УДК 536.08 ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ ПЛОТНОСТИ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА В ДИАПАЗОНЕ ОТ 5 ДО 2500 кВт/м² С.М. Осадчий, Б.Г. Потапов

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл. osm@vniiftri.ru

В ФГУП «ВНИИФТРИ» разработан и аттестован на соответствие обязательным метрологическим и техническим требованиям к содержанию и применению государственного эталона «Государственный эталон единицы плотности радиационного теплового потока в диапазоне от 5 до 2500 кВт/м²». Выполнена калибровка серии датчиков теплового потока. Проведено сравнение результатов калибровки датчика, выполненного на эталоне ГЭТ 197-2011 ФГУП «ВНИИОФИ», с калибровкой, выполненной на разработанном эталоне при плотности радиационного теплового потока 5 кВт/м².

The FSUE VNIIFTRI has been developed and certified for compliance with the mandatory metrological and technical requirements for the content and use of the state standard "State Standard of the unit for the density of radiation heat flux in the range from 5 to $2500 \text{ kW}/\text{m}^2$ ". The series of heat flow sensors has been calibrated. The results of the calibration of the sensor made on the GET 197-2011 reference FSUE "VNIIOFI" were compared with the calibration performed on the developed standard with the density of the radiation heat flux of 5 kW/m².

Ключевые слова: радиационный тепловой поток, датчик радиационного теплового потока, радиометр-калориметр

Измерение плотности радиационных тепловых потоков высокой значение интенсивности имеет большое ЛЛЯ экспериментальных исследований и технологических процессов. Во многих странах для метрологического обеспечения этой области измерений созданы эталоны единицы плотности радиационного теплового потока. Например, верхний предел калибровочных возможностей NIST (США) ограничивается значением диапазона 100 кВт/м² [1]. В России для Государственного первичного специального эталона единицы плотности радиационного теплового потока (ГЭТ 197-2011 ФГУП «ВНИИОФИ») верхний предел составляет 5 кВт/м² [2]. В ФГУП «ВНИИФТРИ» в 2015г. был разработан и Государственный создан исходный эталон единицы плотности радиационного теплового потока в диапазоне от 5 до 2500 кBт/м² (регистрационный номер эталона 3.1.ZZT.0159.2015.) и исследованы его метрологические характеристики. Эталон соответствует уровню исходного по ГОСТ 8.525-85 [2].

Существенной проблемой для разработки эталона является создание источника мощного теплового потока в лабораторных условиях. Источник должен обеспечивать стабильность излучения во времени и однородность

плотности потока на площади, превышающей размер приёмной площадки калибруемых датчиков. Тепловые потоки высокой интенсивности создаются с помощью установки, блок-схема которой изображена на рисунке 1.



Рис. 1. Блок-схема установки для калибровки датчиков теплового потока

Эллиптическое зеркало отражателя фокусирует тепловые лучи от дуги газоразрядной лампы высокого давления и формирует тепловой поток высокой интенсивности. Однако сфокусированный поток обладает высокой неоднородностью и не пригоден для калибровки датчиков. Для получения однородного теплового потока в установке используется кварцевый Геометрия световода рассчитана таким образом, световод. чтобы перераспределить плотность потока равномерно по сечению. Тепловые лучи фокусируются на входной торец световода. Войдя в световод, лучи испытывают на боковых гранях полное внутреннее отражение и не могут выйти наружу. После многократных отражений плотность тепловых лучей выравнивается по сечению световода, и на выходе тепловой поток обладает высокой степенью однородности. Типичный график распределения плотности теплового потока после прохождения через световод представлен на рисунке 2. Тепловой поток был просканирован датчиком с входной диафрагмой диаметром 1 миллиметр. На рисунке 2 представлены отклонения плотности в процентах от среднего арифметического значения по двум координатам перпендикулярным направлению теплового потока.

Альманах современной метрологии, 2017, № 12



Рис. 2. Поперечное распределение плотности теплового потока по координатам X и после прохождения через кварцевый световод

Неоднородность плотности теплового потока $\delta_{\text{неодн.}} = 2,0$ %.

Для калибровки датчиков в зону воздействия лучей теплового потока на выходе световода последовательно устанавливаются измерительный радиометр-калориметр и калибруемый датчик. Напряжение сигнала датчика ставится в соответствие измеренной плотности теплового потока.

Радиометр-калориметр измеряет плотность теплового потока методом замещения электрической мощностью. Радиометр-калориметр в разрезе показан на рисунке 3.



Рис. 3. Радиометр-калориметр для измерения теплового потока методом замещения электрической мощностью

Внутри медного корпуса на теплоотводящем стержне расположен медный приёмник теплового потока. Стержень, на концах которого закреплены спаи дифференциальной термопары, выполняет роль термосопротивления для регистрации кондуктивного теплового потока от приёмника на корпус. Тепловые лучи попадают внутрь медного полостного приёмника и нагревают его. На приёмнике также находится электрический нагреватель, подключенный к управляемому источнику напряжения. Суммарный поток тепла от поглощённого излучения и нагревателя стекает по теплопроводящему стержню на корпус радиометра-калориметра. Управляющая программа по сигналу дифференциальной термопары управляет нагревателем так, чтобы кондуктивный поток тепла по стержню Для стабильной работы радиометра-калориметра был постоянным. температура корпуса поддерживается постоянной с помощью водяного термостата. Нестабильность температуры корпуса не превышает 0,1 °С. Альманах современной метрологии, 2017, № 12

Таким образом, в отсутствие теплового потока мощность нагрева максимальна. Когда в приёмник радиометра-калориметра начинают поступать тепловые лучи, программа автоматически уменьшает мощность нагрева, обеспечивая постоянную температуру теплоприёмника и неизменный отвод тепла на термостабилизированный корпус. Снижение электрической мощности нагревателя равно мощности радиационного теплового потока, попавшего в полость теплоприёмника через входную диафрагму. На рисунке 4 приведён график сигнала датчика теплового потока и график изменения электрической мощности нагревателя, демонстрирующий алгоритм работы радиометра-калориметра.



Рис. 4. Калибровка датчика теплового потока с помощью радиометр-калориметра, использующего метод замещения электрической мощностью

Величина снижения уровня электрической мощности позволяет рассчитать величину теплового потока. Для вычисления теплового потока оператор выделяет на графике мощности участок для вычисления мощности нагревателя без потока и участок для вычисления мощности нагревателя с потоком. Мощности нагревателя усредняются по выбранным участкам. По известной площади входной диафрагмы S и средним значениям электрической мощности P₁ и P₂ вычисляется тепловой поток q по формуле (1):

$$q = \frac{P_1 - P_2}{s}.$$
 (1)

Также оператор выделяет участок на графике сигнала датчика. Напряжение сигнала V усредняется по выбранному участку. По измеренным данным рассчитывается чувствительность датчика К по формуле (2):

$$K = \frac{V}{q}.$$
 (2)

Калибровка датчика заключается в определении среднего значения чувствительности при нескольких плотностях теплового потока внутри рабочего диапазона датчика.

В неисключённую систематическую погрешность эталона (НСП) входят следующие составляющие: погрешность измерения электрической мощности нагревателя; погрешность измерения площади диафрагмы; погрешность расчета коэффициента поглощения излучения в полости теплоприёмника; предел допускаемой неоднородности плотности теплового потока; стабильность теплового потока.

Электрическая мощность нагревателя измеряется путем перемножения напряжения на нагревателе и тока через него. Напряжение и ток измеряются вольтметром с встроенным сканером. Погрешность измерения мощности нагревателя радиометра-калориметра складывается из погрешности измерения напряжения $\delta_{\text{напр}}$ и погрешности измерения тока $\delta_{\text{ток}}$. Эти погрешности зависят от значения измеряемой величины. Верхняя оценка этих погрешностей для вольтметра GDM-78255A со сканером GDM-SC1 составляет $\delta_{\text{напр}} = 0,01$ % и $\delta_{\text{ток}} = 0,2$ %.

Измерения диаметра входной диафрагмы проводились по четырём направлениям через 45° на микроскопе Mitutoyo MF, зав. № 450102. Среднее значение диаметра составило 4,081 мм с погрешностью $\pm 0,015$ мм. Относительная погрешность расчёта площади диафрагмы $\delta_{\rm S}$ составила 0,75 %.

Внутренняя поверхность теплоприёмника зачернена. Теоретическая оценка доли поглощенного излучения с учётом формы теплоприёмника даёт единицу с погрешность δ_{ν} равной 0,4 %.

Для измерения стабильности плотности радиационного теплового потока использовался датчик ДРТП-1, быстродействие которого выше, чем у радиометра-калориметра. Сигнал датчика был измерен 10 раз с интервалом 1 минута. Результаты измерений представлены в таблице 1. По результатам измерений вычислено среднее значение напряжения получаемого с приемника, равное 4082,6 мкВ. В колонке «Отклонение» показано отклонение сигнала от среднего значения в процентах.

N⁰	Напряжение, мкВ	Отклонение, %
1	4062	-0,50
2	4086	0,08
3	4082	-0,01
4	4089	0,16
5	4090	0,18
6	4082	-0,01
7	4085	0,06
8	4087	0,11
9	4078	-0,11
10	4085	0,06

Таблица 1

Нестабильность плотности теплового потока $\delta_{\text{нестаб.}}$ по результатам измерений составила 0,5 %.

Доверительную границу НСП в соответствии с ГОСТ 8.381-2009 для доверительной вероятности равной 0,95 оценивают по формуле (3):

$$HC\Pi = 1,1 \cdot \sqrt{\delta_{\text{Hamp}}^{2} + \delta_{\text{TOK}}^{2} + \delta_{\text{S}}^{2} + \delta_{\gamma}^{2} + \delta_{\text{HeogH}}^{2} + \delta_{\text{Hecta6}}^{2}}.$$
 (3)

Численный расчёт даёт значение НСП, равное 2,5 %.

Для оценки СКО воспроизведения плотности радиационного теплового потока измерено десять значений мощности нагревателя калориметра без теплового потока и десять значений мощности нагревателя с включённым тепловым потоком. Каждое значение мощности усреднялось за 30 секунд. Для каждой пары значений мощности рассчитана плотность теплового потока. Значения полученных плотностей теплового потока приведены в таблице 2.

т	~ ~	0
1	аолица	1 Z

N⁰	Плотность тепл. потока, кВт/м ²	N⁰	Плотность тепл. потока, кВт/м ²
1	1246,6	6	1246,5
2	1249,8	7	1249,4
3	1245,0	8	1246,3
4	1245,3	9	1244,9
5	1247,9	10	1242,1

По результатам измерений среднее арифметическое значение плотности теплового потока составило 1246,38 кВт/м², СКО соответственно 2,28 кВт/м² или 0,18 %.

разработанного Для сравнения 3.1.ZZT.0159.2015 эталона с Государственным первичным специальным эталоном единицы плотности радиационного теплового потока в диапазоне 1000 – 5000 Вт/м² ГЭТ 197-2011 (ФГУП «ВНИИОФИ») была проведена калибровка датчика теплового потока ДРТП-15/10-30, зав. № 08 на двух эталонах. Чувствительность датчика при потоке 5 кВт/м² по первичному эталону мкВ·м² 156 расширенной ГЭТ 197-2011 составила с суммарной кВт неопределённостью (коэффициент охвата k=2) 2 %. Калибровка датчика на разработанном эталоне при 5 кВт/м2 даёт значение чувствительности 155 <u>мкВ·м²</u> с суммарной расширенной неопределённостью (коэффициент охвата k=2) 3,2 %. Расхождение калибровок, выполненных на двух эталонах, не превышает заявленной неопределённости.

Существуют различные конструкции датчиков для измерения тепловых потоков высокой плотности [4,5]. Проблемой при разработке таких датчиков является их сильный разогрев, вплоть до испарения материала при плотностях потока выше 1000 кВт/м² [6]. Большие температурные градиенты в датчиках приводят к значительному технологическому разбросу чувствительности, и требуется индивидуальная калибровка каждого датчика. Результаты калибровки датчика ДРТП-15/7-2000 при потоках высокой плотности потока приведены в таблице 3.

Таблица 3 Чувствительность, Радиометр-калориметр, Напряжение с $MKB \cdot M^2/KBT$ $\kappa BT/m^2$ датчика, мкВ 243,8 672 2,756 2,759 702 1937 1306 3610 2,764

2,737

Проведенные исследования подтверждают заявленные метрологические характеристики эталона, а опыт эксплуатации эталона в течение двух лет демонстрирует устойчивую работу разработанного эталона в диапазоне от 5 до 2500 кВт/м².

5550

2028

Альманах современной метрологии, 2017, № 12

Литература

- 1. A.V. Murthy, B.K. Tsai, R.D. Saunders. Comparative Calibration of Heat Flux Sensors in Two Blackbody Facilities// Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, v. 104, p. 487 (1999).
- 2. ФГУП «ВНИИОФИ» http://www.vniiofi.ru/depart/m4/get197-2011.html.
- 3. ГОСТ 8.525-85 «ГСИ. Установки высшей точности для воспроизведения единиц физических величин. Порядок разработки, аттестации, регистрации, хранения и применения».
- 4. Sujay Raphael-Mabel, Thomas E. Diller, Brian Vickand, Scott Huxtable, Design and Calibration of a Novel High Temperature Heat Flux. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2005.
- 5. О.А. Геращенко. Основы теплометрии. Киев: Наукова думка, 1971 г.
- 6. Ю.С. Протасов, М.В. Кутырев, Ю.Ю. Протасов, Т.С. Щепанюк, Регистрация вакуумного ультрафиолетового излучения высокой плотности мощности// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, серия «Естественные науки», № 1, 2009.
- 7. Р.Ш. Еналеев, И.В. Красина, В.С. Гасилов, О.А. Тучкова, Л.И. Хайруллина. Измерение высокоинтенсивных тепловых потоков// ВЕСТНИК КТУ, т. 16, № 15, 2013, с. 298-302.