

УДК 536.5

Разработка контроллера для измерения температуры, в том числе температуры поверхности

А. Б. Опаричев, М. А. Каримбеков

Московский энергетический институт (Технический университет), Москва, Россия

Разработана и исследована конструкция контроллера температуры поверхности с повышенной точностью измерения за счет снижения погрешностей, обусловленных неопределенностью степени черноты контролируемой поверхности и термочувствительного элемента, конвективным и инерционным теплообменом. Измерительная головка приводится в контакт с теплофизически контролируемой поверхностью через установочное кольцо с встроенными противоконвекционными мембранами и отражающими зеркальными покрытиями. Термоэлектрический преобразователь, содержащий пленочную термоэлектрическую батарею, и терморезистор включены в одно из плеч резистивного равноплечного моста (корректирующий преобразователь). Сигнал термоэлектрического преобразователя пропорционален разности температур контролируемой поверхности и измерительной головки и не зависит от изменения температуры последней.

Измерители температуры используются для теплофизического контроля стен зданий и сооружений, корпусов термического оборудования и приборов, теплотехнических агрегатов, отопительной арматуры, теплоизоляции трубопроводов и при решении научно-исследовательских задач [1—6]. При измерении температуры поверхности проявляются явления конвекции (при измерениях в газовой и жидкой средах), теплопроводности (при контактных измерениях) [7—9] и теплового излучения (при дистанционных измерениях) [10—14]. В применяемых измерительных инструментах получили распространение термоэлектрические эффекты, в частности, термопреобразователи в виде термопар и термопарных батарей [15—20].

Измерения температуры поверхности остаются неудовлетворительными из-за нарушения теплового равновесия. Меняются взаимосвязь теплообмена чувствительного элемента измерительного прибора и теплофизически контролируемой поверхности от измерения к измерению, а также сказывается влияние плоскостности, шероховатости поверхности и прижимного усилия. На измерениях сказываются также износ и повреждение контактирующей детали прибора и контролируемой поверхности. Поэтому приходится предотвращать влияние условий теплопередачи от контролируемой поверхности к измерительному инструменту (конвекцией, теплопроводностью и излучением). Для этого применяются следующие пути: подавление конвекции в приповерхностном воздушном слое, через который осуществляются контакт и тепловой взаимообмен измерительного термопреобразователя с

контролируемой поверхностью, отражение излучения контролируемой поверхности от измерительного термопреобразователя, а также (при использовании термопар) корректировка нестабильности перепада температур на спаях термопар с помощью терморезистора, включаемого в электроизмерительную схему.

Цель работы — разработка контроллера температуры поверхности, повышающая точность измерения за счет снижения погрешностей, обусловленных неопределенностью степени черноты контролируемой поверхности и термочувствительного элемента, конвективным и радиационным теплообменом.

Наличие стационарного теплового потока является важным ориентиром для принципа действия контроллера температуры и его использования. Важным ориентиром является линейность теплофизических зависимостей для контроллера, допускающая его конструкторско-технологическую настройку. Еще одним ориентиром была пригодность контроллера для использования в телемониторинге и телеуправлении на территориально рассредоточенных объектах.

Расчет параметров и оптимизация топологии

Снижению погрешности измерения содействует использование "дискриминации спаев", дополнительной дифференциации лучепоглощающей способности рабочих ("горячих") и опорных ("холодных") спаев термоэлектрической батареи (рис. 1) и миниатюризация, т. е. пленочное исполнение измерительного чувствительного элемента.

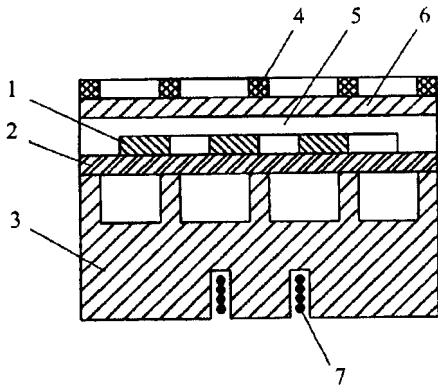


Рис. 1. Схема термoeлектрического чувствительного элемента:

- 1 — пленочная термоэлектрическая батарея; 2 — диэлектрическая подложка; 3 — теплоприемное основание;
- 4 — прижимная накладка; 5 — изолирующий слой;
- 6 — отражающее покрытие; 7 — терморезистор

Анализ условий дискриминации рабочих и опорных спаев пленочного термопреобразователя выявил возможность оценок:

- температуры рабочих спаев

$$T_W = T \left(\frac{l}{2} \right) = \frac{q}{2K_{HR}} \left[1 - \operatorname{sh} \left(\frac{ml}{2} \right) \right],$$

где $m = \sqrt{\frac{2K_{HR}}{\kappa_p d_p}}$,

- q — плотность теплового потока;
- K_{HR} — коэффициент теплоотдачи с поверхности термопреобразователя в окружающую среду ($2 \cdot 10^{-3}$ Вт/(см²·К);
- κ_p — удельная теплопроводность подложки ($3 \cdot 10^{-2}$ Вт/(см·К) — для слюды и $3 \cdot 10^{-3}$ Вт/(см·К) — для полиимида);
- d_p — толщина подложки;
- l — ширина канавки между выступами основания (~2 мм);

- термоЭДС на единицу площади термобатареи

$$E_{ТВ} = \frac{(\alpha_{pb} - \alpha_{nb})T_W}{(1 + \Delta l)(a + \Delta a)},$$

- где α_{pb} и α_{nb} — коэффициенты термоЭДС p - и n -ветвей термобатареи, соответственно (для сурьмы +38 мкВ/К и для висмута -56 мкВ/К);
- Δl — ширина выступов (~1 мм);
- a — ширина ветвей (~0,6 мм);
- Δa — промежуток между рядами термопар (~0,4 мм);

- чувствительности термобатареи к тепловому потоку

$$S = \frac{E_{ТВ}}{q} = \frac{\alpha_{pb} - \alpha_{nb}}{2K_{HR}(l + \Delta l)(a + \Delta a)} \left[1 - \operatorname{sh} \left(\frac{ml}{2} \right) \right].$$

Отсюда вытекает возможность оптимизации ширины канавки между выступами основания для получения максимальной чувствительности (для висмут-сурьмяного термопреобразователя оптимальные значения: на слюдяной подложке $l = 4,5$ мм, полиимидной подложке — 2,5 мм) (рис. 2, а).

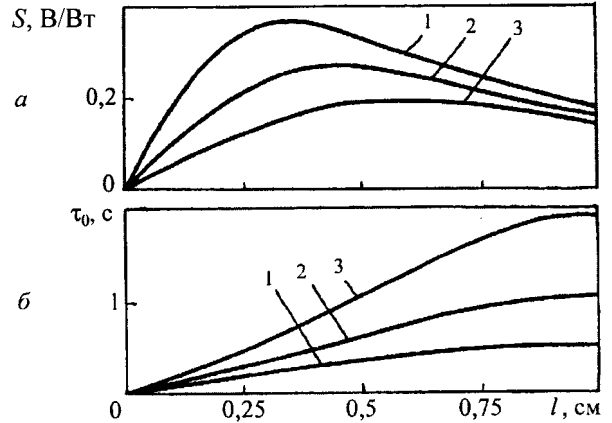


Рис. 2. Расчетные зависимости чувствительности (а) и постоянной времени (б) пленочных висмут-сурьмяного термопреобразователя на слюдяных подложках различной толщины (1 — 20 мкм; 2 — 30 мкм; 3 — 40 мкм) от ширины паза между выступами основания (при ширине выступа 1 мм и периодичности термопарных полос 1 мм)

Оценка изменения температуры рабочих спаев во времени показала, что термоЭДС возрастает по экспоненциальному закону с постоянной времени

$$\tau_0 = \frac{c_p d_p l^2}{2K_{HR} l^2 + \pi^2 \kappa_p d_p},$$

где c_p — удельная теплоемкость материала подложки (для слюды $c_p = 2,74$ Вт/(см³·К).

Из расчетов следует, что уменьшение ширины канавки с 4 до 2 мм приводит к потере чувствительности на 1/3, но увеличивает быстродействие в три раза (см. рис. 2, б).

Установочная насадка (рис. 3) задает величину воздушного зазора между термоэлектрическим чувствительным элементом и поверхностью контролируемого тела. Величина требуемого воздушного зазора зависит от измеряемой температуры, степени черноты контролируемой поверхности и требуемой точности измерения. Зазор подбирается опытным путем после оценки из неравенства

$$\delta \leq \frac{\kappa_{air}(T_{\max} - T_0)}{10\epsilon\epsilon_0\sigma(T_{\max}^4 - T_0^4)},$$

- где κ_{air} — удельная теплопроводность воздуха в нормальных условиях ($2,6 \cdot 10^{-4}$ Вт/(см·К);
- σ — постоянная Стефана-Больцмана ($5,67 \times 10^{-12}$ Вт/(см²·К⁴);

T_{max} — максимальная измеряемая температура;
 T_0 — температура теплоприемного основания;
 ϵ и ϵ_0 — степень черноты контролируемой поверхности и поверхности термоэлектрического чувствительного элемента, соответственно.

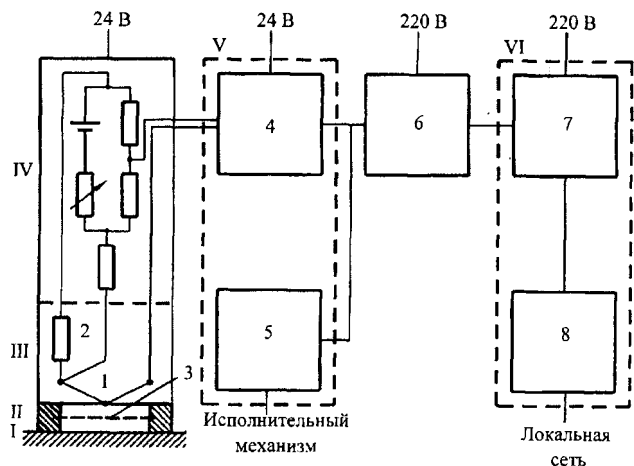


Рис. 3. Блок-схема контроллера температуры поверхности:
 I — поверхность теплофизически контролируемого тела; II — установочная насадка с противоконвекционными мембранами 1; III — измерительная головка с термоэлектрическим преобразователем 2 и терморезистором 3 (оба в пленочном исполнении); IV — корректирующий преобразователь (резистивный равноплечный мост); V — ЛУСО, включающее МАВ 4, МДВ 5 и преобразователь-коммутатор (RS-485/RS-232) 6; VI — локальная информационная сеть верхнего уровня, содержащая персональный компьютер 7 и модем 8

Расчетная величина зазора лежит в пределах от долей миллиметра до нескольких миллиметров. Зависимости интенсивности теплопередачи путем излучения и путем теплопроводности через слой воздуха различной толщины между измеряемой поверхностью и термоэлектрическим чувствительно-преобразующим элементом от температуры приведены на рис. 4, а.

При наличии насадки, небольшой величине воздушного зазора ($\delta \leq 2$ мм) и умеренной температуре ($T \leq 373$ К) нагрев термоэлектрического чувствительного элемента от поверхности контролируемого тела осуществляется практически за счет теплопроводности по слою воздуха в зазоре. При этом нагрев термоэлектрического чувствительного элемента от поверхности контролируемого тела за счет излучения через слой воздуха в зазоре мал, и термоЭДС мало зависит от степени черноты контролируемой поверхности, но погрешность измерения зависит от степени черноты термочувствительного преобразователя. Эта погрешность уменьшается по мере зеркализации мембран и термочувствительного элемента.

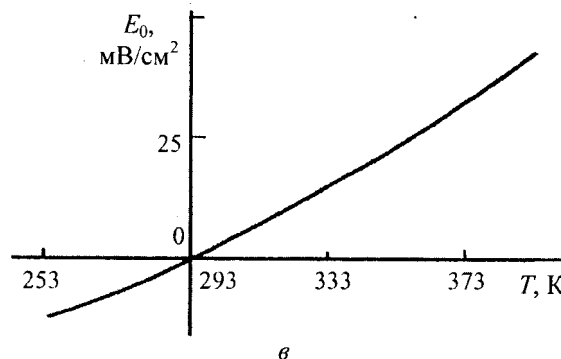
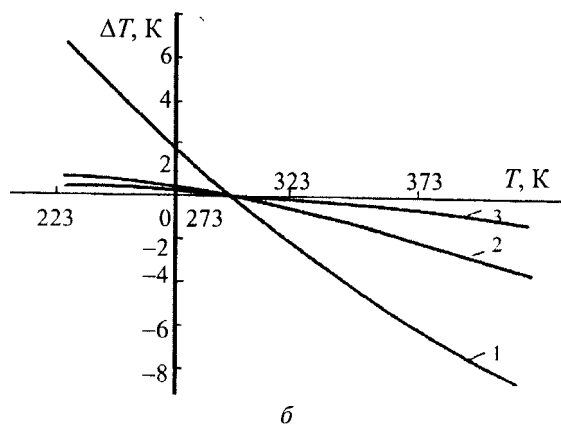
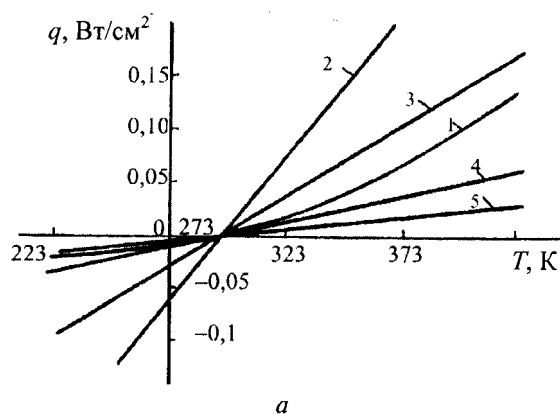


Рис. 4. Зависимости:

а — интенсивности теплопередачи путем излучения — 1 и путем теплопроводности через слой воздуха различной толщины (2 — 1 мм, 3 — 2 мм, 4 — 5 мм, 5 — 10 мм) между измеряемой поверхностью и термоэлектрическим чувствительно-преобразующим элементом; б — абсолютной погрешности измерения температуры поверхности со степенью черноты $\epsilon = 0,8$ (радиационным методом) — 1 и при толщине слоя воздуха между измеряемой поверхностью и чувствительно-преобразующим элементом $\delta = 2$ мм и степени черноты $\epsilon = 1,0 - 2$ и $\epsilon = 0,2 - 3$ (косвенным методом); в — расчетного выходного сигнала пленочного висмут-сурьмяного термопреобразователя от температуры поверхности

Зависимости максимальной погрешности измерения температуры поверхности рассматриваемым способом при $T_0 = 295$ К, $\epsilon_0 = 1,0$ и $\epsilon_0 = 0,2$, неопределенности степени черноты поверхности в интервале $\epsilon_1 = 0,8 - 1,0$ и толщине воздушного слоя между измеряемой поверхностью и поверхностью чувствительного элемента

$\delta = 2$ мм от температуры измеряемой поверхности приведены на рис. 4, б. Видно, что погрешность измерения температуры рассматриваемым способом при $\epsilon_1 \ll 1$ заметно меньше, чем радиационным методом.

Расчетная вольт-температурная характеристика измерительной головки с пленочной висмут-сурьмяным термопреобразователем на слюдяной подложке толщиной 20 мкм при ширине каналов между выступами основания 2 мм, ширине выступов 1 мм, периодичности термопарных полос 1 мм и величине воздушного зазора 2 мм приведена на рис. 4, в. Как видно, средняя чувствительность измерительной головки составляет ~ 2 с.

Постоянную времени прогрева воздуха в зазоре установочной головки

$$\tau_{air} \cong \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{c_{air}}{\kappa_{air}},$$

где c_{air} — теплоемкость воздуха ($1,3 \cdot 10^{-3}$ Дж/(см³·К), и κ_{air} — его теплопроводность ($2,6 \cdot 10^{-4}$ Вт/(см·К) при стандартных условиях сравнивались со временем изменения температуры измерительной головки

$$\tau_m = \frac{m_h c_h \Delta T_{ad}}{q_{max}}$$

в принятом допустимом пределе ($\Delta T_{ad} = 1$ К).

Здесь m_h — масса головки на единицу площади поверхности, воспринимающей тепло (≥ 4 г/см²);

c_h — теплоемкость материала головки (0,76 Дж/г·К);

q_{max} — интенсивность теплового потока при максимально допустимой температуре ($q_{max} = 0,305$ Вт/см² при $\delta = 2$ мм и $T_{max} = 423$ К).

Расчеты подтвердились экспериментальными данными. Значение термоЭДС и показания температуры устанавливались через 5–10 с. Для следующего измерения рекомендована пауза 0,5 мин. Для получения нужной температуры окружающей среды в начале работы и между 10 измерениями подряд требовалось 10–15 мин.

Регулирование температуры нагрева основания измерительной головки

Для контроля температуры измерительная головка тем торцом ее, на котором закреплена установочная насадка, приводится в контакт (прикладывается или прижимается, не допуская перекоса, отрыва или смещения) с поверхностью контролируемого тела. При этом в воздушном зазоре величиной δ , задаваемой насадкой, устанавливается линейное распределение температу-

ры, так что температура рабочих спаев T_W термоэлектрической батареи, находящихся на расстоянии x от основания измерительной головки (теплоприемного основания), определяется уравнением

$$T_W = T_h + (T_s - T_h) \frac{x}{\delta}, \quad (1)$$

где T_h — температура измерительной головки;
 T_s — температура поверхности.

Все значения температур связаны между собой линейной зависимостью.

Нагрев рабочих спаев термоэлектрической батареи вызывает появление термоЭДС, величина которой пропорциональна разности температур ее рабочих и опорных спаев, т. е.

$$E_{ТВ} = n \alpha_m (T_W - T_{sup}), \quad (2)$$

где n — число термопар в термоэлектрической батарее;

α_m — коэффициент термоЭДС одной термопары;

T_{sup} — температура опорных спаев.

Так как опорные спаи термоэлектрической батареи практически имеют температуру измерительной головки, т. е. $T_{sup} \cong T_h$, то выражение (2) приводится к виду

$$E_{ТВ} = n \alpha_m (T_W - T_h). \quad (3)$$

Объединяя выражения (1) и (3), можно получить

$$E_{ТВ} = n \alpha_m \frac{x}{\delta} (T_s - T_h). \quad (4)$$

Выражение (4) показывает, что выходной сигнал термоэлектрической батареи пропорционален разности температур контролируемой поверхности и измерительной головки. Коэффициент $K_{ТВ} = n \alpha_m \frac{x}{\delta}$ определяет крутизну вольт-амперной характеристики термоэлектрической батареи.

Корректирующий преобразователь с включенным в нее терморезистором балансируется при $T_h = 0$ °С. При изменении температуры измерительной головки изменяется электросопротивление размещенного в ней терморезистора, и в измерительной диагонали мостовой схемы возникает напряжение E_{KM} , равное

$$E_{KM} = \frac{1}{4} \alpha_p R_0 I_0 T_h, \quad (5)$$

где α_p — температурный коэффициент электросопротивления терморезистора;

R_0 — электросопротивление терморезистора при 0°C ;

I_0 — сила электрического тока (питание моста).

Формула (5) приведена для равноплечного моста. Коэффициент $K_{KM} = \frac{1}{4} \alpha_p R_0 I_0$ определяет крутизну выходной характеристики корректирующего преобразователя. При этом суммарный выходной сигнал E_{out} измерительной головки равен

$$E_{out} = E_{ТВ} + E_{KM} = K_{ТВ}(T_s - T_h) + K_{KM}T_h. \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что при $K_{ТВ} = K_{KM}$ суммарный выходной сигнал измерительной головки пропорционален температуре T_s контролируемой поверхности и не зависит от изменения температуры самой измерительной головки, обусловленной как нагревом от контролируемой поверхности, так и изменением температуры окружающей среды, т. е. $E_{out} = K_{ТВ}T_s$.

Технология изготовления термопреобразователя

Чувствительный элемент изготавливается в виде пленочной висмут-сурьмяной термопарной батареи на слюдяной и полиимидной подложке последовательным термическим испарением и конденсацией в вакууме через набор трафаретных масок. Длина ветвей 3 мм, ширина 0,6 мм, перекрытие 0,4 мм, толщина ~ 1 мкм. Маски изготавливаются из фольги бронзы марки Бр.Б2 толщиной 50 мкм методом фотолитографии.

Электросопротивление термоэлектрических батарей составляет 1—3 кОм, терморезисторов — 56 ± 2 Ом (медь, температурный коэффициент электросопротивления $\sim 4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$), что обеспечивает крутизну вольт-температурной характеристики 1 мВ/К (средняя чувствительность $\sim 0,4 \text{ мВ}/(\text{K} \cdot \text{см}^2)$ при токе 20 мА.

Устройство контактного контроллера температуры

Контроллер температуры (см. рис. 3) содержит контактирующую с поверхностью I установочную цилиндрическую насадку II, выполненную из теплоизоляционного материала (фторопласта). Насадка крепится на измерительной головке III. Измерительная головка, объединенная в одно целое с корректирующим преобразователем (резистивный равноплечный мост) IV, содержит термопреобразователь—термоэлектрический чувствительный элемент I (в пленочном исполнении, висмут—сурьма) и терморезистор 2 (в проволочном исполнении, медь). Терморезистор включен в схему моста, а сам мост соединен последовательно с термопреобразователем. Напря-

жение в измерительной диагонали моста, возникающее из-за его разбаланса, связанного с изменением температуры опорных спаев, складывается с выходной термоЭДС термопреобразователя. Выходной сигнал измерительной головки и корректирующего преобразователя (резистивный равноплечный мост) поступает в локальное устройство сопряжения с объектом (ЛУСО) V, включающее модуль аналогового ввода (МAB) 4, модуль дискретного вывода (МДВ) 5 и удаленный преобразователь-коммутатор (RS-485/RS-232) 6. В качестве модулей ввода-вывода (МAB и МДВ) использованы контроллеры серии DECONT (фирмы DEP). Преобразователь-коммутатор (стандарты RS-485 и RS-232) позволяет использовать локальную информационную сеть верхнего (сеансового и транспортного) уровня VI, содержащую персональный компьютер 7 и модем 8. Физические интерфейсные платы, сетевое и вспомогательное оборудование и программное обеспечение к контроллерам DECONT допускают применение контроллеров температуры в системах автоматизации на территориально-распределенных технологических объектах, включая телеуправление исполнительными механизмами и телемониторинг (ETHERNET).

Чувствительный элемент (см. рис. 1) — это пленочная висмут-сурьмяная термоэлектрическая батарея 1, которая сформирована на тонкой диэлектрической подложке 2 (калиброванная слюда толщиной 20 мкм или полиимидная пленка толщиной 40 ± 2 мкм), закрепляемая на массивном основании 3 из меди или алюминия. Основание имеет выступы, соприкасающиеся с опорными спаями термоэлектрической батареи. Поверх батареи установлена прижимная накладная 4 с прорезями, перемишки между которыми совмещены с выступами основания. На внешнюю поверхность термоэлектрической батареи наносится тонкий защитный изолирующий слой 5 с зеркальным отражающим покрытием 6 (алюминий). Опорные спаи термоэлектрической батареи прижаты к выступам накладкой (ее перемишками) для обеспечения теплового контакта с основанием. Кроме того, перемишки предотвращают прямой нагрев опорных спаев термоэлектрической батареи тепловым потоком от контролируемого тела и его поверхности к рабочим спаям.

Техническая характеристика контактного контроллера температуры

Диапазон измеряемых температур, $^\circ\text{C}$	0 ± 120
Погрешность измерения, %.....	± 2
Время измерения, с.....	5
Площадь измеряемой поверхности, см^2	3
Радиус кривизны, мм, не менее.....	100
Габаритные размеры, мм.....	$40 \times 100 \times 150$
Масса, г.....	700
Допускается измерение температуры от -20 до $+150^\circ\text{C}$.	

Литература

1. Куинн Т. Температура: Пер. с англ./ Под ред. Д. Н. Астрова. — М.: Мир, 1985. — 448 с.
2. Линевер Ф. Измерение температур в технике: Справочник: Пер. с нем. Т. И. Киселевой и В. А. Федоровича/ Под ред. Л. А. Чарихова. — М.: Металлургия, 1980. — 544 с.
3. Температурные измерения: Справочник/ Под ред. О. А. Геращенко. — Киев: Наукова думка, 1984. — 495 с.
4. Приборы для измерения температуры контактным способом: Справочник/ Р. В. Бычковский, В. Н. Вигдорович, Е. А. Колесник и др.; Под ред. Р. В. Бычковского. — Львов: Вища школа, 1978. — 208 с.
5. Бычковский Р. В. Контактные датчики температуры. — М.: Металлургия, 1978. — 240 с.
6. Геращенко О. А. Основы теплотри. — Киев: Наукова думка, 1971. — 192 с.
7. Кулаков М. В., Макаров Б. И. Измерение температуры поверхности твердых тел. — М.: Энергия, 1979. — 96 с.
8. Вигдорович В. Н., Каримбеков М. А.// Вестник МЭИ. 2003. № 3. С. 24—28.
9. Вигдорович В. Н., Каримбеков М. А.// Приборы и техника эксперимента. 2001. № 5. С. 129—131.
10. Свет Д. Я. Оптические методы измерения истинных температур. — М.: Наука, 1982. — 296 с.
11. Геращенко О. А., Сажина С. А.// В кн.: Тепловые приемники излучения. — Л.: ГОИ, 1980. С. 125—126.
12. Поскачей А. А., Чарихов Л. А. Пирометрия объектов с изменяющейся излучательной способностью. — М.: Металлургия, 1978. — 200 с.
13. Гордов А. Н. Основы пирометрии. — М.: Металлургия, 1971. — 447 с.
14. Chiks C. L., Mellon M. K.// Hewlett Packard Journal. 1971. V. 22. № 11. P. 10—16.
15. Вигдорович В. Н., Каримбеков М. А., Корнилов В. А. Разработка пленочных термоэлектрических преобразователей как средств технологического контроля и измерения. — Шатура: Предприятие "Экоинформсистема", 1995. — 52 с.
16. Вигдорович В. Н., Каримбеков М. А. Озонопроизводство и озонирование как комплекс мониторинга и управления. — Шатура: Предприятие "Экоинформсистема", 1993. — 52 с.
17. Гольцман Б. М., Дашевский З. М., Кайданов В. И., Коломоец Н. В. Пленочные термоэлементы: физика и применение. — М.: Наука, 1985. — 232 с.
18. А. с. 721683 СССР, МКИ G 01 J 5/12. Приемник лучистой энергии/ В. М. Нестеренко, З. Я. Косаковская, Л. В. Казанджян, Г. А. Ухлинов, В. Н. Вигдорович, Н. И. Чиботару; Оpubл. в БИ № 10 (15.03.1980 г.).
19. Анатычук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. — Киев: Наукова думка, 1979. — 768 с.
20. Пат. 3969149 США, кл. 136-225. Thermoelectric micro-generator/ Thomas P., Alais M.; Оpubл. 13.07.76.

Статья поступила в редакцию 1 октября 2004 г.

Development of the controller for measurement of temperature, including temperature of a surface

A. B. Oparichev, M. A. Karimbekov

Moscow Power Engineering Institute (Technical University), Moscow, Russia

The construction of the controller of temperature of a surface with a heightened measurement accuracy is designed and explored at the expense of lowering errors stipulated by indeterminacy of a degree of blackness of an inspected surface and a temperature bulb, convective and slugged heat interchange. The measuring head is given in contact with thermal physics by an inspected surface through a landing ring with built-in against convective membranes and reflecting coverages. The thermoelectric transformer contains a film thermoelectric battery and thermistor. The transformer and thermistor are included in one of shoulders of the resistivity equal-arm of the bridge (correcting transformer). The signal of the thermoelectric transformer is proportional to a temperature difference of an inspected surface and measuring head and does not depend on change of temperature of the most measuring head.

* * *