

Фрѐлих Т., Хоманн М., Шаллес М.

Технический университет Ильменау, Институт технологических измерений
и технологии датчиков, 100565, 98684 Ильменау

КАЛИБРОВОЧНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ДАТЧИКОВ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

В Институте технологических измерений и технологии датчиков Технического университета Ильменау для калибровки датчиков теплового потока разработан новый калибровочный стенд. Стенд обеспечивает точное измерение температуры по обе стороны датчика теплового потока, на основе которых может быть определен тепловой поток. Для определения температур применяется метод, известный по калибровке контактных термометров для измерения температуры поверхности. На основе значений, измеренных термопарами, распределенными вдоль центральной оси двух усредняющих блоков, экстраполируются температуры поверхности каждого усредняющего блока, и, тем самым, определяются температуры поверхности датчика теплового потока. Температуры поверхности регулируются таким образом, что разность двух температур изменяется в диапазоне от 0 мК до 200 мК. Используя эти разности температур и сигнал датчика, можно определить смещение и чувствительность датчика теплового потока. Построены и откалиброваны на стенде датчики теплового потока на основе термопар и датчики на основе поперечного эффекта Зеебека.

Ключевые слова: датчик теплового потока, калибровка, температура поверхности

A new calibration bench was developed at the Institute for Process Measurement and Sensor Technology of Technische Universität Ilmenau to calibrate heat flux sensors (HFS). The bench provides well known temperatures at both sides of the HFS, from which the heat flux can be determined. The temperatures are determined using a method known from the calibration of contact surface thermometers. By means of the values measured by thermocouples distributed along the central axis of two homogenization blocks, the surface temperatures of each homogenization block, and thereby the surface temperatures of the HFS, are extrapolated. The extrapolated surface temperatures are controlled in a manner that the difference between the two temperatures changes in the range of 0 mK to 200 mK. Using these temperature differences and the sensor signal, the offset and the sensitivity of the HFS can be determined. HFS based on thermopiles and HFS based on the transversal seebeck-effect were constructed calibrated at the bench.

Key words: heat flux sensor, calibration, surface temperature

Введение

Тепловые датчики для потока проводящей природы обычно калибруются на калибровочных стендах методом изолированной горячей плиты [1]. Этот метод требует знания величины теплового потока через испытуемый датчик. Тепловой поток обычно создается нагревателем с одной стороны датчика, измеряется посредством определения разности

температур на пластине известной геометрии, и теплопроводности и рассеивается теплоотводом с другой стороны датчика. Одним из основных требований данного метода является однонаправленный поток от источника тепла через испытуемый датчик, что может быть обеспечено полностью. Калибровочный стенд, представленный в данной статье, использует другой подход. Для определения характеристик испытуемого датчика исследуется температура его поверхности.

Конструкция и принцип работы

Калибровочный стенд

Калибровочный стенд представляет собой осесимметричную конструкцию, состоящую из двух извилистых нагревателей и двух цилиндрических усредняющих блоков (сталь 1.4301) с интегральными термопарами К-типа, окруженными изоляцией из щелочно-земельной силикатной ваты (рис. 1). Усредняющие блоки имеют диаметр 76 мм и высоту 25 мм. Геометрия воздушного промежутка между блоками зависит от геометрии испытуемого датчика. Мощность нагревателей в верхней части верхнего и в нижней части нижнего усредняющего блока можно регулировать индивидуально и нагревать стенд в температурном диапазоне от 20 °С до 400 °С.

Три термопары в каждом усредняющем блоке используются для экстраполяции на температуру поверхности блоков с помощью метода квадратного многочлена. Этот метод известен по калибровке контактных термометров для измерения температуры поверхности [2]. При помощи данного метода температуры поверхности усредняющих блоков и датчиков теплового потока, соответственно, определяются и используются в качестве регулируемой переменной. Нагреватели позволяют регулировать температуры таким образом, что разность экстраполированных температур поверхности изменяется от $\Delta T = 0$ мК до $\Delta T = \pm 200$ мК. Установлено, что разность температур 200 мК достаточно велика, чтобы получить сигнал, поддающийся вычислению, и достаточно мала, чтобы получить не очень большую деформацию теплового поля.

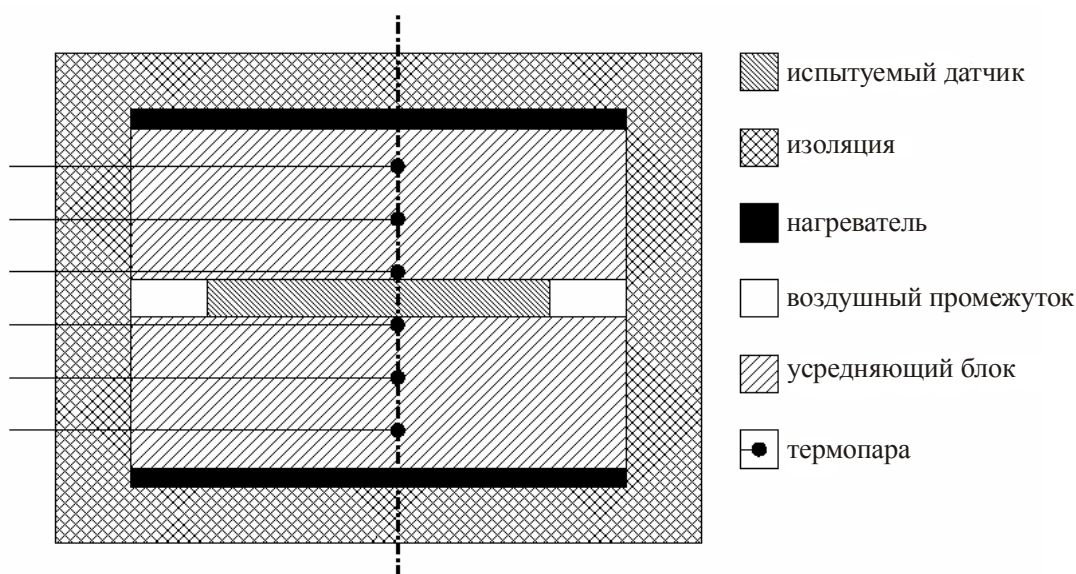


Рис. 1. Конструкция калибровочного стенда.

Принцип работы

Цель калибровки – определить чувствительность S и смещение U_0 характеристики (1) датчика теплового потока, где ΔT – разность температур между верхней и нижней частью датчика теплового потока

$$U_{HFS} = U_0 + S \cdot \Delta T. \quad (1)$$

Каждая из температур определяется с погрешностью за счет измерения температур и неизвестного температурного поля на поверхности датчика теплового потока:

$$U_{HFS} = U_0 + S \cdot [(T_{upper} + E_{upper}) - (T_{lower} + E_{lower})]. \quad (2)$$

Чтобы компенсировать влияние этих погрешностей, для определения $S(\Delta T)$ используются два значения разности температур $T_{upper} - T_{lower}$ (a и b). Предположив, что погрешности E постоянны или изменяются незначительно, $S(\Delta T)$ можно определить, используя два сигнала U и четыре температуры T :

$$\begin{aligned} U_{HFS,a} &= U_0 + S \times [(T_{upper,a} + E_{upper}) - (T_{lower,a} + E_{lower})], \\ U_{HFS,b} &= U_0 + S \times [(T_{upper,b} + E_{upper}) - (T_{lower,b} + E_{lower})], \\ S(\Delta T) &= \frac{U_{HFS,a} - U_{HFS,b}}{(T_{upper,a} - T_{lower,a}) - (T_{upper,b} - T_{lower,b})}. \end{aligned} \quad (3)$$

Чтобы определить смещение U_0 , датчик теплового потока необходимо переключить при одной температуре или изменить полярность электрического соединения с измерительным прибором:

$$\begin{aligned} U_{HFS,plus} &= U_0 + S \times [(T_{upper} + E_{upper}) - (T_{lower} + E_{lower})], \\ U_{HFS,minius} &= U_0 + S \times [(T_{lower} + E_{lower}) - (T_{upper} + E_{upper})], \\ U_0 &= \frac{U_{HFS,plus} + U_{HFS,minius}}{2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Чтобы получить чувствительность как функцию теплового потока \dot{q} , используется одномерная формулировка закона Фурье

$$\dot{q} = -\lambda \nabla T, \quad (5)$$

где λ – теплопроводность. При допущении одномерной теплопроводности и постоянного градиента температуры по длине l датчика получим:

$$\dot{q} = -\frac{\lambda}{l} \Delta T. \quad (6)$$

При использовании уравнений (3) и (6), чувствительность $S(\dot{q})$ описывается уравнением:

$$S(\dot{q}) = \frac{l}{\lambda} \cdot \frac{U_{HFS,a} - U_{HFS,b}}{(T_{upper,a} - T_{lower,a}) - (T_{upper,b} - T_{lower,b})}. \quad (7)$$

Теплопроводность и толщина зависят от температуры, но их изменениями в небольшом температурном интервале 200 мК можно пренебречь.

Испытуемые датчики

Испытуемые датчики были созданы в Институте технологических измерений и технологии датчиков Технического университета Ильменау. Один из них создан на основе термобатарей, что является известным принципом для датчиков теплового потока [3], а второй – на основе поперечного эффекта Зеебека [4, 5]. Оба типа датчиков имели одинаковые геометрические параметры – диски диаметром 54 мм и высотой 1.5 мм.

Датчики теплового потока на основе термобатарей

Датчики состоят из двух колец термобатарей типа *E*, термически соединенных параллельно и последовательно – электрически. Эти так называемые термобатареи имеют 25 спаев на внутреннем кольце и 35 спаев на внешнем кольце и монтируются на опоре из стеклокерамики ($\lambda = 1.72 \text{ Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$, рис. 2). Для исследования влияния наполнителя (теплопроводящее соединение, $\lambda = 3 \text{ Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$) были созданы датчики с наполнителем и без него.

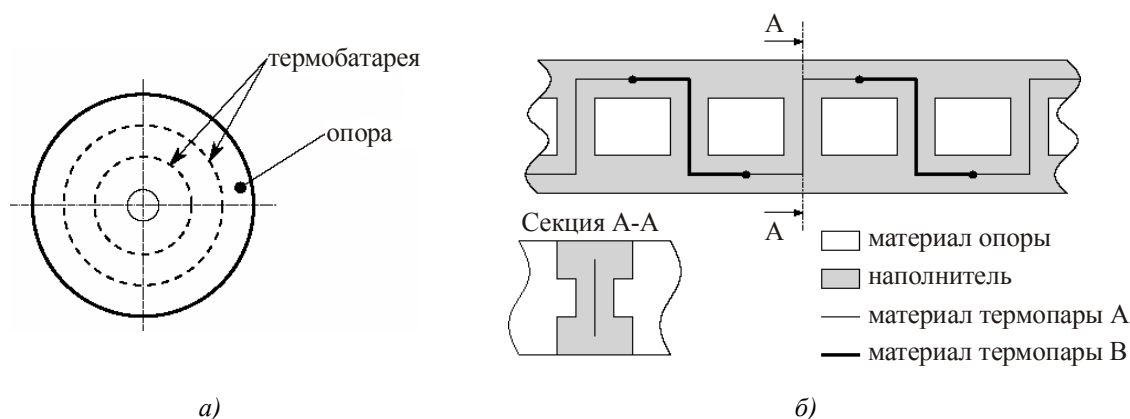


Рис 2. Конструкция датчика теплового потока и поперечное сечение вдоль одной термобатареи.

Теоретическая чувствительность $S(\dot{q})$

$$S(\dot{q}) = \frac{n \cdot S_{TC}(T) \cdot l_j}{\lambda} \quad (8)$$

зависит от чувствительности $S_{TC}(T)$ термопары типа *E*, расстояния между спаями l_j , теплопроводности и числа n термопар в термобатарее [3]. Чувствительность $S(\Delta T)$

$$S(\Delta T) = n \times S_{TC}(T) \quad (9)$$

зависит только от $S_{TC}(T)$ и n .

Для расчета теоретической чувствительности была использована эквивалентная электрическая схема [2]. С помощью этой модели и значений $S_{TC}(T)$ из [6] для различных температур была определена чувствительность (Табл. 1).

Таблица 1

Теоретическая чувствительность датчика теплового потока на основе термобатарей

термобатарея	60 °C		100 °C		150 °C	
	$S(\Delta T)$, мкВ·К ⁻¹	$S(\dot{q})$, мкВ·Вт ⁻¹ ·м ²	$S(\Delta T)$, мкВ·К ⁻¹	$S(\dot{q})$, мкВ·Вт ⁻¹ ·м ²	$S(\Delta T)$, мкВ·К ⁻¹	$S(\dot{q})$, мкВ·Вт ⁻¹ ·м ²
25 с наполнителем	56.96	406.83	58.61	418.55	60.53	432.26
35 с наполнителем	79.66	568.28	81.96	584.66	84.64	603.81
25 без наполнителя	40.42	194.97	41.59	200.59	42.95	207.16
35 без наполнителя	56.51	272.20	58.14	280.05	60.05	289.22

Датчик теплового потока на основе поперечного эффекта Зеебека

Основной частью датчиков является сплошной диск, образованный слоями *NiCr* и *CuNi*, уложенными в стопу. Эти металлы (материал для термопары типа *E*) сварены диффузионной сваркой и разрезаны на диски под углом 45° (рис. 3).

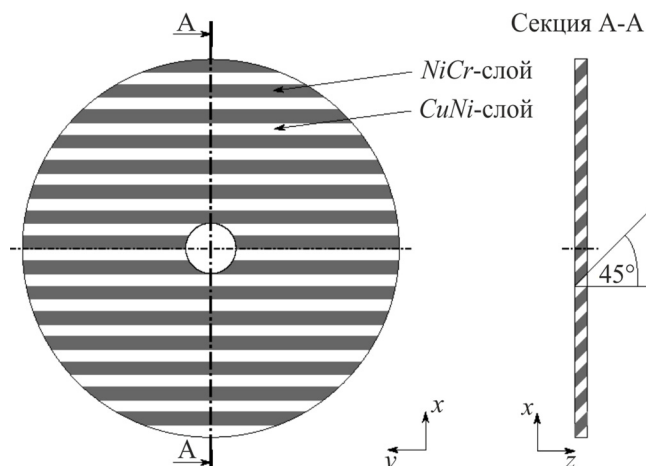


Рис. 3. Конструкция датчика теплового потока из искусственного анизотропного материала.

В этом искусственном анизотропном материале коэффициент Зеебека σ и теплопроводность λ являются тензорами второго порядка определяемые уравнениями (10) и (11), где λ_{\parallel} и σ_{\parallel} описывают свойства материала вдоль, а λ_{\perp} и σ_{\perp} – перпендикулярно основной оси стопы [5].

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{\parallel} \cos^2 \alpha + \sigma_{\perp} \sin^2 \alpha & 0 & \frac{1}{2}(\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}) \sin(2\alpha) \\ 0 & \sigma_{\parallel} & 0 \\ \frac{1}{2}(\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}) \sin(2\alpha) & 0 & \sigma_{\parallel} \cos^2 \alpha + \sigma_{\perp} \sin^2 \alpha \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{\parallel} \cos^2 \alpha + \lambda_{\perp} \sin^2 \alpha & 0 & \frac{1}{2}(\lambda_{\parallel} - \lambda_{\perp}) \sin(2\alpha) \\ 0 & \lambda_{\parallel} & 0 \\ \frac{1}{2}(\lambda_{\parallel} - \lambda_{\perp}) \sin(2\alpha) & 0 & \lambda_{\parallel} \cos^2 \alpha + \lambda_{\perp} \sin^2 \alpha \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Сигналом датчика служит электрическое поле E , создаваемое термоЭДС внутри датчика

$$E = \sigma \cdot \nabla T, \quad (12)$$

интегрированного вдоль направления измеряемого напряжения,

$$U_x = \int_0^d \left((\sigma_{\parallel} \cos^2 \alpha + \sigma_{\perp} \sin^2 \alpha) \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{1}{2}(\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}) \sin(2\alpha) \frac{\partial T}{\partial z} \right) dx \quad (13)$$

в данном случае x .

При допущении одномерной теплопроводности в направлении z с постоянным градиентом, получим сигнал датчика как функцию разности температур ΔT в направлении z .

$$U_x = \frac{1}{2}(\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}) \sin(2\alpha) \frac{d}{l} \Delta T_z. \quad (14)$$

Итак, теоретическая чувствительность $S(\Delta T)$ зависит от анизотропии термоЭДС $(\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp})$, секущего угла α , диаметра d и толщины l датчика. Кроме того, теоретическая

чувствительность $S(\dot{q})$ зависит от теплопроводности λ в направлении z

$$S(\Delta T) = \frac{U_x}{\Delta T_z} = \frac{1}{2}(\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}) \sin(2\alpha) \frac{d}{l}, \quad (15)$$

$$S(\dot{q}) = \frac{U_x}{\dot{q}_z} = \frac{(\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}) \sin(2\alpha) d}{(\lambda_{\parallel} \cos^2 \alpha + \lambda_{\perp} \sin^2 \alpha) l}. \quad (16)$$

В отличие от датчиков теплового потока на основе термопар, теоретическая чувствительность этой конструкции зависит от большего числа свойств материала. Помимо вышеупомянутых свойств, электрическое удельное сопротивление используется для определения σ_{\parallel} [5]. Поскольку эти свойства материала точно не известны и в литературе можно встретить несколько разных значений, нами было выполнено моделирование чувствительности методом Монте-Карло с использованием значений, приведенных в табл. 2 с возможным отклонением $\pm 20\%$ от каждого из них.

Таблица 2

Свойства материалов NiCr и CuNi [2], [7], [8], [9].

материал	σ , мкВ·К ⁻¹	λ , Вт·м ⁻¹ К ⁻¹	γ , мкОм ⁻¹ м ⁻¹
NiCr	28.07	19.0	1.4
CuNi	-42.05	25.29	2.0

В результате такого моделирования определены минимальные и максимальные ожидаемые значения чувствительности при трех температурах, приведенные в табл. 3. Большое различие между минимальными и максимальными ожидаемыми значениями можно объяснить нелинейным соотношением свойств материала в модели (10). Рассчитанные значения определяют диапазон, в котором должны лежать результаты калибровки, чтобы считаться достоверными.

Таблица 3

Минимальная и максимальная теоретическая чувствительность датчика теплового потока на основе поперечного эффекта Зеебека.

Значение	60 °С		100 °С		150 °С	
	$S(\Delta T)$, мкВ·К ⁻¹	$S(\dot{q})$, нВ·Вт ⁻¹ м ²	$S(\Delta T)$, мкВ·К ⁻¹	$S(\dot{q})$, нВ·Вт ⁻¹ м ²	$S(\Delta T)$, мкВ·К ⁻¹	$S(\dot{q})$, нВ·Вт ⁻¹ м ²
минимальное	0.46	0.06	0.52	0.07	0.56	0.08
максимальное	421.80	59.89	441.74	62.83	467.90	66.44

Свойства стенда

Стабильность температур поверхности

Каждая из экстраполированных температур поверхности регулируется, соответственно, PID-контроллером. Эти контроллеры способны удерживать заданное значение, но с колебаниями с периодом около 300 сек и величиной менее 30 мК (рис. 4). Эти колебания вызваны периодическим изменением температуры воздуха в лаборатории, поперечной чувствительностью двух контроллеров и отсутствием активного охлаждения. Тем не менее, такое качество контролируемых температур для калибровки достаточно, поскольку при калибровке возможны интервалы интегрирования 600 секунд.

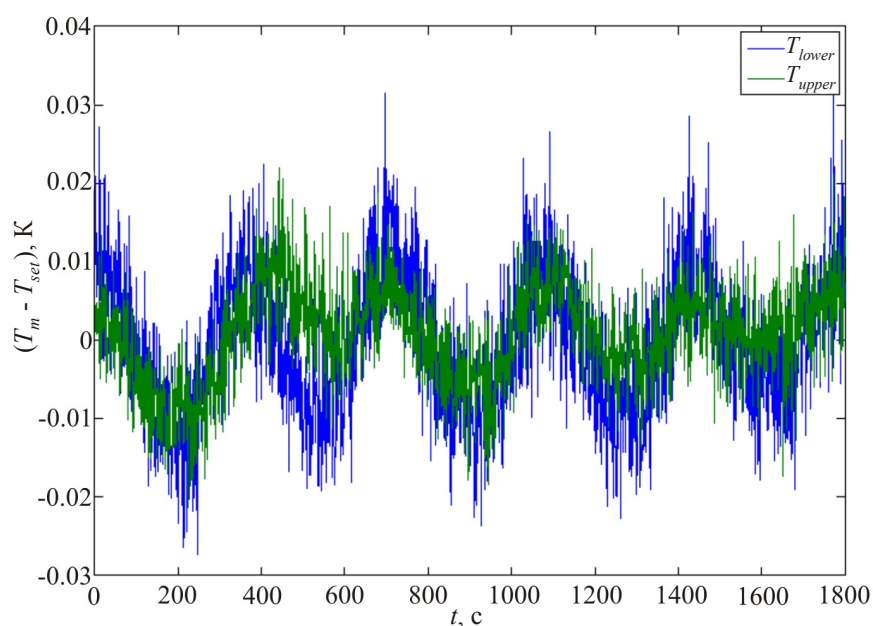


Рис 4. Разность температур между заданной температурой T_{set} и измеренными температурами поверхности T_m верхнего и нижнего усредняющего блока в стационарном режиме.

Осевое распределение температуры

На рис. 5 показано осевое распределение температуры в блоках во время калибровки при $T_{set} \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ при разности температур $T_{upper} - T_{lower} = 100 \text{ мК}$. В каждом блоке распределение температуры описывается квадратичной зависимостью. Отклонение от линейного распределения вызвано наличием теплообмена с другим блоком и потерями тепла через неидеальную изоляцию. Распределение температур на обоих блоках является показателем влияния тепловых контактных сопротивлений между датчиком теплового потока и поверхностями блоков.

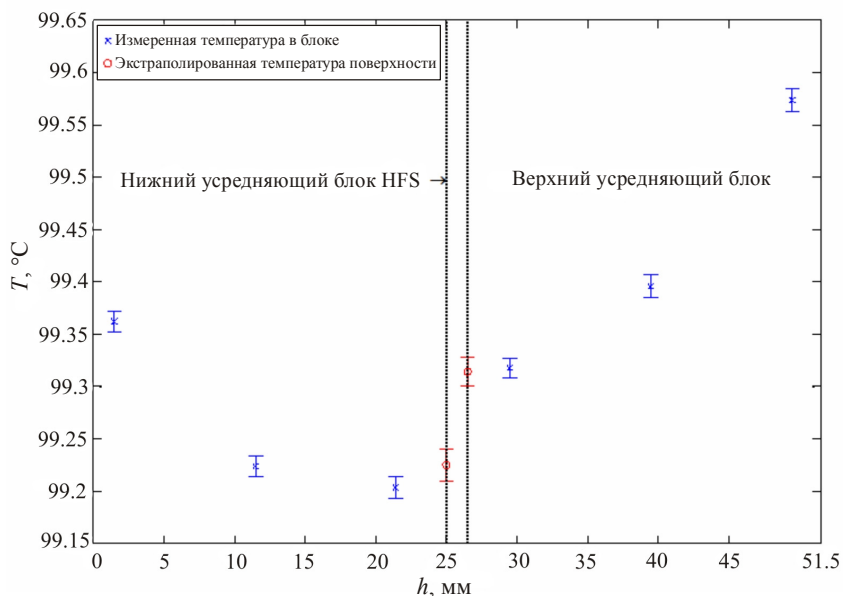


Рис. 5. Аксиальное распределение температуры от высоты $h = 0 \text{ мм}$ (низ) до $h = 51.5 \text{ мм}$ (верх) стенда при $T_{set} \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ и разности температур $T_{upper} - T_{lower} = 100 \text{ мК}$. Величины погрешностей соответствуют стандартному отклонению температур (2500 точек данных).

Однородность температурного поля

С целью определения однородности температурного поля с обеих сторон датчика теплового потока, использовалась термопара для измерения температур поверхности в нескольких точках. Для этого был изготовлен макет датчика теплового потока с радиальным пазом, в который была вставлена термопара. Для каждой серии измерений макет поворачивался на 45° . При каждом повороте термопара перемещалась в пазу от центра наружу на 2.5 мм. Такое измерение проводилось в стационарном режиме температур поверхности при 60°C . Результаты (рис. 6) показывают, что абсолютная разность температур на каждой поверхности имеет величину 160 мК. Различие между измеренным температурным полем и типичным с градиентом в радиальном направлении можно объяснить формой нагревателей. В связи с неравномерным притоком тепла температурное поле деформируется, что было смоделировано методом конечных элементов (рис. 7).

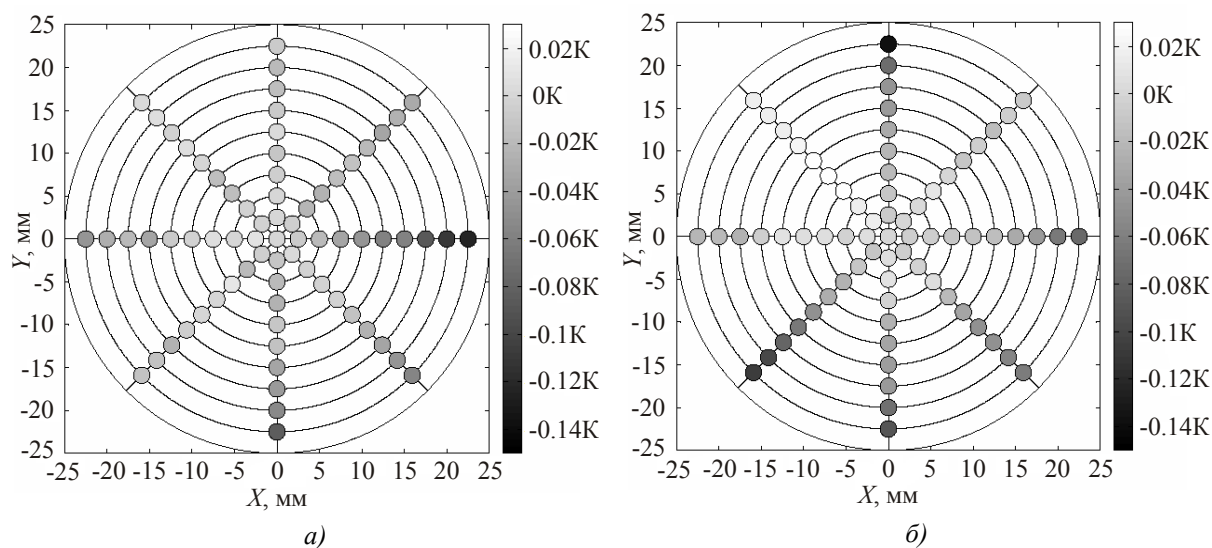


Рис. 6. Температурное поле на поверхности верхнего (а) и нижнего (б) усредняющего блока при $T_{set} = 60^\circ\text{C}$. (показано отклонение от экстраполированной температуры поверхности в центре).

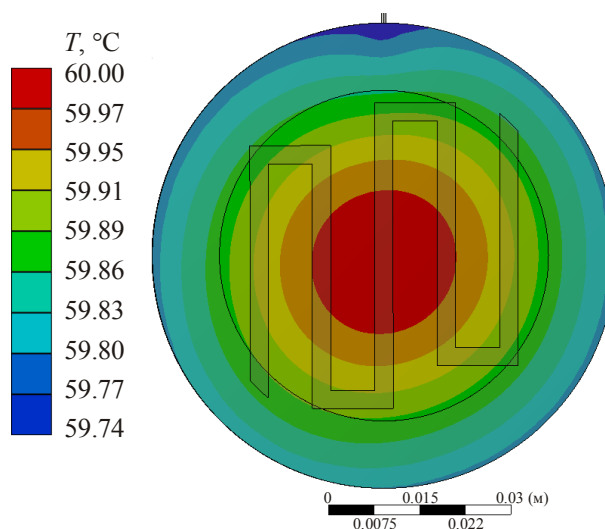


Рис. 7. Моделирование методом конечных элементов температурного поля, вызванного неоднородным притоком тепла. Показаны усредняющий блок, нагреватель и положение датчика теплового потока.

Результаты калибровки

Датчики теплового потока на основе термобатарей

В связи с продолжительным интервалом интегрирования в каждой точке, на калибровку при одной температуре уходит около 5 часов. За это время производятся замеры в 5 точках для калибровки (рис. 8, рис. 9). Для определения чувствительности эти точки аппроксимируются полиномом первой степени методом наименьших квадратов, что удовлетворяет уравнению (3). Смещение происходит в следствие различия температуры, вызванных калибровкой термопары внутри усредняющих блоков.

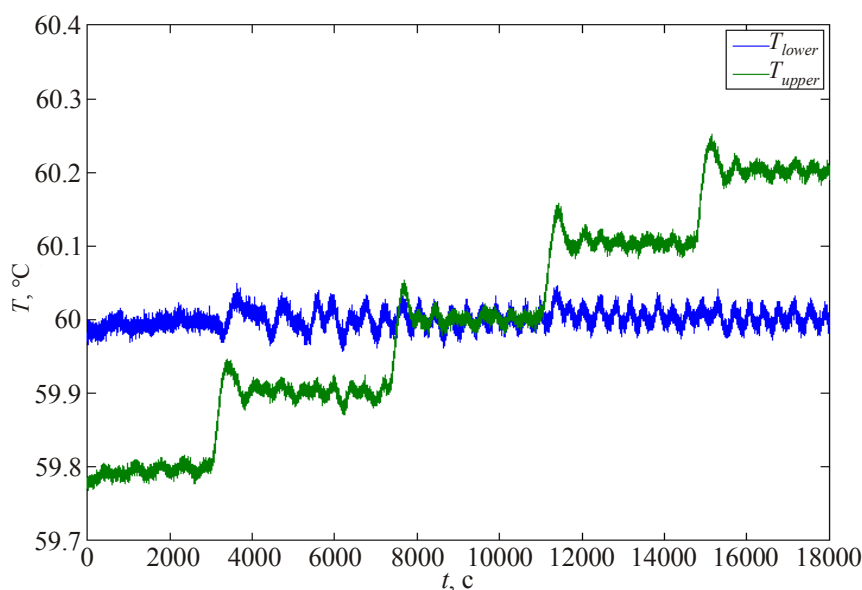


Рис. 8. Изменяемые значения температур во время калибровки около 60 °C.

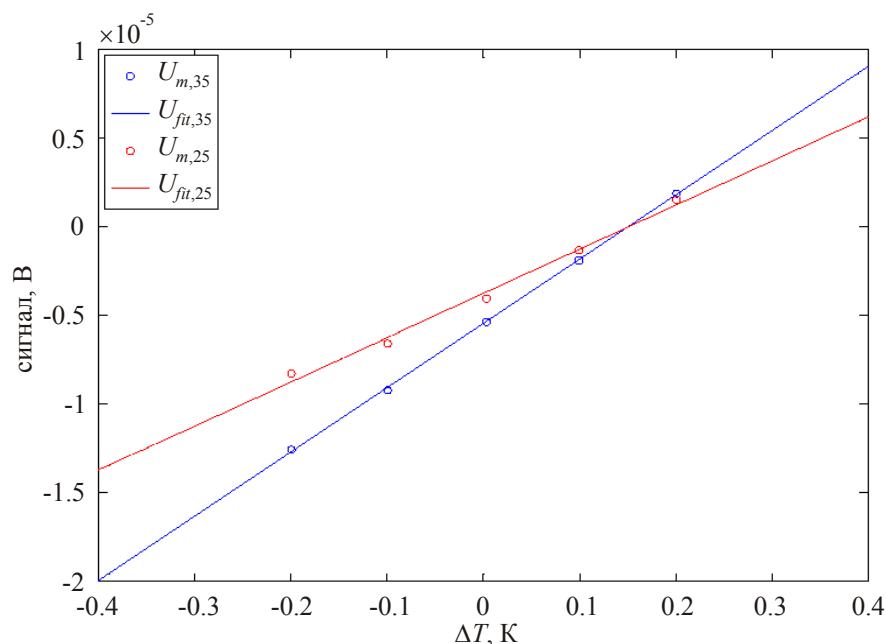


Рис. 9. Сигналы датчика во время калибровки около 60 °C: U_m – измеренный сигнал каждой термобатареи, U_{fit} – аппроксимированный многочлен первой степени, из которого определяется чувствительность.

Большие различия между рассчитанными и измеренными значениями (табл. 4) вызваны тепловыми сопротивлениями между датчиком теплового потока и поверхностями блоков. Эти сопротивления вряд ли могут быть измерены, но они присутствуют в реальном устройстве. В связи с этим измеренные чувствительности могут использоваться в устройстве, если свойства поверхности и контактные силы сравнимы с условиями калибровки.

Таблица 4

Измеренная чувствительность датчика теплового потока на основе термобатарей

термобатарея	60 °C		100 °C		150 °C	
	$S(\Delta T)$, мкВ·К ⁻¹	$S(\dot{q})$, мкВ·Вт ⁻¹ ·м ²	$S(\Delta T)$, мкВ·К ⁻¹	$S(\dot{q})$, мкВ·Вт ⁻¹ ·м ²	$S(\Delta T)$, мкВ·К ⁻¹	$S(\dot{q})$, мкВ·Вт ⁻¹ ·м ²
25 с наполнителем	25.52	182.27	28.56	203.95	29.91	213.59
35 с наполнителем	36.63	261.31	36.64	261.37	38.66	275.80
25 без наполнителя	27.19	131.15	30.22	145.75	32.34	155.98
35 без наполнителя	41.14	198.17	46.60	224.43	50.31	242.31

Результаты измерения чувствительности S_m и ее сравнение с теоретической S_t (табл. 5) показывают, что относительная погрешность

$$E_r = \frac{S_m - S_t}{S_t} \cdot 100$$

снижается при повышении температуры и отсутствии наполнителя в датчике теплового потока. Это свидетельствует о влиянии контактного сопротивления. Эти контактные сопротивления более влияют на чувствительность, чем теплопроводность через воздух или керамический наполнитель. Кроме того, влияние теплопередачи за счет излучения усиливается при более высоких температурах, когда между термобатареями и поверхностью усредняющих блоков есть только воздух.

Таблица 5

Относительная погрешность чувствительности.

	60 °C	100 °C	150 °C
термобатарея	$E_r, \%$	$E_r, \%$	$E_r, \%$
25 с наполнителем	-55.20	-51.27	-50.59
35 с наполнителем	-54.02	-55.30	-54.32
25 без наполнителя	-32.73	-27.34	-24.70
35 без наполнителя	-27.20	-19.85	-16.22

Датчики теплового потока на основе поперечного эффекта Зеебека

Для данной калибровки применялась такая же температурная последовательность, как показано на рис. 8. Результаты также свидетельствуют о смещении в связи с калибровкой термопар внутри нормализующих блоков.

Измеренные значения чувствительности приведены в табл. 6, где свойства материала для расчета $S(\dot{q})$ были использованы из табл. 2. Значения чувствительности находятся в ожидаемом диапазоне, и наблюдается рост чувствительности с повышением абсолютной температуры.

Таблица 6

Измеренная чувствительность датчика теплового потока
на основе поперечного эффекта Зеебека.

60 °C		100 °C		150 °C	
$S(\Delta T)$, мкВ·К ⁻¹	$S(\dot{q})$, нВ·Вт ⁻¹ ·м ²	$S(\Delta T)$, мкВ·К ⁻¹	$S(\dot{q})$, нВ·Вт ⁻¹ ·м ²	$S(\Delta T)$, мкВ·К ⁻¹	$S(\dot{q})$, нВ·Вт ⁻¹ ·м ²
4.93	0.68	5.50	0.75	6.09	0.83

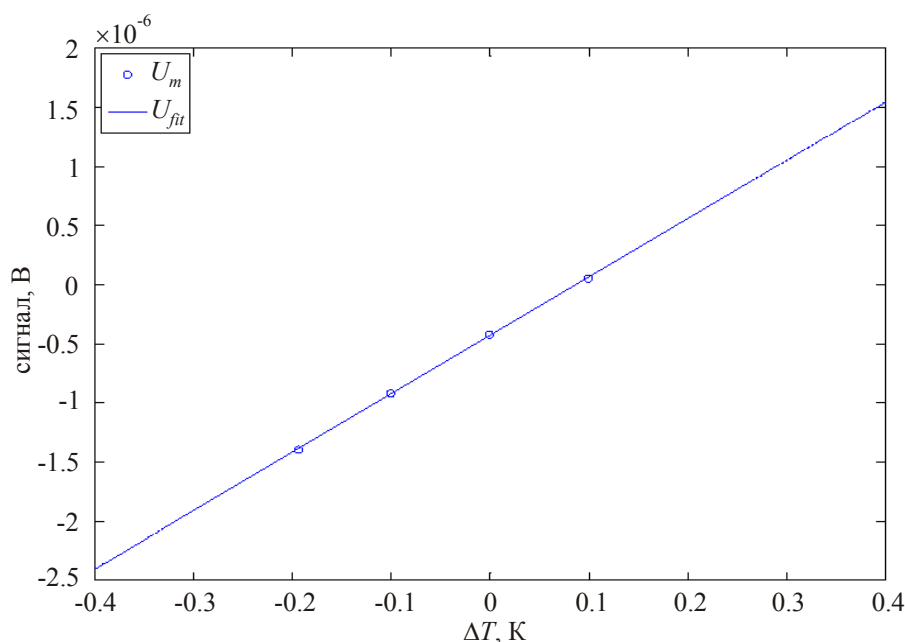


Рис. 10. Сигналы датчика при калибровке около 60 °C: U_m – измеренный сигнал, U_{fit} – аппроксимированный многочлен первой степени, определяющим чувствительность.

Выводы и перспективы

Разработан, построен и испытан новый стенд для калибровки датчиков теплового потока. Измерены тепловые свойства стенда, такие как температурная стабильность, аксиальное и радиальное распределение температуры. Как показывают результаты, стенд может применяться для калибровки датчиков теплового потока при небольших потоках тепла. Были откалиброваны два типа датчиков. Сравнение измеренных чувствительностей с их теоретическими значениями показывает, что каждое измерение датчиком теплового потока необходимо тщательно проверять из-за тепловых контактных сопротивлений. Первая серия калибровок от 60 °C до 150 °C уже проведена, проводится испытание при температурах вплоть до 400 °C.

Благодарность

Авторы выражают благодарность Федеральному министерству образования и научных исследований Германии за финансовую поддержку VIP-проекта “TempKal”, в рамках которого был разработан данный калибровочный стенд.

Литература

1. F.Arpio, M.Dell'Isola, G.Ficco, L.Iacomini, V.Fernicola, Design of a Calibration System for Heat Flux Meters, *International Journal of Thermophysics* 32(11 – 12), 2727 – 2734 (2011).
2. F.Bernhard (Ed.), *Technische Temperaturmessung* (Berlin: Springer-Verlag, 2004).
3. P.R.N.Childs, J.R.Greenwood, C.A.Long, Heat Flux Measurement Techniques. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* (1999), p. 655 – 677
4. Andrey V.Mityakov, Sergey Z.Sapozhnikov, Vladimir Y.Mityakov, Andrei A.Snarskii, Maxim I.Zhenirovsky, Juha J.Pyrhönen, Gradient Heat Flux Sensors for High Temperature Environments, *Sensors and Actuators A: Physical* 176,1 – 9 (2012).
5. K.Fischer, C.Stoiber, A. Kyarad, H.Lengfellner, Anisotropic Thermopower in Tilted Metallic Multilayer Structures, *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 78, 323 – 326 (2004).
6. DIN EN 60584-1: Thermopaare. Teil 1: Grundwerte der Thermospannung (1996)
7. ASTM, Standard Specification and Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples, 2003.
8. O.Madelung and G.K.White (Ed.): *Landolt-Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik: Gruppe III: Kristall- und Festkörperphysik. Bd. 15: Metalle: Elektronische Transportphänomene, Teilband c: Wärmeleitfähigkeit von reinen Metallen und Legierungen* (Berlin Heidelberg New York Paris Tokyo Hong Kong Barcelona Budapest: Springer, 1991).
9. J.R.Davis, *Heat-Resistant Materials*, ASM Specialty Handbook (Materials Park Ohio: ASM International, 1997).

Поступила в редакцию 19.02.2015.