

УДК 536.6

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

Институт технической теплофизики НАН Украины

БИСПИРАЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

Дослідженні чутливості різних термоелектронних пар в широкому температурному діапазоні. Створено новий тип перетворювача теплового потоку, в якому передбачена компенсація температурної залежності чутливості.

Исследованы чувствительности различных термоэлектродных пар в широком температурном диапазоне. Разработан новый тип преобразователя теплового потока, в котором предусмотрена компенсация температурной зависимости чувствительности.

Sensivities of different thermoelectrode couples have been researched in broad temperature range. A new type of heat flow transducer having compensation of sensitivity temperature dependence has been developed.

E – напряжение, В;
 f – площадь сечения, м²;
 h – высота спирали, м;
 q – плотность теплового потока, Вт/м²;
 R – тепловое сопротивление, м²·К/Вт;
 S – чувствительность, мкВ/К;
 T – температура, К;
 z – количество термоэлементов, шт;
 α – коэффициент Зеебека, мкВ/К;

ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом/м.

Индексы нижние:

1 – основной термоэлектрод первой термобатареи;
 2 – основной термоэлектрод второй термобатареи;
 3 – парный термоэлектродный материал;
 Σ – суммарное значение;
 opt – оптимизированное значение.

В настоящее время измерения теплового потока или его поверхностной плотности характеризуются широкими диапазонами параметров исследуемого объекта, в частности, температуры, влиянием изменения которого на чувствительность первичного измерительного преобразователя во многих случаях нельзя пренебрегать.

Широкое распространение для измерения плотности теплового потока получил метод вспомогательной стенки, основанный на явлении теплопереноса в теле теплопроводностью, описываемого законом Фурье [1-4]. Материальная реализация метода осуществляется через первичный измерительный преобразователь теплового потока (далее – ПТП), который в измерительной цепи является первым элементом, подверженным воздействию теплового потока и преобразующим его в иную физическую величину, удобную для прямого измерения и дальнейших преобразований.

В первичных ПТП вида вспомогательной стенки присутствуют два обязательных элемента: собственно "вспомогательная стенка"

и измеритель разности температуры, возникающей на ее гранях при прохождении теплового потока. Наиболее удобными для измерения разности температуры оказались дифференциальные термопары, одиночные или многоэлементные. В связи с этим ПТП бывают одно- и многоэлементные [1, 2, 5]. Достоинством одноэлементных ПТП является принципиальная возможность использования любой пары термоэлектрических материалов, но при этом трудно обеспечить требуемую чувствительность. Существенное повышение чувствительности ПТП к измеряемому тепловому потоку и возможность оптимизации его характеристик обеспечивается, как правило, изготовлением многоэлементных ПТП (галетных, сеточных, спиральных, модульных [1, 2, 5 – 8]).

В настоящее время наибольшее признание получили металлические многоэлементные термоэлектрические ПТП, вспомогательная стенка которых состоит из некоторого количества (от нескольких десятков до нескольких тысяч) идентичных термоэлементов, соединенных последовательно по генерируемому элект-

трическому сигналу и параллельно по измеряемому тепловому потоку, заформованных для придания монолитности в электроизоляционный компаунд.

Батарею таких термоэлементов изготавливают в виде плоской лентовидной спирали, состоящей из последовательно чередующихся полувитков, одни из которых (например, восходящие) являются отрезками основной термоэлектродной проволоки без покрытия, а другие (соответственно, нисходящие) – отрезками основной проволоки, с электролитически нанесенным покрытием из иного (чаще парного) термоэлектрического материала. Места перехода от непокрытых участков к покрытым, являющиеся "спаями" термоэлектродов, расположены в двух параллельных плоскостях ПТП, разнесенных на высоту термобатареи. Варианты исполнения спирали для батарейного биметаллического гальванического ПТП приведены на рисунке 1.

Особенностью батарейного биметаллического ПТП является то, что его чувствительность зависит не только от коэффициентов Зеебека примененных материалов и количества термоэлементов, но и от соотношения площадей сечения материалов в биметаллическом термоэлектроде и соотношения их удельных электрических сопротивлений. Термоэлектри-

ческих материалов, пригодных для изготовления биметаллических спиральных ПТП, весьма много [3, 5], хорошо освоенной является технология изготовления спиралей из константовой или копелевой проволоки с покрытием соответствующих полувитков спирали медью, а также нихромовой проволоки с никелевым покрытием [1, 2]. Относительно никелевого покрытия следует отметить, что оно очень перспективно для использования в биметаллических гальванических ПТП, поскольку этот материал характеризуется достаточной коррозионной стойкостью даже при высокой температуре, а технология его гальванического нанесения хорошо отработана.

Константан-медные и копель-медные ПТП, которые серийно выпускаются ИТТФ НАН Украины, являются основным и широко распространенным рабочим средством измерения теплового потока или его поверхностной плотности, так как парный термоэлектродный материал в упомянутых ПТП является весьма технологичным и не вызывает никаких трудностей при его гальваническом осаждении на основной термоэлектродный провод [5]. Однако наряду с положительными качествами медного покрытия по мере исследования непосредственно самих ПТП были выявлены и негативные стороны, а именно рассчитанная

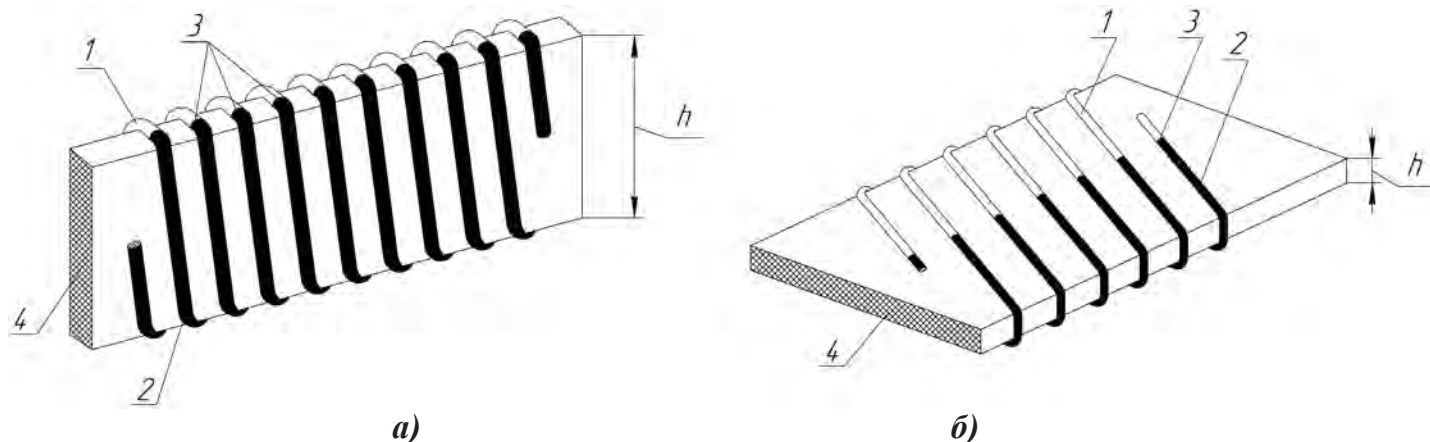


Рис. 1. Варианты исполнения (а и б) спирали для батарейного биметаллического гальванического ПТП: 1 – полувиток основной проволоки без покрытия; 2 – покрытый парным термоэлектрическим материалом (биметаллический) полувиток; 3 – места перехода от основного термоэлектрода к биметаллическому ("спаи" термоэлектродов); 4 – каркасная полоска из электроизоляционного материала.

оптимальная толщина парного термоэлектродного материала имеет очень малое значение, что в свою очередь вследствие окисления меди приводит к дрейфу чувствительности таких термоэлементов даже в умеренном диапазоне температуры (от 250 К до 350 К). Использование такого металла, как никель, дает возможность наносить более толстый слой по сравнению с медью для рассчитанного оптимального значения толщины парного термоэлектрода, а это увеличивает гарантированный срок эксплуатации ПТП с неизменными характеристиками за счет постоянства толщины коррозионно устойчивого материала покрытия. Но и никель не полностью лишен отрицательных качеств. Данный металл имеет нелинейную зависимость коэффициента Зеебека от температуры с экстремумом при 631 К (точка Кюри), что не дает возможность создать ПТП с функцией преобразования теплового потока в электрический сигнал, независимой от температуры в широком температурном диапазоне.

Учитывая только требования к диапазону возможных значений температуры эксплуатации ПТП, их можно изготавливать из различных термоэлектрических материалов. Например, если для исследований в области от 250 К до 450 К годится любая из приведенных в [5] пар термоэлектродов, то для области низкой и криогенной температуры (менее 250 К) целесообразно применять термоэлектродную проволоку с электролитическим покрытием из меди или серебра. Для высокой температуры (от 450 К до 600 К) предпочтительнее покрытие основной проволоки никелем или железом.

При эксплуатации биметаллических ПТП в экстремальных условиях, характеризующихся не только высокими значениями рабочей температуры, но и широким диапазоном ее изменения, чувствительность ПТП становится существенно зависимой от температуры. В этом случае возникает необходимость не только тщательного градуирования ПТП в широком температурном диапазоне, но и в наличии в ПТП преобразователя температуры для контроля собственной температуры, что неизбежно усложняет как конструкцию ПТП, так и про-

цедуру измерений.

В связи с этим был проведен поиск термоэлектрических материалов, обеспечивающих термонеинзависимую чувствительность ПТП в расширенном диапазоне температуры эксплуатации, для чего исследованы зависимости от температуры чувствительности различных пар термоэлектродов, один из которых выполнен биметаллическим, т.е. состоит из проволок основного и парного термоэлектродного материала.

На рисунке 2 систематизированы результаты, полученные при экспериментальном исследовании характера температурной зависимости чувствительности ряда термоэлементов, изготовленных из константановой, копелевой, хромелевой и нихромовой термоэлектродных проволок в паре с никелевой проволокой, которая является имитацией гальванически осажденного парного термоэлектродного материала, при вариации отношения площади сечения никелевой проволоки f_3 к площади сечения соответствующего основного термоэлектрода f_1 в широком температурном диапазоне.

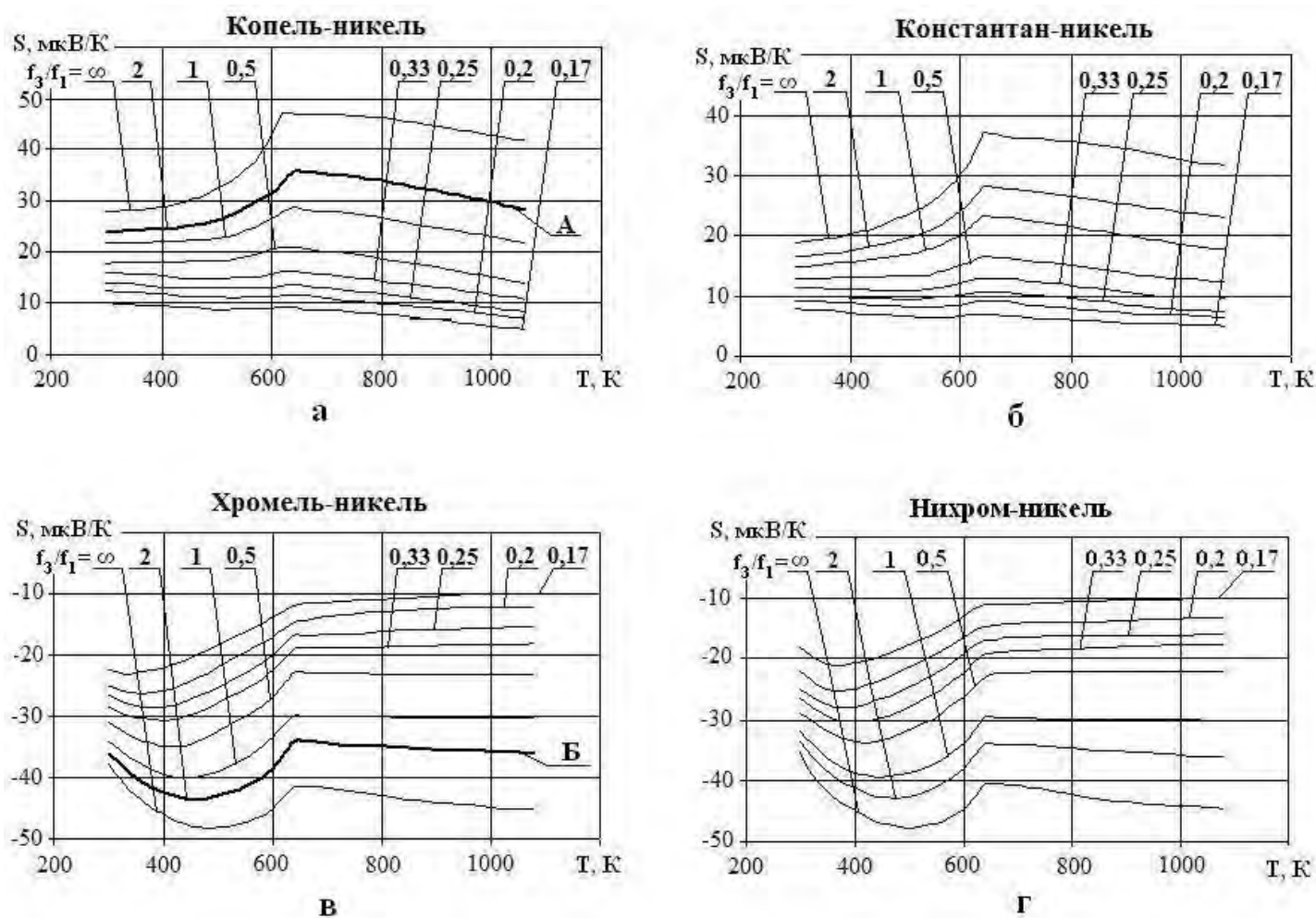
Как видно из представленных графиков, для константан-никелевой и копель-никелевой пар термоэлектродов имеются участки с относительно термонеинзависимой чувствительностью в диапазоне значений рабочей температуры от 300 К до 500 К. Дальнейшее повышение температуры приводит к существенному изменению характера функции преобразования ПТП, включая пики при температуре, соответствующей точке Кюри [9] никеля, обусловленной фазовым переходом в никеле.

Аналогичные изменения, включая пики в точке Кюри, наблюдаются для хромель-никелевой и нихром-никелевой пар.

Таким образом при необходимости измерения теплового потока в диапазоне температуры эксплуатации от 300 К до 500 К применяемый ПТП целесообразно изготавливать из константановой или копелевой проволок с никелевым покрытием. Для копель-никелевых и константан-никелевых ПТП коэффициенты преобразования в указанном диапазоне температуры будут отличаться от среднеарифметического по диапазону не более, чем на 3 % [10].

Характер температурной зависимости чувствительности термоэлементов с биметаллическим электродом с покрытием из никеля положен в основу разработки новых ПТП, обладающих чувствительностью независимой или мало зависимой от температуры в широком температурном диапазоне. Для примера рассмотрим батарею, состоящую из двух разных термоэлементов: копель-никелевого (кривая А на рис. 2, а) и хромель-никелевого (кривая Б на рис. 2, в). Термоэлементы сконструированы так, что они параллельны относительно теплового потока (между их спаями одина-

ковый перепад температуры), а электрически они соединены последовательно и дифференциально. Графики, представленные на рисунке 3, отражают температурные зависимости суммарной чувствительности батарей из двух термоэлементов исследованных пар термоэлектродов. Батареи из копель-никелевого и хромель-никелевого термоэлементов соответствует кривая (А-Б) на рис. 3, а. По аналогичному принципу могут быть созданы многоэлементные ПТП, содержащие батареи различных термоэлементов.



f_3/f_1 – отношение площади сечения никелевой проволоки к площади сечения соответствующей парной проволоки термоэлемента: константана, копеля, хромеля и нихрома.

Рис. 2. Экспериментальные зависимости чувствительности ряда термоэлементов от температуры при вариации отношения площадей сечений основного и парного термоэлектродных материалов.

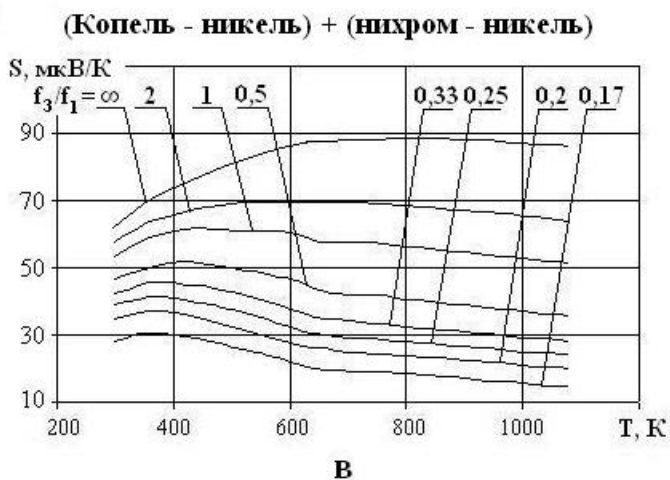
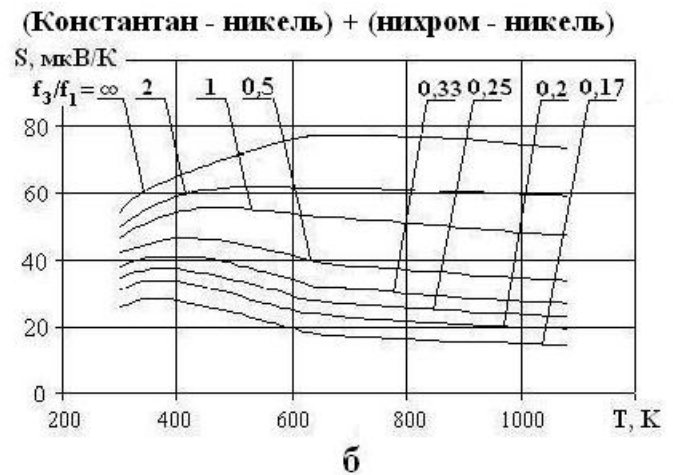
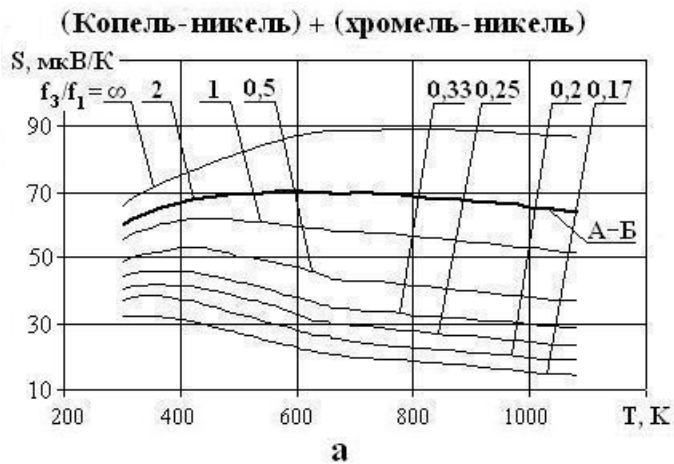
Главной особенностью нового ПТП является то, что его батарея термоэлементов содержит две плоские лентовидные идентичные по конструкции спирали, благодаря чему ПТП назван "биспиральным".

Обе спирали биметаллического ПТП – обычного исполнения, например, как показано на рис. 2, а, изготовленные из неодинаковых термоэлектродных проволок с площадью сечения f_1 в первой спирали и f_2 во второй, но с электролитическим покрытием соответствующих полувитков из одинакового термоэлектрического материала с площадью сечения $f_{3,1}$ в первой спирали и $f_{3,2}$ во второй.

Для обеспечения большей чувствительности обе основные проволоки (1 и 2) должны составлять термоэлектродную пару, например, хромелевая и копелевая, хромелевая и константановая, нихромовая и копелевая, нихромовая и константановая, а покрытие с учетом ожидаемого диапазона температуры эксплуатации ПТП может быть выполнено из меди, серебра, никеля или железа.

При изготовлении биспирального ПТП возможны два конструктивных решения, схематически показанные на рисунке 4, а и б.

По первому варианту конструкции ПТП (рис. 4, а) обе основные термоэлектродные



f_3/f_1 – отношение площади сечения никелевой проволоки к площади сечения соответствующей парной проволоки термоэлемента: константана, копеля, хромеля и нихрома.

Рис. 3. Зависимости от температуры суммарной чувствительности термоэлементов, включенных последовательно по электрическому сигналу.

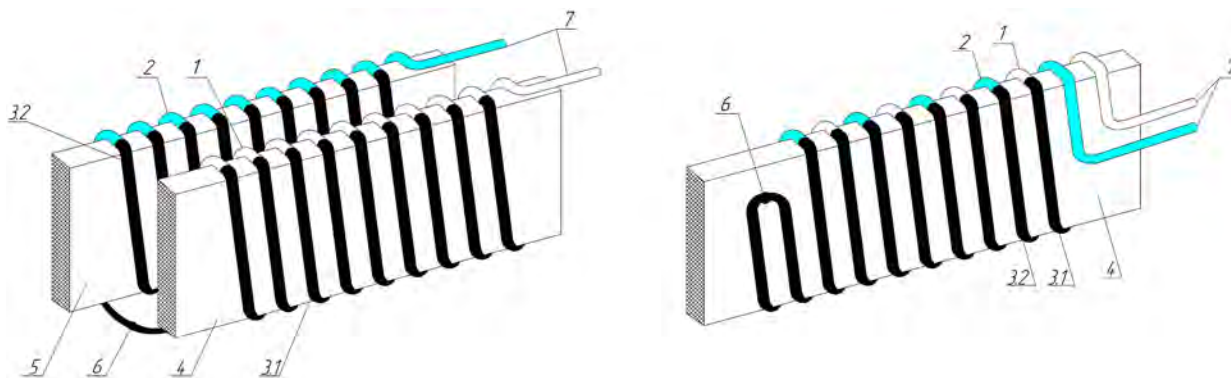


Рис. 4. Варианты исполнения батареи термоэлементов биспирального ПТП:
 1 – основная термоэлектродная проволока первой спирали; 2 – термоэлектродная проволока второй спирали; 3.1, 3.2 – электролитическое покрытие соответствующих полувитков каждой спирали; 4, 5 – каркасные изоляционные ленты; 6 – спай соединения спиралей; 7 – потенциалосъемные провода батарей термоэлементов.

проволоки 1 и 2 с электролитическим покрытием 3.1 и 3.2 соответствующих полувитков основных проволок навиты на отдельные каркасные ленты 4 и 5. Эти ленты выполнены из полосок электроизоляционного материала одинаковой высоты и расположены параллельно, так, что верхние спаи обеих спиралей находятся в одной плоскости, а нижние спаи – в другой. Плоскости спаев параллельны и разнесены на высоту термобатареи. Обе спирали соединены последовательно в спае 6 и зафиксированы в виде пластины электроизоляционным компаундным материалом (на рис. 4 не показан). Сигнал биспирального ПТП выводится через потенциалосъемные провода 7.

Конструкция ПТП по второму варианту отличается тем, что обе спирали (рис. 4, б) расположены на общей каркасной ленте 4, при этом термоэлектродные проволоки 1 и 2 навиты одна относительно другой со сдвигом на изолирующий промежуток, не допускающий электрического контакта между термоэлементами.

При прохождении через биспиральный ПТП теплового потока в стационарном тепловом режиме устанавливается разница температуры ΔT между параллельными плоскостями (верхней и нижней), где размещены спаи батареи термоэлементов, которая пропорциональна поверхностной плотности теплового потока q

и тепловому сопротивлению R_T слоя материала между плоскостями со спаями:

$$\Delta T = R_T \cdot q. \quad (1)$$

Первая спираль термоэлементов, состоящая из основной термоэлектродной проволоки 1 с гальваническим покрытием 3.1 соответствующих полувитков, генерирует термоЭДС E_1 , которую можно рассчитать по формуле:

$$E_1 = z_1 \cdot S_1 \cdot R_T \cdot q, \quad (2)$$

а вторая спираль, состоящая из основной проволоки 2 с покрытием 3.2, генерирует аналогично термоЭДС E_2 :

$$E_2 = z_2 \cdot S_2 \cdot R_T \cdot q, \quad (3)$$

где z_1 и z_2 – количество термоэлементов в первой и второй спирали соответственно.

S_1 и S_2 – чувствительность одного термоэлемента в первой и второй спиралях термобатареи.

Значения чувствительностей S_1 и S_2 термоэлементов согласно [2] рассчитываются по формулам:

$$S_1 = (\alpha_1 - \alpha_3) / (1 + (\rho_3 \cdot f_1) / (\rho_1 \cdot f_{3,1})), \quad (4)$$

$$S_2 = (\alpha_2 - \alpha_3) / (1 + (\rho_3 \cdot f_2) / (\rho_2 \cdot f_{3,2})), \quad (5)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – коэффициенты Зеебека материа-

лов основных проволок 1 и 2 и материала покрытия 3;

ρ_1, ρ_2, ρ_3 – их удельное электрическое сопротивление;

f_1, f_2 – площади сечения основных проволок 1 и 2;

$f_{3.1}$ и $f_{3.2}$ – площади сечения покрытия 3 основных проволок 1 и 2.

Исходя из формул (2) – (5) суммарный сигнал включенных последовательно и дифференциально спиралей 1 и 2 термобатареи биспирального ПТП равен:

$$E_{\Sigma} = E_1 - E_2 = R_T \cdot q \cdot (z_1 \cdot S_1 - z_2 \cdot S_2) = R_T \cdot q \cdot S_{\Sigma}, \quad (6)$$

где S_{Σ} – суммарная чувствительность термобатареи, то есть биспирального ПТП, рассчитываемая по формуле:

$$E_{\Sigma} = z_1 \cdot \alpha_1 / [1 + (\rho_3 \cdot f_1) / (\rho_1 \cdot f_{3.1})] - z_2 \cdot \alpha_2 / [1 + (\rho_3 \cdot f_2) / (\rho_2 \cdot f_{3.2})] - z_1 / [1 + (\rho_3 \cdot f_1) / (\rho_1 \cdot f_{3.1})]. \quad (7)$$

Третий член в формуле (7) учитывает влияние коэффициента Зеебека материала покрытия на чувствительность ПТП. Увеличить или уменьшить это влияние можно выбором параметров конструкции, в том числе можно полностью исключить этот фактор путем подбора такого сочетания параметров ПТП, при котором выполняется равенство:

$$z_1 / [1 + (\rho_3 \cdot f_1) / (\rho_1 \cdot f_{3.1})] = z_2 / [1 + (\rho_3 \cdot f_2) / (\rho_2 \cdot f_{3.2})], \quad (8)$$

благодаря чему можно рассчитать оптимизированную чувствительность ПТП по формуле:

$$S_{\Sigma \text{ опт}} = z_1 \cdot \alpha_1 / [1 + (\rho_3 \cdot f_1) / (\rho_1 \cdot f_{3.1})] - z_2 \cdot \alpha_2 / [1 + (\rho_3 \cdot f_2) / (\rho_2 \cdot f_{3.2})]. \quad (9)$$

Исходя из выражений (8) и (9), можно констатировать, что специальным подбором параметров биспирального ПТП можно добиться, чтобы его чувствительность не зависела от термоэлектрических свойств материала покрытия основных проволок. Однако, из-за того, что даже у специально подобранной пары термоэлектродных материалов основных термоэлектродных проволок (например, хромель

и копель) имеется некоторая температурная зависимость коэффициентов Зеебека α_1 и α_2 , чувствительность $S_{\Sigma \text{ опт}}$ остается в некоторой степени термозависимой величиной. По результатам проведенных исследований видно, что если изменение чувствительности копель-никелевого термоэлемента в диапазоне температуры от 300 К до 1070 К составляет $\pm 18 \%$ (см. график А рис. 2), а хромель-никелевого термоэлемента $\pm 13 \%$ (см. график Б рис. 2), то изменение чувствительности биспирального ПТП из этих термоэлементов составляет всего $\pm 4 \%$ (см. график А-Б рис. 3).

Результаты исследований температурной зависимости чувствительности термоэлементов из различных термоэлектродных материалов, представленные на рис. 2 и рис. 3, позволяют подобрать пару термоэлектродных проволок в качестве основных для биспирального ПТП, выбрать толщину покрытия и другие параметры батарей термоэлементов, которые обеспечат минимизацию температурной зависимости чувствительности преобразователя.

Выводы

Экспериментально исследованы температурные зависимости чувствительности биметаллических термоэлементов из различных термоэлектродных материалов с покрытием из никеля. Показана возможность создания, предложена конструкция и метод оптимизации параметров биспиральных преобразователей теплового потока, в которых в значительной мере скомпенсирована температурная зависимость чувствительности.

Предложенные биспиральные ПТП при практически полном сохранении традиционной технологии изготовления гальванических спиральных термобатарей, обеспечивают выполнение теплоточных измерений в широком температурном диапазоне с повышенной точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Герашенко О.А., Федоров В.Г.* Техника теплотехнического эксперимента. – Киев: Наукова думка, 1964. – 164 с.

2. *Геращенко О.А.* Основы теплотехники. – Киев: Наукова думка, 1971. – 192 с.
3. *Декуша Л.В.* Теплотехнические измерительные преобразователи для исследования сложного теплообмена. – Диссертация на соискание ученой степени канд. тех. наук, Киев, 1990. – 311 с.
4. *Грищенко Т., Декуша Л., Воробьев Л.* Тепловой поток и методы его измерения // Метрологія та прилади. – 2009. – № 2. – С. 3-11.
5. *ДСТУ 3756-98 (ГОСТ 30619-98).* Енергозбереження. Перетворювачі теплового потоку термоелектричні загального призначення. Загальні технічні умови.
6. *ГОСТ 26263-84. Грунты.* Метод лабораторного определения теплопроводности мерзлых грунтов.
7. *Теплофизические приборы* и комплектные лаборатории. Каталог. – М: Внешторгиздат. – 1981. С. 18-19.
8. *Митяков В.Ю.* Возможности градиентных датчиков теплового потока на основе висмута в теплотехническом эксперименте. – Диссертация на соискание ученой степени д-ра техн. наук, Санкт-Петербург, 2005. – 239 с.
9. *Физический энциклопедический словарь.* Т. 2. – М.: Советская энциклопедия. – 1962. – С. 557.
10. *Шмаров Е.В., Декуша Л.В., Воробьев В.И., Грищенко Т.Г.* Конструирование преобразователей теплового потока на базе констант-никелевых и копель-никелевых гальванических термоэлементов // Пром. Теплотехника. – 2012. – Т. 34, № 2. – С. 92-99.

Получено 26.06.2012 г.