

УДК 536.6

Шмаров Е.В., Декуша Л.В., Воробьев Л.И., Грищенко Т.Г.

Институт технической теплофизики НАН Украины

КОНСТРУИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА
НА БАЗЕ КОНСТАНТАН-НИКЕЛЕВЫХ И КОПЕЛЬ-НИКЕЛЕВЫХ
ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ

Дослідженні температурні залежності характеристик різних перетворювачів теплового потоку, показані переваги константан-нікелевих та копель-нікелевих пар для біметалічного ПТП.

Исследованы температурные зависимости характеристик различных преобразователей теплового потока, показаны преимущества константан-никелевых и копель-никелевых пар для биметаллического ПТП.

The temperature dependence of characteristics of various the heat flow transducers are researched, the advantages of constantan-nickel and kopel-nickel steam for bimetallic HFT are shown.

A – площадь ПТП;
 d – диаметр;
 E – напряжение;
 f – площадь сечения;
 h – высота термоэлемента;
 I – сила тока;
 i – плотность тока;
 k – электрохимический эквивалент;
 $L_{\text{бт}}$ – длина батареи термоэлементов;
 n – плотность заполнения термоэлементами ПТП;
 p – шаг навивки;
 q – плотность теплового потока;
 S – чувствительность;
 t – шаг укладки;
 Z – общее число термоэлементов;
 K – коэффициент преобразования;

Φ – формпараметр ПТП;
 $V_{\text{т}}$ – выход по току;
 α – коэффициент Зеебека;
 γ – плотность;
 Δ – толщина;
 δ – относительная погрешность;
 λ – коэффициент теплопроводности;
 ρ – удельное электрическое сопротивление.

Индексы нижние:

1 – основной термоэлектрод;
2 – парный термоэлектрод;
3 – электроизоляционный компаунд;
opt – оптимальное значение;
max – максимальное значение;
min – минимальное значение.

Измерение теплового потока наряду с измерением температуры является одним из наиболее востребованных в науке и промышленности. Причем возрастает не только количество и номенклатура применяемых средств измерения, но и неуклонно возрастают требования к точности измерений. Наиболее широко распространенным средством измерения теплового потока или его поверхностной плотности являются термоэлектрические преобразователи теплового потока (ПТП) вида вспомогательной стенки [1, 2].

ПТП этого типа конструктивно выполнены в виде стенки, плоской или цилиндрической,

состоящей из термоэлемента или определенного количества идентичных термоэлементов, соединенных последовательно по генерируемому электрическому сигналу и параллельно по определяемому тепловому потоку и залитых электроизоляционным компаундом. Выходным сигналом ПТП является термоэлектродвижущая сила (ТЭДС), генерируемая им при прохождении теплового потока.

Многоэлементный термоэлектрический биметаллический ПТП согласно ДСТУ 3756 [2] является первичным преобразователем, теплочувствительная зона которого представляет собой батарею термоэлементов, выполненную

из плоской лентовидной спирали (см. рис. 1), изготовленной из основной термоэлектродной проволоки 1, навитой на каркасную ленту из электроизоляционного материала 2 (например, полиимидной пленки), с периодически нанесенным электролитическим покрытием 3 иного термоэлектродного материала. При этом границы перехода 4 от основного термоэлектрода к покрытым участкам выполняют роль спаев термоэлементов. Готовый ПТП, как правило, имеет форму плоского диска или прямоугольной (квадратной) пластины.

Применяемые материалы для основной термоэлектродной проволоки и парного термоэлектродного материала весьма разнообразны [3], но апробированными и хорошо зарекомендовавшими являются следующие пары: константан-медь, копель-медь, копель-серебро, нихром-никель, хромель-никель.

Применение же такого сочетания, как константан-никель и копель-никель, является пародаксальным в отличие от упомянутых сочетаний нихром-никель и хромель-никель, поскольку константан, копель и никель имеют одинаковые знаки их коэффициента Зеебека относительно платины, а значение коэффициента при комнатной температуре в два раза ниже, чем у пар константан-медь и копель-

медь. Однако, использование никеля в качестве парного термоэлектродного материала к константану и копелю имеет ряд преимуществ: во-первых, никель легко гальванически осаждается на проволоку из константана и копеля, а, во-вторых, никелевое покрытие является более коррозионно стойким в широком температурном диапазоне, в то время, как медное уже при 400 К начинает активно окисляться.

Для применения в биметаллических ПТП гальванических пар константан-никель, копель-никель, нихром-никель и хромель-никель экспериментально были установлены температурные зависимости их термочувствительности. При этом каждая гальваническая пара представляла собой свитые между собой пары проволок из основного и парного термоэлектродных материалов: константана, копеля, нихрома и хромеля с никелем. Рабочий спай гальванических пар помещали в цилиндр, выполненный из нержавеющей стали и заполненный песком, что обеспечило равномерное температурное поле и исключило электрический контакт спая с корпусом цилиндра. Измерения проведены с применением компьютеризированного комплекса «Ресурс-96», от которого измерительная информация посредством USB-интерфейса передается на персональный ком-

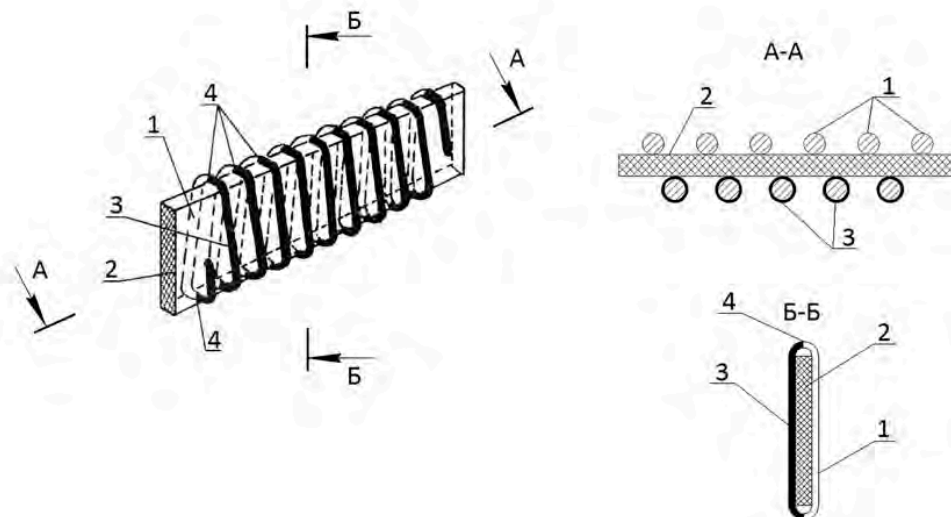


Рис. 1. Принципиальная схема батареи гальванических термоэлементов:
 1 – участок основной термоэлектродной проволоки; 2 – каркас из полиимидной ленты;
 3 – участок с гальванически нанесенным покрытием; 4 – спаи термоэлементов.

пьютер. Результаты измерений систематизированы на рис. 2. При этом установлено, что стабильной температурной зависимостью коэффициента Зеебека в диапазоне температуры (300...500) К обладают пары константан-никель и копель-никель (см. рис. 2, а – поз. 3 и б – поз. 3). Эти графики соответствуют отношению значений площади сечения гальванического покрытия и основного термоэлектродного материала равному 0,67.

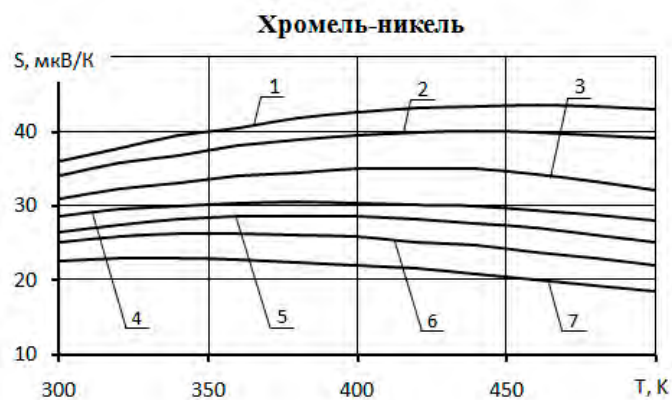
Еще одной важной характеристикой, учитываемой при конструировании ПТП, является теплопроводность заливочного электроизоляционного материала, в качестве которого могут быть использованы эпоксидные компа-

унды. Варьированием различными наполнителями эпоксидной смолы и их концентрацией обеспечивают достаточно широкий диапазон значений коэффициента теплопроводности ПТП. На рис. 3 представлены, полученные в эксперименте и рассчитанные по методикам В.И. Оделевского и Г.Н. Дульнева [4] температурные зависимости теплопроводности λ_3 заливочного компаунда ПТП на основе смолы марки УП-610 с наполнителем из порошкообразного корунда при объемной концентрации $m = 0,5$.

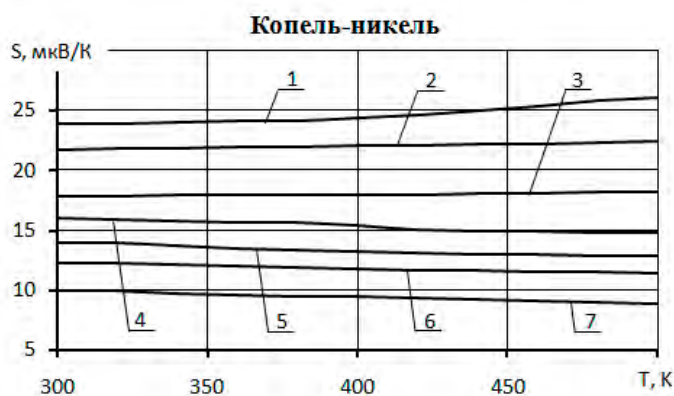
Иной характер температурной зависимости коэффициента теплопроводности указанного компаунда по сравнению с данными, рас-



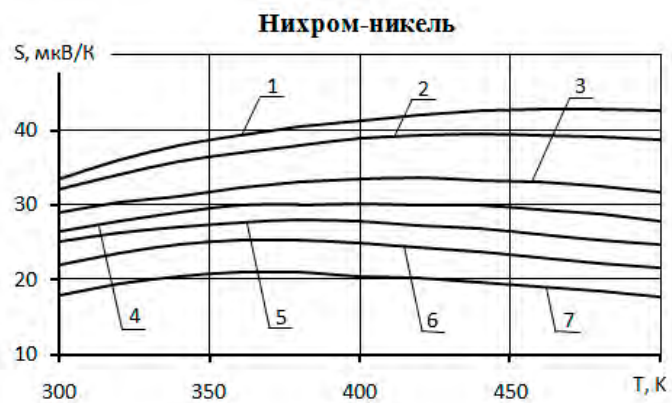
а) 1 – 0,559; 2 – 0,605; 3 – 0,674; 4 – 0,722;
5 – 0,758; 6 – 0,785; 7 – 0,825.



в) 1 – 0,541; 2 – 0,576; 3 – 0,632; 4 – 0,675;
5 – 0,708; 6 – 0,736; 7 – 0,778.

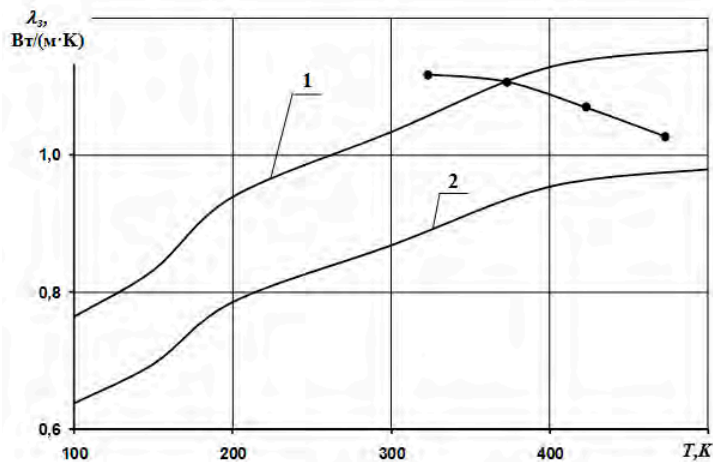


б) 1 – 0,557; 2 – 0,602; 3 – 0,669; 4 – 0,717;
5 – 0,753; 6 – 0,780; 7 – 0,820.



г) 1 – 0,529; 2 – 0,555; 3 – 0,599; 4 – 0,636;
5 – 0,666; 6 – 0,691; 7 – 0,732.

Рис. 2. Температурные зависимости чувствительности $S = f(T)$ различных пар термоэлементов.



**Рис. 3. Коэффициент теплопроводности заливочного компаунда (смола УП-610 с корундовым наполнителем) при объемной концентрации $t = 0,5$:
 ● – экспериментальные данные,
 1 – расчетные данные по методике В.И. Оделевского, 2 – расчетные данные по методике Г.Н. Дульнева.**

считанными по методикам В.И. Оделевского и Г.Н. Дульнева [4], по-видимому, можно объяснить наличием контактов между частицами наполнителя и преобладающим влиянием его более высокого, но существенно уменьшающегося коэффициента теплопроводности при возрастании температуры на эффективную теплопроводность компаунда.

Для прогнозных расчетов параметров ПТП существуют соотношения, связывающие требуемые выходные характеристики (габариты и чувствительность), исходные параметры батареи термоэлементов (диаметр основной проволоки d_1 , оптимальная толщина гальванического покрытия Δ_{opt} , плотность заполнения ПТП термоэлементами n и свойства: коэффициенты теплопроводности λ_1 и λ_2 , удельное электрическое сопротивление ρ_1 и ρ_2 материалов термоэлемента и теплопроводность заливочного компаунда λ_3 [1, 3, 5]. Такими соотношениями являются [6]:

– формула чувствительности к поверхностной плотности теплового потока, в $В \cdot м^2/Вт$:

$$S = E/q = \frac{\alpha_{1-2} \cdot A \cdot h}{\lambda_1 (1 + \rho_{21} / f_{21}) f_1} \times (2 + \lambda_{21} f_{21} + \lambda_{31} (\Phi - 2 - f_{21}))^{-1}; \quad (1)$$

– формула чувствительности к тепловому потоку (чувствительности к плотности теплового потока, отнесенной к единицы площади ПТП), в $В/Вт$:

$$S_A = E/(q \cdot A) = S/A; \quad (2)$$

(в калориметрии эту чувствительность называют вольт-ваттной);

– формула приведенной чувствительности (чувствительности к плотности теплового потока, отнесенной к единице объема ПТП), в $В/(Вт \cdot м)$:

$$S_V = S/(h \cdot A). \quad (3)$$

Для формпараметра ПТП справедливы следующие соотношения:

$$\Phi = 2 + f_{21} + f_{31} = A/(Zf_1) = 1/(nf_1). \quad (4)$$

С целью получения максимальной чувствительности к измеряемой величине проводится оптимизация параметров преобразователей, которая для биметаллического ПТП может быть обеспечена при оптимальном значении отношения $(f_{21})_{opt}$, рассчитываемом по формуле:

$$(f_{21})_{opt} = \left(\frac{\rho_{21}}{\lambda_{21} - \lambda_{31}} (2 + (\Phi - 2) \cdot \lambda_{31}) \right)^{0,5}. \quad (5)$$

На рис. 4 представлены графики температурных зависимостей оптимального отношения площадей сечений $(f_{21})_{opt}$, рассчитанные по формуле (5) при следующей вариации формпараметра: $\Phi = 10; 25; 50; 75; 100; 250; 500; 1000$ для различных пар термоэлектродов (а – константан-никель, б – копель-никель, в – хромель-никель, г – нихром-никель), изготовленных с использованием исследованного заливочного компаунда с корундовым наполнителем.

Коэффициент преобразования ПТП, $K_{ПТП}$ является величиной, обратной чувствительности: $K_{ПТП} = 1/S$. Он на практике является

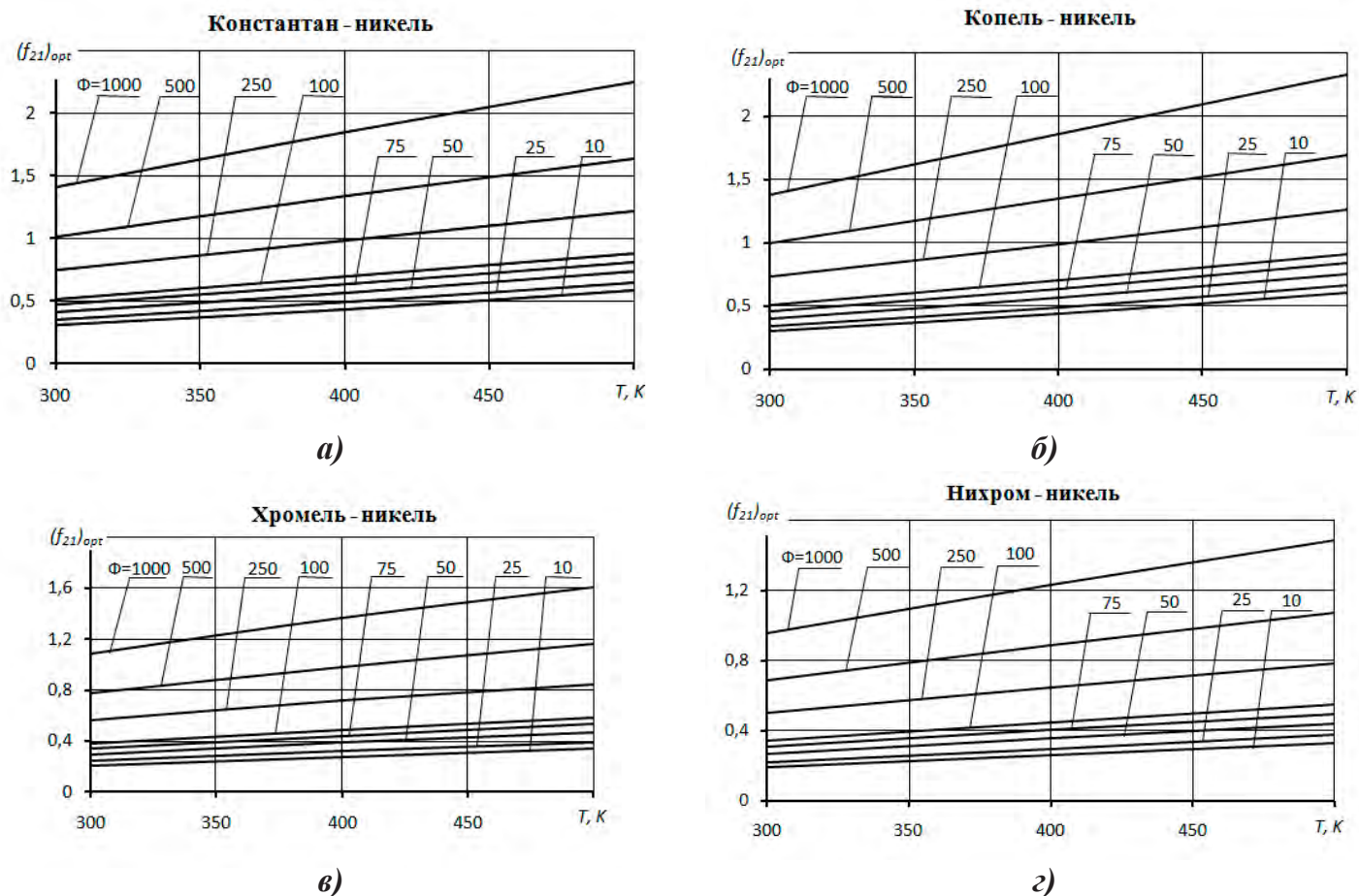


Рис. 4. Температурные зависимости оптимального отношения $(f_{21})_{opt} = f(T)$ для различных пар термоэлементов.

более применимой характеристикой ПТП и связан с приведенной чувствительностью следующим соотношением:

$$K_{ПТП} = (S_V \cdot h \cdot A)^{-1}. \quad (6)$$

При проектировании ПТП необходимо исходить из требований, формулируемых с учетом условий эксплуатации, чувствительности применяемой регистрирующей аппаратуры, диапазона изменения измеряемой плотности теплового потока и допустимых размеров ПТП. К таким требованиям для различных практических ситуаций могут быть отнесены ограничения, установленные на:

I – максимальную плотность измеряемого теплового потока q_{max} и предел регистрирующего прибора $E_{П}$;

II – минимальную плотность измеряемого по-

тока q_{min} , разрешающую способность регистрирующего прибора $\Delta E_{П}$ и допускаемую погрешность измерения плотности теплового потока δ_q .

В первом случае искомое значение коэффициента преобразования, определяемое по формуле:

$$K_I = q_{max} / E_{П}. \quad (7)$$

является минимальным допустимым значением коэффициента преобразования для проектируемого ПТП.

Во втором случае при проектировании определяют максимальное допустимое значение коэффициента преобразования, при котором ПТП обеспечит измерение минимального теплового потока с заданной точностью. Расчетная формула в этом случае имеет вид:

$$K_{II} = q_{\min} \cdot \delta_E / \Delta E_{II} \quad (8)$$

где δ_E – допускаемая относительная погрешность измерения сигнала ПТП регистрирующим прибором, обеспечивающая измерение максимального теплового потока с заданной точностью.

При проектировании батарейного термоэлектрического биметаллического ПТП с требуемыми размерами h и A , и определенным

по формуле (7) или (8) значением коэффициента преобразования $K_{ПТП}$ все технологические параметры ПТП: d_1 , n , λ_3 и f_{21} легко находятся с помощью номограммы. Номограмма представлена на рис. 5 для термоэлектродной пары константан-никель.

Порядок работы с номограммой следующий: рассчитав предварительно коэффициент преобразования $K_{ПТП}$ и опускаясь вниз по вертикали, выбираем высоту спирали h ,

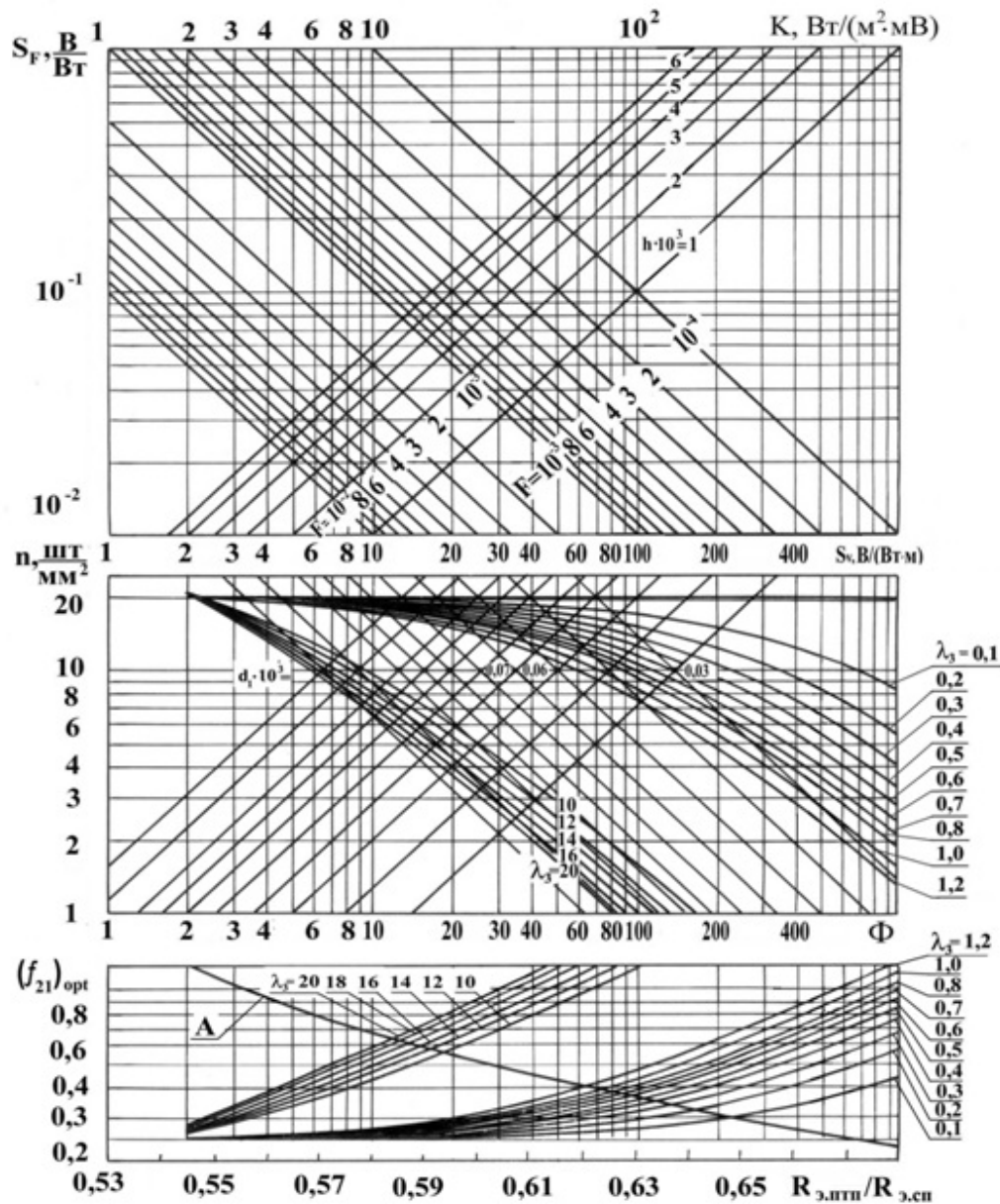


Рис. 5. Обобщенная номограмма для проектирования константан-никелевых ПТП: А – график соответствия значений $r = R_{э.ПТП} / R_{э.сп}$ и $(f_{21})_{opt}$

затем на этой горизонтали выбираем необходимую площадь ПТП A . Далее опускаясь по вертикали вниз, находим диаметр основной термоэлектродной проволоки d_1 . Затем выбираем коэффициент теплопроводности заливочного компаунда λ_3 и, соответственно, на оси ординат плотность заполнения ПТП термоэлементами n . Плотность заполнения n и диаметр d_1 основного термоэлектрода являются исходными величинами для определения таких технологических параметров как плотность навивки n_1 и шаг укладки спирали t при формовании ПТП, которые связаны между собой соотношением $n = n_1/t$.

Максимальная плотность навивки n_{1max} проволоки установленного диаметра определяется максимальным шагом навивки $p(n_1 = 1/p)$, который нежелательно выбирать меньше $1,5 \cdot d_1$ во избежание замыкания соседних витков спирали:

$$n_{1max} = 1/(1,5 \cdot d_1). \quad (9)$$

Пересечение с осью абсцисс даст значение формпараметра Φ . Следующим шагом является определение оптимального значения относительной площади сечения $(f_{21})_{opt}$. По вертикали опускаемся до графика с ранее определенным коэффициентом λ_3 и по оси ординат находим соответствующее значение $(f_{21})_{opt}$. После этого можно рассчитать значение оптимальной толщины покрытия по формуле (10) и параметры электролиза для его нанесения (силу тока и продолжительность) по формулам (11) и (12):

$$\Delta_{opt} = 0,5d_1(\sqrt{1 + (f_{21})_{opt}} - 1), \quad (10)$$

$$I = \pi id_p L_{от} h, \quad (11)$$

$$\tau = \frac{\gamma(d_1 \Delta_{opt} + \Delta_{opt}^2)}{k I B_T}. \quad (12)$$

В настоящее время ПТП на основе термоэлектродных пар константан-никель и копель-никель широко применяются в теплофизическом приборостроении, научных исследованиях и т.д. На рис. 6 приведены эксперимен-

тальные зависимости коэффициента преобразования в диапазоне температур (300...500) К для следующих типов ПТП: 1, 2 – эталонные на базе копель-никелевых термоэлементов; 3, 4 – ПТП с парой термоэлементов константан-никель, используемые в космических исследованиях, а именно, в системах измерения для ракет-носителей «Днепр» и «Днепр-Восток».

По результатам исследований установлено, что значения коэффициента преобразования каждого ПТП в диапазоне температуры от 300 К до 500 К отличаются от среднеарифметического по диапазону не более, чем на 3 %.

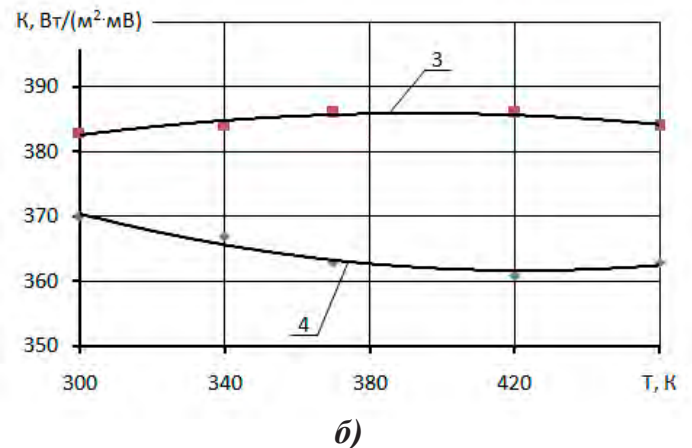
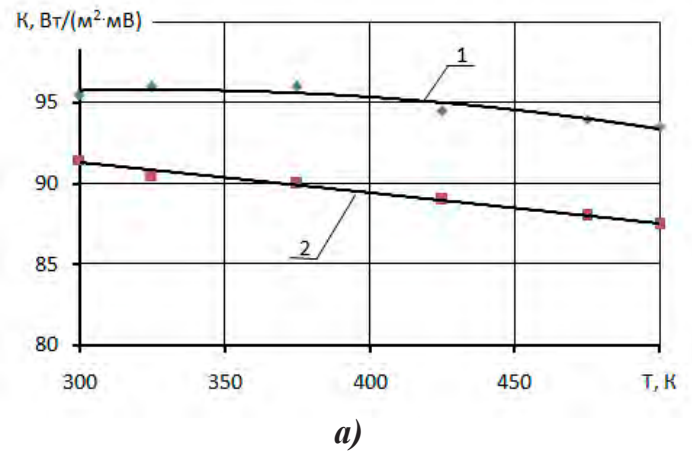


Рис. 6. Температурная зависимость коэффициентов преобразования ПТП на базе копель-никелевых (а) и константан-никелевых (б) термоэлементов: 1, 2 – эталонные ПТП; 3, 4 – ПТП для космических исследований.

Выводы

По результатам экспериментального исследования температурной зависимости чувствительности различных пар термоэлементов, из которых изготавливают многоэлементные биметаллические термоэлектрические ПТП вида вспомогательной стенки, показаны преимущества перед традиционно применяемыми парами хромель-никель, нихром-никель нетрадиционных пар термоэлементов константан-никель, копель-никель, которые в широком температурном диапазоне обладают стабильной индивидуальной статической функцией преобразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Геращенко О.А.* Основы теплотрии. – Киев: Наукова думка, 1971. – 192 с.
2. *ДСТУ 3756-98 (ГОСТ 30619-98)* Енергозбереження. Перетворювачі теплового потоку термоелектричні загального призначення. Загальні технічні умови.

3. *Декуша Л.В.* Теплотрические измерительные преобразователи для исследования сложного теплообмена. – Диссертация на соискание ученой степени канд. тех. наук, Киев, 1990. – 311 с.

4. *Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П.* Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Справочная книга. – Л: Энергия, 1974. – 264 с.

5. *Грищенко Т.Г.* Теплотрический экспресс-метод определения коэффициента теплопроводности неметаллических материалов – Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук, Киев, 1977. – 198 с.

6. *Геращенко О.А., Грищенко Т.Г., Декуша Л.В.* Методика конструирования оптимальных преобразователей теплового потока // Проблемы энергосбережения. – 1990. – № 3. – С. 36-42.

Получено 29.09.2011 г.