

# Измерение нестационарной температуры и коэффициента теплоотдачи

ОмГТУ

# Теория составного термометра с двумя идеальными чувствительными элементами

Допущения:

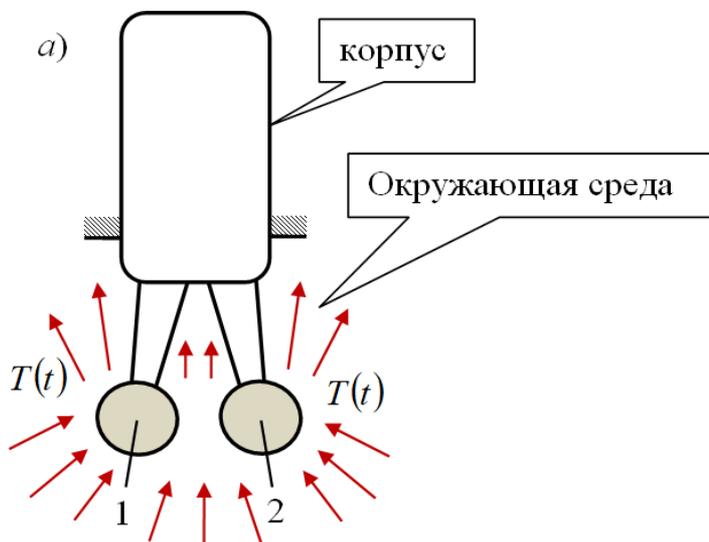
вблизи обоих чувствительных элементов температура окружающей среды одинаковая по величине;  
на поверхностях теплообмена обоих чувствительных элементов средние значения коэффициентов теплоотдачи пропорциональны:

$$\kappa = \bar{\alpha}_2(t) / \bar{\alpha}_1(t) = \text{const} \quad (1)$$

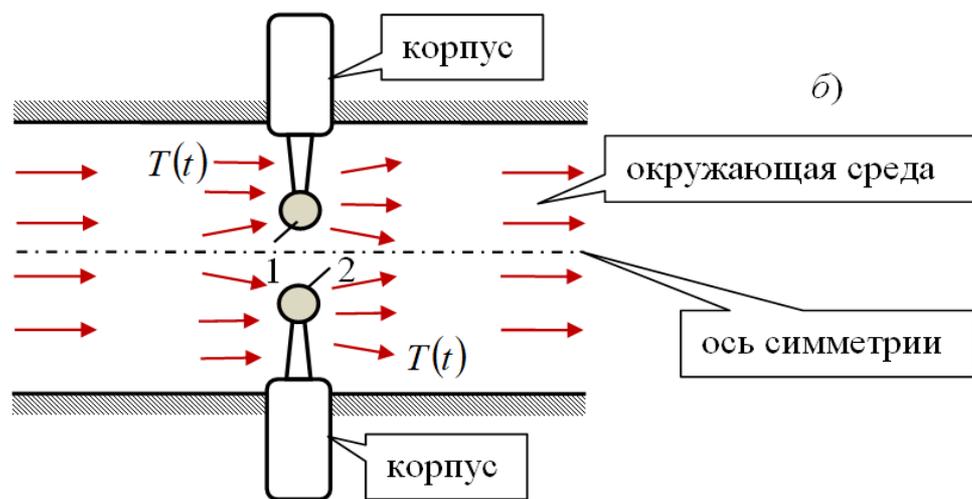
$\bar{\alpha}(t)$  – среднее значение коэффициента теплоотдачи

# Конструктивно составной термометр может быть выполнен разными способами

с объединённым корпусом



с корпусом, разнесённым на две  
отделённые части



## Текущее состояние и проработанность метода

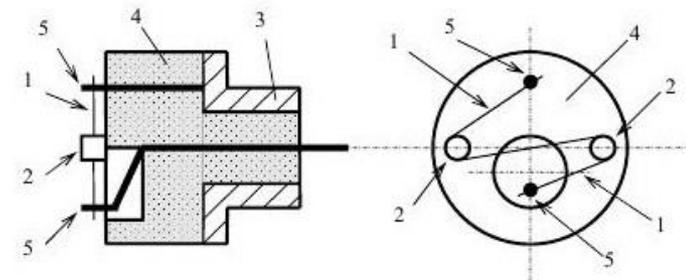
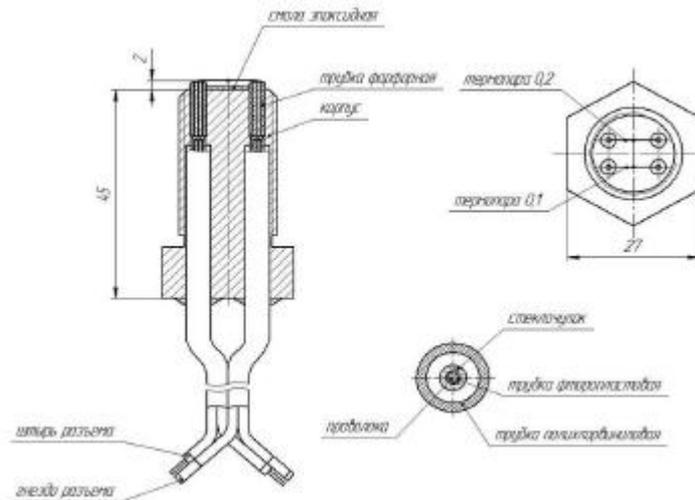
В научно-технической литературе измерение нестационарной температуры с использованием двух близко расположенных термометров с различной инерционностью называют методом двух термоприемников.

Впервые данный метод предложил Г. Пфрим в 30-х годах прошлого столетия.

Известны работы авторов:

Огородников Н.Н., Болштянский А.П. (ОмГТУ), Дунаева И.В., Дубовой, Н.Д.,

Ярышев Н.А.



Термометр сопротивления с двумя чувствительными элементами

Фото и конструкция спаренного датчика температуры с двумя термопарами

- Математическое описание метода двух термоприемников является неполным, если исходить из работ указанных выше авторов.
- Согласно (Ярышев Н.А.) определение температуры среды данным методом становится затруднительным, если измеряемые температуры обоих термоприемников становятся близкими по своей величине.
- Без пояснения причин отмечается, что в точках пересечения кривых, описывающих изменение эмпирических температур термоприемников во времени, выведенная формула метода становится непригодной для расчета температуры окружающей среды.
- Поэтому представляет практический интерес выявление указанных причин с указанием возможных способов их устранения.

# Математическая модель составного термометра с двумя идеальными чувствительными элементами

основе математической модели составного термометра лежат уравнения, записанные для каждого из двух чувствительных элементов

$$\begin{cases} m_1 \bar{c}_1(\theta_1(t)) \dot{\theta}_1(t) = \bar{\alpha}_1(t) \Sigma'_1 (T(t) - \theta_1(t)) + W_{\varepsilon 1}(t), \\ m_2 \bar{c}_2(\theta_2(t)) \dot{\theta}_2(t) = \bar{\alpha}_2(t) \Sigma'_2 (T(t) - \theta_2(t)) + W_{\varepsilon 2}(t). \end{cases} \quad (2)$$

$m$  – масса чувствительного элемента,

$\Sigma'$  – площадь поверхности теплообмена

$\bar{c}(\theta)$  – среднемассовая удельная теплоёмкость

$\theta(t)$  – температура чувствительного элемента

$W_{\varepsilon}(t)$  – электрическая мощность

$\bar{\alpha}(t)$  – среднее значение коэффициента теплоотдачи

$\dot{\theta}(t)$  – скорость изменения температуры чувствительного элемента

$T$  – температура среды

Величины с нижними индексами 1, 2 относятся к чувствительным элементам 1, 2 соответственно.

Система уравнений (2) может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} T - \frac{1}{\bar{\alpha}_1} \frac{m_1 \bar{c}_1(\theta_1) \dot{\theta}_1 - W_{\varepsilon 1}}{\Sigma'_1} = \theta_1, \\ T - \frac{1}{\bar{\alpha}_1} \frac{m_2 \bar{c}_2(\theta_2) \dot{\theta}_2 - W_{\varepsilon 2}}{\kappa \Sigma'_2} = \theta_2. \end{cases} \quad (3)$$

Или в матричной форме записи:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{y} \quad (4)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} T \\ 1/\bar{\alpha}_1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{m_1 \bar{c}_1(\theta_1) \dot{\theta}_1 - W_{\varepsilon 1}}{\Sigma'_1} \\ 1 & -\frac{m_2 \bar{c}_2(\theta_2) \dot{\theta}_2 - W_{\varepsilon 2}}{\kappa \Sigma'_2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Решение матричного уравнения (4) существует в том случае, если детерминант матрицы  $\mathbf{A}$  отличен от нуля

$$\det \mathbf{A} = \frac{m_1 \bar{c}_1(\theta_1) \dot{\theta}_1 - W_{\varepsilon 1}}{\Sigma'_1} - \frac{m_2 \bar{c}_2(\theta_2) \dot{\theta}_2 - W_{\varepsilon 2}}{\kappa \Sigma'_2} \neq 0 \quad (6)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{y}$$

$$\begin{bmatrix} T \\ 1/\bar{\alpha}_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\det \mathbf{A}} \begin{bmatrix} -\frac{m_2 \bar{c}_2(\theta_2) \dot{\theta}_2 - W_{\vartheta 2}}{\kappa \Sigma'_2} & \frac{m_1 \bar{c}_1(\theta_1) \dot{\theta}_1 - W_{\vartheta 1}}{\Sigma'_1} \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\det \mathbf{A}} \begin{bmatrix} \frac{m_1 \bar{c}_1(\theta_1) \dot{\theta}_1 - W_{\vartheta 1}}{\Sigma'_1} \theta_2 - \frac{m_2 \bar{c}_2(\theta_2) \dot{\theta}_2 - W_{\vartheta 2}}{\kappa \Sigma'_2} \theta_1 \\ \theta_2 - \theta_1 \end{bmatrix}$$

$$T = \frac{\theta_2 \left[ m_1 \bar{c}_1(\theta_1) \dot{\theta}_1 - W_{\vartheta 1} \right] / \Sigma'_1 - \theta_1 \left[ m_2 \bar{c}_2(\theta_2) \dot{\theta}_2 - W_{\vartheta 2} \right] / (\kappa \Sigma'_2)}{\left[ m_1 \bar{c}_1(\theta_1) \dot{\theta}_1 - W_{\vartheta 1} \right] / \Sigma'_1 - \left[ m_2 \bar{c}_2(\theta_2) \dot{\theta}_2 - W_{\vartheta 2} \right] / (\kappa \Sigma'_2)} \quad (7)$$

$$1/\bar{\alpha}_1 = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\left[ m_1 \bar{c}_1(\theta_1) \dot{\theta}_1 - W_{\vartheta 1} \right] / \Sigma'_1 - \left[ m_2 \bar{c}_2(\theta_2) \dot{\theta}_2 - W_{\vartheta 2} \right] / (\kappa \Sigma'_2)} \quad (8)$$

$$\bar{\alpha}_2 = \kappa \bar{\alpha}_1 \quad (9)$$

Причины происхождения затруднений при определении температуры окружающей среды методом двух термоприемников, когда измеряемые температуры обоих термоприемников становятся близкими по своей величине

Поскольку коэффициент теплоотдачи может принимать лишь конечные положительные значения, при равенстве нулю детерминанта (6) по формуле (8) должно выполняться равенство:

$$\theta_2 - \theta_1 = 0 \quad (10)$$

Справедливо обратное, когда выполняется равенство (10), из формулы (8) вытекает, что детерминант (6) равен нулю.

В обоих случаях формула (7) приводит к ложному заключению

$$T = \theta_1 = \theta_2$$

Детерминант (6) допускает представление в виде

$$\det \mathbf{A} = \frac{m_1 \bar{c}_1(\theta_1) \dot{\theta}_1 - W_{\varepsilon 1}}{\Sigma'_1} - \frac{m_2 \bar{c}_2(\theta_2) \dot{\theta}_2 - W_{\varepsilon 2}}{\kappa \Sigma'_2} = \frac{d}{dt} \left[ \frac{U_1(\theta_1) - A_{\varepsilon 1}}{\Sigma'_1} - \frac{U_2(\theta_2) - A_{\varepsilon 2}}{\kappa \Sigma'_2} \right] \quad (11)$$

где

внутренняя энергия чувствительных элементов:

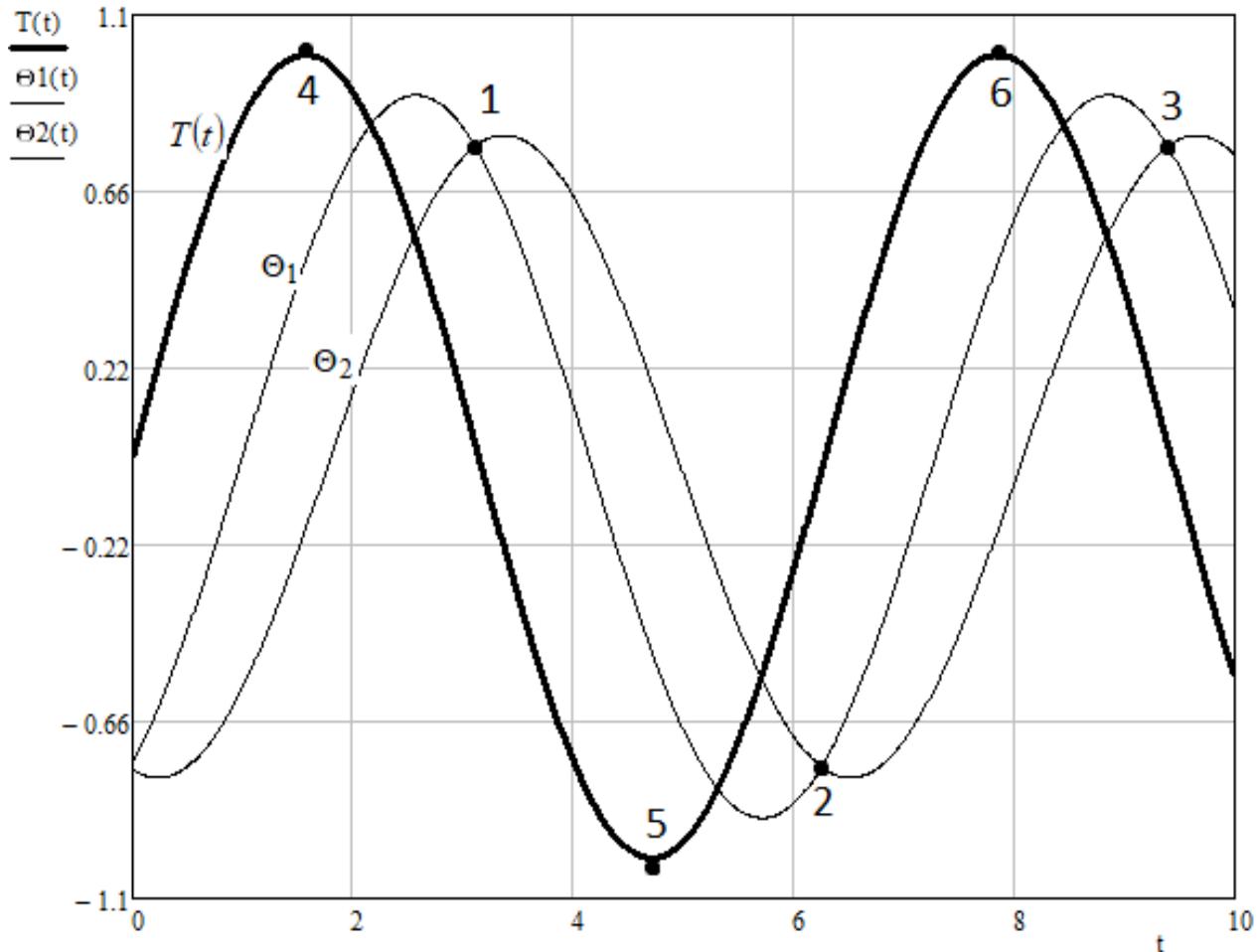
$$U_1(\theta_1) = m_1 \int_{\theta_{10}}^{\theta_1} \bar{c}_1(\theta_1) d\theta_1 + const \qquad U_2(\theta_2) = m_2 \int_{\theta_{20}}^{\theta_2} \bar{c}_2(\theta_2) d\theta_2 + const$$

$\theta_{10}, \theta_{20}$  – начальные температуры в момент времени начала измерений

работа источников электрической энергии, обеспечивающих функционирование термометров сопротивления

$$A_{\varepsilon 1}(t) = \int_0^t W_{\varepsilon 1}(t) dt \qquad A_{\varepsilon 2}(t) = \int_0^t W_{\varepsilon 2}(t) dt$$

Например, в случае периодически изменяемой температуры окружающей среды выражение в квадратных скобках (под знаком дифференцирования) в формуле (11) будет изменяться периодически. Поэтому в моменты времени, когда достигается экстремум (максимум или минимум), детерминант (11) будет обращаться в нуль.



## Предлагаемое техническое решение проблемы

Использовать три чувствительных элемента (по номером I, II, III), например, одинаковой формы и объёма (шарообразные, цилиндрические, плоские и т.п.), но из разных материалов.

Тогда для трёх вариантов пар чувствительных элементов I-II, II-III, I-III) по расчетной формуле (7) будем иметь три возможные комбинации для расчёта температуры окружающей среды и коэффициента теплоотдачи:

$$T_{I-II} = \frac{\theta_{II} [m_I \bar{c}_I (\theta_I) \dot{\theta}_I - W_{\text{эл}I}] - \theta_I [m_{II} \bar{c}_{II} (\theta_{II}) \dot{\theta}_{II} - W_{\text{эл}II}]}{[m_I \bar{c}_I (\theta_I) \dot{\theta}_I - W_{\text{эл}I}] - [m_{II} \bar{c}_{II} (\theta_{II}) \dot{\theta}_{II} - W_{\text{эл}II}]}$$

$$T_{II-III} = \frac{\theta_{III} [m_{II} \bar{c}_{II} (\theta_{II}) \dot{\theta}_{II} - W_{\text{эл}II}] - \theta_{II} [m_{III} \bar{c}_{III} (\theta_{III}) \dot{\theta}_{III} - W_{\text{эл}III}]}{[m_{II} \bar{c}_{II} (\theta_{II}) \dot{\theta}_{II} - W_{\text{эл}II}] - [m_{III} \bar{c}_{III} (\theta_{III}) \dot{\theta}_{III} - W_{\text{эл}III}]}$$

$$T_{I-III} = \frac{\theta_{III} [m_I \bar{c}_I (\theta_I) \dot{\theta}_I - W_{\text{эл}I}] - \theta_I [m_{III} \bar{c}_{III} (\theta_{III}) \dot{\theta}_{III} - W_{\text{эл}III}]}{[m_I \bar{c}_I (\theta_I) \dot{\theta}_I - W_{\text{эл}I}] - [m_{III} \bar{c}_{III} (\theta_{III}) \dot{\theta}_{III} - W_{\text{эл}III}]}$$

$$\kappa = 1$$

$$\Sigma'_I = \Sigma'_{II} = \Sigma'_{III}$$

$$1/\bar{\alpha} = \frac{(\theta_{II} - \theta_I) \Sigma'}{[m_I \bar{c}_I (\theta_I) \dot{\theta}_I - W_{\text{эл}I}] - [m_{II} \bar{c}_{II} (\theta_{II}) \dot{\theta}_{II} - W_{\text{эл}II}]}$$

В этих трёх вариантах расчетной формулы обращение в нуль знаменателей (детерминантов) будет происходить в разные моменты времени. Поэтому вычисление температуры в данный момент времени следует осуществлять по той зависимости у которой знаменатель (детерминант) имеет наибольшее значение по абсолютной величине.



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 851 567<sup>(13)</sup> C1**

(51) МПК  
G01K 13/02 (2006.01)  
G01N 25/18 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

(52) СПК  
G01K 13/02 (2025.08); G01N 25/18 (2025.08)

(21)(22) Заявка: 2025108198, 03.04.2025	(72) Автор(ы): Никулина Виктория Борисовна (RU), Корнеев Владимир Сергеевич (RU), Корнеев Сергей Александрович (RU), Шалай Виктор Владимирович (RU)
(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 03.04.2025	(73) Патентообладатель(и): Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный технический университет" (RU)
Дата регистрации: 25.11.2025	(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: SU 469897 A1, 05.05.1975. SU 1278620 A1, 23.12.1986. SU 1346987 A1, 23.10.1987. EP 424346 B1, 02.08.1995. JPH 3148025 A, 24.06.1991. CN 105548251 B, 08.03.2019.
Приоритет(ы): (22) Дата подачи заявки: 03.04.2025	
(45) Опубликовано: 25.11.2025 Бюл. № 33	
Адрес для переписки: 644050, Омская обл., г. Омск, пр-кт Мира, 11, ФГАОУ ВО "ОмГТУ", Отдел инновационной деятельности, Г-203, Рязанов Аркадий Валентинович	

(54) Способ контактного измерения нестационарной температуры и коэффициента теплоотдачи

(57) Формула изобретения

Способ измерения нестационарной температуры и коэффициента теплоотдачи с помощью контактных чувствительных элементов, включающий использование, например, терморпар одинаковой формы и объема, но из разных материалов, внутри которых смонтирован горячий спай, а также расчетных выражений для последующей обработки сигналов терморпар, отличающийся тем, что для композиции из трех контактных чувствительных элементов посредством формул

RU 2 851 567 C1