 9869:1994, IDT). – Київ: Мінрегіонбуд України, 2007. – 46 с.

9. *ДСТУ 3756-98* Енергозбереження. Перетворювачі теплового потоку термоелектричні загального призначення. Загальні технічні умови. – Київ: Держстандарт України, 2000. – 21 с.

10. *Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Сало В.П., Лануй А.В.* Аппаратура для метрологической аттестации первичных преобразователей теплового потока // Сб. науч. тр. «Теплометрия и теплосбережение», – Киев, 1991, с. 64-69.

11. *Визначення теплових потоків* крізь огорожувальні конструкції. Определение тепловых потоков через ограждающие конструкции) / Розробники: Грищенко Т.Г. [та інш.] // Методика М 00013184.5.023-01 – Нормативний документ Комітету з будівництва та архітектури України. – Київ: ЛОГОС, 2002. – 131 с.

12. *Декуша Л.В., Грищенко Т.Г., Менделеева Т.В.* Особенности радиационного компарирования для передачи единицы плотности теплового потока // Міжвідомчий наук.-техн. збірник «Вимірювальна техніка та метрологія». Вип. 66. – Львів. «Львівська політехніка», 2006. – С. 64 – 75.

13. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.

14. *Грищенко Т.Г.* Теплометрический экспресс-метод и прибор для определения коэффициента теплопроводности: дис.... канд.техн. наук / Грищенко Татьяна Георгиевна. – Киев, 1977. – 198 с.

15. *Декуша Л.В., Грищенко Т.Г., Менделеева Т.В.* Воспроизведение единицы плотности теплового потока кондуктивным методом // Вестник Тамбовского гос. технич. университета. Спец. выпуск “Методы и приборы контроля процессов, состава и свойств веществ”. – Тамбов: ТГТУ, 2002. –Т.8. – №1. – С.148-156.

16. *F. van der Graaf.* Heat-flux Sensor // Chapter 8 of Volume 4 Thermal Sensors. VCH Verlagsgesellschaft mbh. P.O.Box 1011611, D-6940 Weinheim, FRG. – 1990. – 28 с.

17. *Standeart P.* Numerical Analysis of Operational Errors with Surface-mounted Heat Flux Sensors. Report of Research by the Direction of Prime Minister’s Services. – Policy of Science National Program of Energy. – Belgium, 1987.

*Получено 12.07.2012 г.*