

С. И. Ковтун, Л. В. Декуша

Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

The paper discusses Reproduction unit density of the heat flow and to determine its value, using basic principles of physics, analyzed the sources of error in each of the cases. Also subjects relating to the reference base of heat flux measurement are covered.

Ключевые слова: единство измерений, сенсоры теплового потока, эталонная установка, метрологическое обеспечение.

Постановка проблемы

Информация об интенсивности теплового потока важна для решения множества задач, значимых в приоритетных направлениях развития науки и техники. Наиболее удобным для оценки теплового состояния и сопоставления результатов измерения является удельное значение теплового потока, а именно — его поверхностная плотность, единицей измерения которой принят Вт/м².

Обеспечение единства измерений поверхностной плотности теплового потока, как и любой другой физической величины, должно включать в первую очередь нормативную базу (стандарты, методики измерения и т. д.), второй составляющей является наличие метрологических средств высшей точности — эталонов для воспроизведения и хранения единицы измерения данной физической величины и передачи ее размера рабочим средствам измерения. Что касается нормативно-методической базы теплотрии, то здесь разработан, в том числе и сотрудниками ИТТФ, целый ряд документов, включая национальные (ДСТУ) и межгосударственные (ГОСТ), а также гармонизированы с международными (ДСТУ ISO, ДСТУ EN) стандарты Украины, регламентирующие общие требования к методам и средствам измерения тепловых величин. При этом эталонная база для контактных средств измерения поверхностной плотности теплового потока в Украине фактически отсутствует.

Анализ последних достижений и публикаций

На государственном уровне вопросами единства измерений плотности теплового потока занимаются, по нашим сведениям, Национальный институт стандартов и технологий (NIST) в США и Национальная организация TNO в Нидерландах [1–4]. Так, например, в США для метрологического обеспечения тепловых измерений разработана схема калибровок сенсоров плотности тепло-

вого потока, которая показывает прослеживаемость поверяемых сенсоров (радиометров и преобразователей типа Гардона и Шмидта-Боэлтера) к национальному эталону, в качестве которого применен высокоточный криогенный радиометр (НАСР) [4].

Формулировка цели статьи

Проанализировать возможные варианты способов воспроизведения поверхностной плотности теплового потока для обеспечения прослеживаемости результатов измерения в соответствии с требованиями Закона Украины “Про метрологію та метрологічну діяльність”.

Изложение основного материала

Воспроизвести и измерить единицу плотности теплового потока можно несколькими способами, используя основные положения физики, рассмотренными ниже.

Согласно закону Стефана–Больцмана, плотность потока теплового излучения, воспроизводимой источником теплового излучения (далее — ИТИ) на поверхности исследуемого сенсора, определяется выражением:

$$q = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \varphi_{1-2} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4), \quad (1)$$

где — приведенная степень черноты; φ_{1-2} — угловой коэффициент; σ — постоянная Стефана–Больцмана; T — температура, индексом “1” обозначена излучающая поверхность ИТИ, а индексом “2” — поверхность ПТП.

Современный уровень развития термометрии обеспечивает высокую точность задания и измерения значений температуры T_1 и T_2 . Постоянная Стефана–Больцмана является фундаментальной физической константой, значение которой $\sigma = 5,670400 \cdot 10^{-4}$ Вт/(м²·К⁴) известно с высокой точностью [2], поэтому основная погрешность из-

мерения плотности теплового потока зависит от погрешности определения терморadiационных характеристик поверхностей ПТП и ИТИ. В настоящее время эти значения определяются с погрешностью более 1 %.

По теории теплопроводности плотность теплового потока через слой однородного материала пропорциональна градиенту температуры (закон Фурье):

$$q = -\lambda \cdot (\partial T / \partial x) = -\lambda \cdot (T_2 - T_1) / h, \quad (2)$$

где λ — коэффициент теплопроводности слоя, участвующего в теплообмене; $\partial T / \partial x$ — градиент температуры; h — толщина слоя.

Основными составляющими погрешности данного способа являются: погрешность измерения температуры и линейных размеров теплопроводящего слоя, погрешность определения коэффициента теплопроводности, которая в настоящее время для рабочих эталонов теплопроводности составляет порядка 3 % [3].

Основываясь на измерении электрических величин, эталонированная плотность теплового потока может быть создана посредством подведения электрической мощности W заданного значения к источнику теплоты, имеющего конечные геометрические размеры, и определяется формулой:

$$q = W/A, \quad (3)$$

где A — площадь рабочей поверхности источника теплоты.

Учитывая современный уровень развития измерений электрических и геометрических величин, данный метод задания и измерения нормированного значения плотности теплового потока представляется наиболее перспективным.

При подведении теплового потока посредством конвекции с известным значением коэффициента теплообмена α , создаваемого на поверхности преобразователя, рассчитать нормированное значение плотности теплового потока можно с применением закона Ньютона-Рихмана:

$$q = \alpha \cdot \Delta T. \quad (4)$$

Однако обеспечить точность задания и поддержания значения коэффициента теплообмена весьма затруднительно, поэтому использовать данный способ для прецизионного воспроизведения единицы измерения не рекомендуется.

Для обеспечения единства измерений необходимо иметь документально подтвержденную прослеживаемость эталона единицы измерения поверхностной плотности теплового потока к национальным эталонам, эталонам других государств или международных эталонов соответствующих единиц измерения.

Наиболее близким государственным эталоном является первичный эталон единицы энергетической освещенности некогерентным излучением ДЕТУ 11–01–96 разработанный и созданный в 1996 году ННЦ “Институт метрологии” [4]. Эталон предназначен для воспроизведения и передачи единицы плотности потока оптического излучения в диапазоне от 10 Вт/м^2 до 10^5 Вт/м^2 со средним квадратичным отклонением результата измерения, не превышающим $0,25 \cdot 10^{-2}$, при этом граница не исключенной относительной систематической погрешности не превышает $0,3 \cdot 10^{-2}$ [5]. Эталон, метрологические характеристики которого отвечают существующему мировому уровню в области оптико-физических измерений, возглавляет государственную поверочную схему для средств измерения энергетической освещенности тепловым и солнечным излучением в Украине [6]. Средством передачи единицы энергетической освещенности служит абсолютный приемник теплового излучения. Государственный эталон ДЕТУ 11–01–96 покрывает достаточно широкий динамический диапазон и метрологически обеспечивает измерения потоков теплового излучения. Что же касается эталонной базы для обеспечения измерений поверхностной плотности теплового потока плоскими преобразователями, то на сегодняшний день в ИТТФ создан метрологический комплекс, предназначенный для воспроизведения, хранения и передачи размера соответствующей единицы измерения [7].

Метрологический комплекс состоит из эталонных средств, среди которых такие:

- 1) эталонная установка УВТ-1 с кондуктивным подводом тепловой энергии, реализующая способ воспроизведения единицы измерения по электрической мощности (см. формулу (3)); основными узлами УВТ-1 являются: тепловой блок для обеспечения заданного режима измерения, электронный блок для задания и контроля тепловых параметров теплового блока и сбора первичной информации, эталонная мера сопротивления, а также стабилизированный блок питания и контрольно-измерительные приборы. Эталонная установка позволяет исследовать метрологические характеристики плоских сенсоров теплового потока;
- 2) комплект эталонных преобразователей теплового потока с улучшенными метрологическими характеристиками, выполненных по ДСТУ 3756 [8].

Аттестация комплекса осуществлялась путем экспериментально-расчетных исследований метрологических характеристик эталонной установки УВТ-1 и комплекта эталонных преобразователей теплового потока. По результатам исследований установлено, что метрологический комплекс обеспечивает воспроизведение значений единицы измерения поверхностной плотности теплового потока в диапазоне $(0,1–20) \text{ кВт/м}^2$ при температуре

300 К до 473 К со средним квадратичным отклонением результата измерений, не превышающим 0,15 % и в пределах неисключенной систематической погрешности $\pm 0,18$ %; расширенная неопределенность составила 0,36 %, что соответствует современному мировому уровню в области тепловых измерений.

В обеспечении прослеживаемости метрологического комплекса к государственному эталону в виду различия способа воспроизведения тепловой энергии в эталонной установке и в ДЕТУ 11–01–96 существуют некоторые затруднения. Для реализации их сличение необходимо создавать компаратор, который позволит исследовать характеристики как плоских преобразователей, так и приемников теплового излучения.

Следует отметить, что, исходя из способов реализации единицы измерения в Вт/м², возможны альтернативные пути построения калибровочной цепочки, восходящей одновременно к нескольким государственным эталонам. В случае реализации воспроизведения единицы по закону Фурье (2) возможна привязка к государственным эталонам, обеспечивающим получение значений коэффициента теплопроводности, температуры и линейных размеров. В случае реализации воспроизведения по электрической мощности (3) — к эталонам электрических величин и линейных размеров. В итоге оценка результата измерений будет включать всю совокупность неопределенностей, которые обеспечивают каждый из задействованных в калибровочной цепи эталонов.

Выводы

Для выполнения требований положений Закона Украины “О метрологии и метрологической деятельности” эталонная база Украины для метрологического обеспечения теплоточных измерений сегодня как никогда остро нуждается в реконструкции и модернизации. Достигнутый на данный момент уровень метрологических характеристик эталонной установки и комплекта эталонных преобразователей теплового потока дает основания для рассмотрения и утверждения метрологического комплекса в качестве первичного эталона, что непременно станет весомым шагом в обеспечении единства измерений поверхностной плотности теплового потока в Украине.

Список литературы

[1] Holmberg D. A progress report on the NIST convective heat flux calibration facility / David G. Holmberg, Carole A. Womeldorf // Proceedings of the 5th ASME/JSME Joint

thermal engineering conference. — San Diego, California, 1999. — P. 1–8.

- [2] Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus: ASTM C177–10. — [Acting from 01-Sep-2010]. — ASTM International, 2010. — 23 p. — (International Standard).
- [3] Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus: ASTM C158–10. — [Acting from 01-Sep-2010]. — ASTM International, 2010. — 15 p. — (International Standard).
- [4] NIST MEASUREMENT SERVICES: Heat-Flux Sensor Calibration / Benjamin K. Tsai, Charles E. Gibson, Annageri V. Murthy and others // NIST Special Publication 250–65. — 2004. — 44 p.
- [5] Физические величины: справочник / [Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. [и др.]; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова]. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с. — ISBN5–283–04013–5.
- [6] Соколов Н. А. Метрологическое обеспечение энергосбережения (Измерение теплопроводности и связанных с ней величин): [учебное пособие] / Н. А. Соколов. — С. — Петерб.: НИУПЦ «Межрегиональный институт стекла», 2005. — 128 с.
- [7] Назаренко Л. А. Державний спеціальний еталон одиниці енергетичної освітленості некогерентним випромінюванням / Л. А. Назаренко, В. І. Полевой, Л. І. Бондаренко // УМЖ. — 1995. — Вип. 1. — С. 31–36.
- [8] Бондаренко Л. И., Прокопенко Н. В. Метрологическое обеспечение оптико-физических измерений в системе экологического мониторинга и контроля параметров микроклимата // Вестник ХНАДУ. — 2011. — Вып. 52. — С. 162–166.
- [9] ДСТУ 3193–95. Метрологія. Державна повітряна схема для засобів вимірювань енергетичної освітленості некогерентним випромінюванням. — На заміну ГОСТ 80195–89; чинний від 01.07.1996. — К.: Держстандарт України, 1996. — 18 с.
- [10] Ковтун С. И. Эталонная установка для аттестации преобразователей теплового потока вида вспомогательной стенки: Дисс. канд. техн. наук: 05.11.04 / Ковтун Светлана Ивановна. — К., 2013. — 249 с.
- [11] Енергозбереження. Перетворювачі теплового потоку термоелектричні загального призначення. Загальні технічні умови: ДСТУ 3756–98. — [Чинний від 2000–07–01]. — К.: Держспоживстандарт України, 2000. — 21 с.