



Ensuring the Reliability of Measuring Results of the Heat Flux Density at the Non-Destructive Testing Objects

Vitalii BABAK, Svitlana KOVTUN

Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine, Kiyv, Ukraine
e-mail: vdoe@ukr.net, KovtunSI@nas.gov.ua

Abstract

Heat flow is one of the main informative parameters that is registered with non-destructive testing by the thermal method. The reliability of the results of control directly depends on the metrological support of the appropriate means of measurement. The paper considers methods and means of calibrating heat flow sensors that contribute to improving the accuracy of measuring the informative parameter. In particular, methods for reducing the measurement error for different types of thermal action are considered. Also, the metrological complex for reproducing and transmitting the unit for measuring the surface heat flux density is presented. A hierarchical scheme of verification of heat flux density measuring sensor is proposed, that makes it possible to ensure the reliability of the measurement results when implementing non-destructive testing of objects by the thermal method.

Keywords: heat flux, metrological support, thermal control, hierarchical scheme.

Обеспечение достоверности результатов измерения плотности теплового потока при неразрушающем контроле объектов

Виталий БАБАК, Светлана КОВТУН

1. Введение

Тепловой метод неразрушающего контроля получил широкое распространение благодаря своим преимуществам, среди которых следует отметить его применимость для контроля практически любых объектов из любых материалов, техническое состояние которых можно оценить по неравномерности теплового поля. Метод основан на регистрации возмущений, вносимых дефектами в характер распространения тепловой энергии в объекте контроля, и дальнейшем анализе распределения полей температуры и теплового потока на поверхности объекта контроля в сравнении с таким распределением, характерным для бездефектного состояния объекта. Информативными параметрами, регистрируемыми при исследованиях, являются температура и тепловой поток. Последний характеризует процесс распространения тепловой энергии в объекте контроля, его теплообмен с окружающей средой или другими объектами, а также интенсивность протекающих процессов.

Принцип действия средств теплового контроля основан на взаимодействии теплового поля объекта с термодинамическим чувствительным элементом, в результате чего происходит преобразование параметров поля (интенсивности, температурного градиента и др.) в электрический сигнал. В зависимости от способа взаимодействия средства теплового контроля разделяют на дистанционные и контактные.

Неразрушающий контроль теплового состояния объектов дистанционным методом, как правило, осуществляют с помощью тепловизионной техники [1], с помощью которой инфракрасное излучение преобразовывается в видимый спектр.

Этот вид контроля позволяет оперативно проводить диагностику технического состояния объекта без выведения его из эксплуатации, при этом получают качественное распределение неоднородности температурных и тепловых полей, что не всегда позволяет достоверно оценить состояние объекта, пригодность его к использованию и эксплуатации. Для количественной оценки теплового потока, излучающего объектом контроля при изготовлении или эксплуатации, целесообразно использовать приемники теплового излучения.

При контактной тепловой диагностике и в приборах для контроля теплотехнических параметров и характеристик объектов широко применяют первичные термоэлектрические преобразователи (сенсоры) теплового потока вида вспомогательной стенки. Кроме того в приемниках теплового излучения сенсоры теплового потока используются в качестве чувствительного элемента.

Основной характеристикой сенсоров является коэффициент преобразования, который отражает связь между входным тепловым воздействием на чувствительный элемент сенсора и выходным электрическим сигналом, формирующимся при этом:

$$K = q / E , \quad (1)$$

где K – коэффициент преобразования сенсора, Вт/(м²·мВ);

q – удельное значение теплового потока (поверхностная плотность теплового потока), Вт/м²;

E – значение выходного сигнала сенсора, мВ.

2. Анализ публикаций

Основой метрологического обеспечения средств контроля теплового потока, как и любой другой физической величины, является нормативная база, которая включает стандарты (в Украине это, например: ДСТУ 3193-95, ДСТУ 3401-97, ДСТУ 3756-98, ДСТУ ISO 9869: 2007, ДСТУ-П CEN / TS 1159-4: 2010 и др.), регламентирующих общие требования к методам и средствам измерения тепловых величин, методики измерения и т.д., второй составляющей является материально-техническая база для воспроизведения единицы измерения данной физической величины и передаче ее размера рабочим средствам измерения.

Метрологическим обеспечением теплового потока на государственном уровне активно занимаются в США (Национальный институт стандартов и технологий (NIST)) и в Нидерландах (Национальная организация TNO) [2-5]. Так, например, в США в рамках метрологического обеспечения тепловых измерений действует ряд стандартов (например, ASTM C 177, ASTM C1130, ASTM C1132 и др.), регламентирующих методы и технические средства для калибровки сенсоров теплового потока. Калибровка сенсоров теплового потока происходит по схеме (см. рис. 1), которая иллюстрирует прослеживаемость результатов измерения радиометров и преобразователей типа Гардона и Шмидта-Бозлтера к национальному эталону, в качестве которого применен высокоточный криогенный радиометр (High Accuracy Cringenic Radiometer) [5].

В Украине для средств контроля теплового потока государственным эталоном является первичный эталон единицы энергетической освещенности некогерентным излучением ДЕТУ 11-01-96, разработанный и созданный в ННЦ «Институт метрологии» [6]. Эталон предназначен для воспроизведения и передачи единицы плотности потока оптического излучения в диапазоне от 10 Вт/м² до 10⁵ Вт/м², который реализуется с средним квадратическим отклонением результата измерения, не превышающем 0,25·10⁻², при этом предел неисключенной относительной систематической погрешности составляет 0,3·10⁻² [7]. Эталон, метрологические характеристики которого

соответствуют существующему мировому уровню в области оптико-физических измерений, возглавляет государственную проверочную схему для средств измерений энергетической освещенности тепловым и солнечным излучением в Украине [8]. Средством передачи единицы энергетической освещенности служит абсолютный приемник теплового излучения.



Рис.1. Прослеживаемость калибровки средств измерения теплового потока (США, NIST) [5]

Государственный эталон ДЕТУ 11-01-96 перекрывает достаточно широкий динамический диапазон и метрологически обеспечивает средства контроля потоков теплового излучения.

3. Цель исследования

Целью работы является обеспечение достоверности результатов измерения поверхностной плотности теплового потока при осуществлении неразрушающего контроля объектов тепловым методом с применением контактных средств измерения.

4. Результаты исследований

Достоверность результатов измерения поверхностной плотности теплового потока определяется наличием метрологического обеспечения соответствующих средств измерения.

Для метрологического обеспечения контактных средств контроля теплового потока создан метрологический комплекс, состоящий из таких эталонных средств [9]:

1) теплотрической системы, которая включает тепловые и электронный блоки, а также комплект вторичной аппаратуры для регистрации, визуализации и архивации измерительной информации;

2) комплект эталонных преобразователей (сенсоров) теплового потока, выполненных в соответствии ДСТУ 3756 [10], для передачи размера единицы измерения, воспроизведенной в теплотрической системе, рабочим средствам контроля.

Воспроизведение и передачу размера единицы измерения поверхностной плотности теплового потока осуществляют путем создания в измерительной ячейке теплотрической системы, в которой располагают эталонный сенсор теплового потока, теплового режима, при котором через сенсор проходит стационарный тепловой поток фиксированного значения. В результате сенсором генерируется электрический выходной сигнал, пропорциональный поверхностной плотности теплового потока.

На рис. 2 представлена схема измерительной ячейки теплотрической системы, в которой тепловая энергия к эталонному сенсору подводится кондуктивно (за счет эффекта теплопроводности).

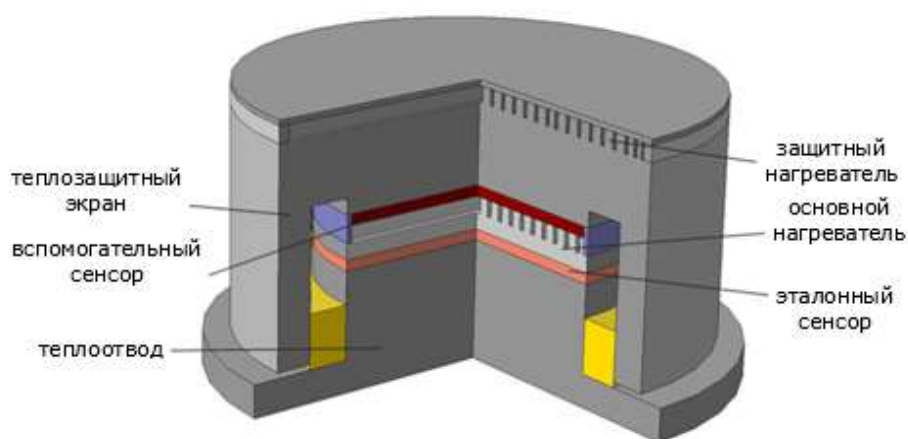


Рис.2. Схема кондуктивной измерительной ячейки теплотрической системы

Данный метод заключается в обеспечении прохождения через эталонный сенсор одномерного стационарного теплового потока при заданном значении температуры и определении его плотности по результатам измерения электрической мощности, подведенной к основному нагревателю системы, сигнала сенсора, генерируемого им при этом, и диаметра тепловоспринимающей поверхности сенсора, соприкасающейся с основным нагревателем. Тепловой поток от основного нагревателя направлен в термостатированный теплоотвод. Для компенсации теплового потока, проходящего через нерабочие поверхности основного нагревателя, в системе предусмотрен защитный нагреватель, мощностью нагрева которого в режиме обратной связи по уровню сигнала вспомогательного сенсора управляет система регулирования. Нулевой уровень сигнала вспомогательного сенсора свидетельствует о наступлении режима полной компенсации.

Значение поверхностной плотности теплового потока определяют при соблюдении адиабатических условий на нерабочих поверхностях основного электрического нагревателя по результатам прямых измерений параметров постоянного тока питания (напряжения и силы тока) и диаметра рабочей поверхности основного нагревателя по формуле:

$$q = U \cdot I / (0,25 \cdot \pi \cdot D^2). \quad (2)$$

Это позволяет определять индивидуальную статическую функцию преобразования абсолютным методом прямых измерений.

В кондуктивной ячейке калибровка сенсоров возможна в динамическом диапазоне 0,02...20 кВт/м². В случае применения сенсоров для контроля целостности и

эффективности теплоизоляции объектов их калибровка должна производиться при более малых значениях поверхностной плотности теплового потока. Для этого в теплотрической системе предусмотрена радиационная измерительная ячейка, позволяющая реализовать динамический диапазон 1...50 Вт/м².

Калибровке сенсоров радиационным методом осуществляется путем подведения к его поверхности теплового излучения фиксированного значения. Сенсор теплового потока при калибровке размещают в измерительной ячейке, которая предусматривает наличие замкнутого пространства, образованного двумя диффузно излучающими поверхностями: источника и стока тепловой энергии, а также защитного экрана.

На рис. 3 приведена схема измерительной ячейки, в которой тепловая энергия к эталонному сенсору подводится посредством излучения. Основными элементами ячейки являются излучатель, термостатированный экран и теплоотвод, на котором установлен сенсор теплового потока. Излучатель вместе с экраном образуют полость, имеет форму кругового цилиндра, элементы которого термостатированы при одинаковой температуре, а на поверхности теплоотвода поддерживается температура, отличная от температуры экрана. Внутренняя поверхность полости является излучающей и служит источником теплового излучения.

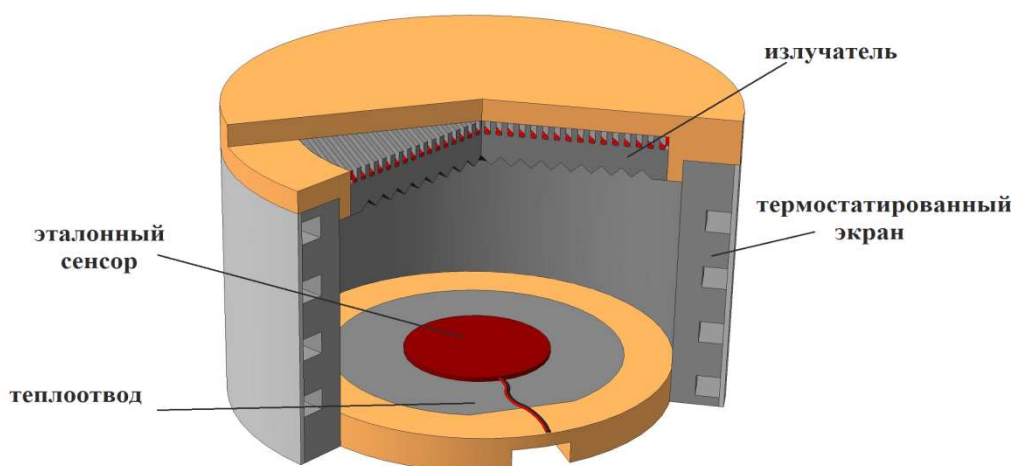


Рис.3. Схема радиационной измерительной ячейки теплотрической системы

Значение поверхностной плотности теплового потока определяют по закону Стефана-Больцмана:

$$q = \varepsilon_{np} \cdot \varphi_{1-2} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4), \quad (3)$$

где ε_{np} ε_{np} – приведенная степень черноты; φ_{1-2} φ_{1-2} – угловой коэффициент; σ – постоянная Стефана-Больцмана; T – температура, индексом “1” обозначена излучающая поверхность, а индексом “2” – поверхность теплоотвода, на которой установлен сенсор.

В теплотрической системе предусмотрена возможность проведения исследований зависимости коэффициента преобразования сенсора от температуры, которую он приобретает при прохождении через него теплового потока определенной плотности.

Набор эталонных сенсоров теплового потока, входящих в комплект метрологического комплекса, предназначен для передачи размера единицы измерения поверхностной плотности теплового потока и проведения исследования неизменности метрологических характеристик теплотрической системы и их стабильности во

времени. Эти сенсоры являются согласно [10] термоэлектрическими биметаллическими многоэлементными (батарейный) сенсорами теплового потока, выполненными как вспомогательная стенка. Принцип их действия основан на применении физической закономерности возникновения разности значений температуры на плоских поверхностях вспомогательной стенки при прохождении через нее теплового потока. Каждый эталонный сенсор является бескорпусной монолитной плоской конструкцией, выполненной в форме дисков диаметром 60 мм и толщиной 2 мм.

По результатам государственной метрологической аттестации теплотрическая система с комплектом эталонных сенсоров теплового потока признаны пригодными к применению в качестве эталонного средства измерительной техники. Основные характеристики метрологического комплекса приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики метрологического комплекса

Теплотрическая система	
Диапазон значений поверхностной плотности теплового потока	0,02...20 кВт/м ²
Диапазон значений плотности потока теплового излучения	1...50 Вт/м ²
Неисключенная систематическая погрешность	0,18 %
Стандартная неопределенность измерений, оцененная по типу А	0,15 %
Стандартная неопределенность измерений, оцененная по типу В	0,10 %
Суммарная стандартная неопределенность	0,18 %
Расширенная неопределенность с доверительной вероятностью 0,95	0,36 %

Эталонные сенсоры теплового потока	
Диапазон измерения плотности теплового потока	0,01 ... 20 кВт/м ²
Границы основной допустимой погрешности измерения	± 1,0%
Коэффициент преобразования при температуре 300 К	0,2 Вт/(м ² ·мВ)
Диапазон значений рабочей температуры	300 ... 500 К
Термостойкость	530 К

Для обеспечения единства измерений поверхностной плотности теплового потока разработана иерархическая схема калибровки и поверки средств измерения теплового потока (см. рис. 4).

Верхний уровень этой схемы отведен Государственному эталону единицы энергетической освещенности некогерентным излучением.

На втором уровне схемы находятся вторичный эталон энергетической освещенности солнечным излучением, а также модульный эталон поверхностной плотности теплового потока, в качестве которого по результатам исследования метрологических характеристик предложено описанный выше метрологический комплекс с присущими ему характеристиками (см. табл. 1).

Третий уровень схемы поверки отведен рабочим эталонам: эталонным сенсорам теплового потока и эталонным теплотрическими системам, реализующим метод компарирования, а четвертый – рабочим средствам измерения: сенсорам теплового потока и приборам на их основе.



Рис.4. Иерархическая схема калибровки и поверки средств измерения теплового потока

Передача размера единицы измерения поверхностной плотности теплового потока от эталона эталонным сенсорам и рабочим сенсорам для прецизионных измерений регламентировано методом прямых измерений со средним квадратическим отклонением результата измерений не более 0,5%. При этом границы допустимой относительной погрешности рабочего эталона равны $\pm 1,0\%$, а рабочего сенсора теплового потока повышенной точности 1,2% до 3%.

Методом непосредственного сличения осуществляется передачи размера единицы измерения теплотметрическим системам, имеющих статус рабочих эталонов. В этом случае среднее квадратическое отклонение результатов сличения с эталоном не должно превышать 0,6%, а границы допустимой относительной погрешности теплотметрических систем находится в интервале от 1,2% до 3,0% с доверительной вероятностью 0,99.

Для передачи размера единицы измерения поверхностной плотности теплового потока от эталонного сенсора рабочим средствам контроля теплового потока установлено метод сличения в компараторе с границами допустимой относительной погрешности метода сличения от 1,0% до 3,0%, а от теплотметрических систем (рабочих эталонов) регламентировано метод прямых измерений с границами суммарной относительной погрешности не более $\pm 1,0\%$. При этом погрешность рабочих средств может составлять от 3% до 6%, а приборов для контроля теплового потока – от 4% до 10%.

5. Выводы

Средства измерения поверхностной плотности теплового потока получили широкое распространение при контроле тепловой нагрузки на элементы конструкций энергетического оборудования, ракетно-космической техники, при оценке теплотерь объектов генерирования, транспортирования и потребления тепловой энергии. Для обеспечения достоверности результатов измерения поверхностной плотности теплового потока создан метрологический комплекс, основные характеристики которого предполагают возможность его применения в качестве эталона, и предложена иерархическая схема поверки средств измерения теплового потока.

Литература

1. Неразрушающий контроль : справочник в 8 т. (под общ. ред. В.В. Клюева. Т.) Кн. 1: В.П. Вавилов. Тепловой контроль. М.: Машиностроение, 2006, 688 с.
2. Holmberg D., C. Womeldorf. A progress report on the NIST convective heat flux calibration facility. Proceedings of the 5th ASME/JSME Joint thermal engineering conference, San Diego, California, 1999, pp.1-8.
3. 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.
4. 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.
5. Tsai B.K., Ch.E. Gibson, A.V. Murthy. NIST Measurement Services: Heat-Flux Sensor Calibration. NIST Special Publication 250-65, 2004, 44 p.
6. Назаренко Л.А., В.І. Полевой, Л.І. Бондаренко. Державний спеціальний еталон одиниці енергетичної освітленості некогерентним випромінюванням. УМЖ, Вип. 1, 1995, с.31–36.
7. Бондаренко Л.И., Н.В. Прокопенко. Метрологическое обеспечение оптико-физических измерений в системе экологического мониторинга и контроля параметров микроклимата. Вестник ХНАДУ, Вып. 52, 2011, с. 162-166.
8. ДСТУ 3193-95. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань енергетичної освітленості некогерентним випромінюванням. Чинний від 1996-07-01, К.: Держстандарт України, 1996, 18 с.
9. Апаратно-програмне забезпечення моніторингу об'єктів генерування, транспортування та споживання теплової енергії: Монографія. В.П. Бабак, В.С. Берегун, З.А. Бурова та ін.; за ред. чл.-кор. НАН України В.П. Бабака, К.: ІТТФ НАН України, 2016, 298 с.
10. ДСТУ 3756-98. Енергозбереження. Перетворювачі теплового потоку термоелектричні загального призначення. Загальні технічні умови. Чинний від 2000-07-01, К. : Держстандарт України, 2000, 21 с.