

УДК 697.133

Методика определения теплообмена через ограждающие конструкции зданий и сооружений

И.П. Якушкин, В.И. Каракеян

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Methods of Determining Heat Loss through Building Envelope of Buildings

I.P. Yakushkin, V.I. Karakeyan

National Research University of Electronic Technology, Moscow

Предложена методика неразрушающего контроля тепловых потоков через ограждающие конструкции зданий и сооружений. Приведены результаты компьютерной и аналитической оценки погрешности измерений. Методика может широко применяться при тепловом обследовании различных объектов.

Ключевые слова: неразрушающий контроль; погрешность измерения; ограждающие конструкции; тепловая защита.

The methods of non-destructive testing of the heat flows through the building envelope of the buildings and structures have been presented. The results of computer and

analytical assessment of the measurements errors have been given. The results of the investigations demonstrate the efficiency of the methods and the possibility of its wide-spread application for thermal inspection of various objects.

Keywords: Non-destructive testing; measurement error; building envelope; thermal protection.

Объективная информация о теплообмене через ограждающие конструкции – одно из условий действенного контроля энергоэффективности зданий и сооружений и ее управления. Получение такой информации в условиях эксплуатации объекта представляет значительные трудности, поэтому количественный анализ тепловых потерь проводится в лабораторных условиях с использованием экспериментально-аналитического подхода, сочетающего математическое описание процессов внутри объекта с расчетом основных теплофизических параметров по экспериментальным данным.

Предлагаемая методика исследования процессов теплообмена через вертикальную ограждающую конструкцию состоит в том, что профиль температуры измеряется с двух ее сторон при контроле температуры внутреннего и наружного воздуха высокоточными термометрами, что позволяет анализировать профиль теплового потока от «теплой» поверхности стены к «холодной». Входными данными при неразрушающем контроле являются следующие параметры: расстояние до объекта, высота, ширина, материал и толщина ограждающих конструкций, температура наружного и внутреннего воздуха, температура внутренней и наружной поверхностей [1, 2]. Для измерений используется тепловизор с высоким разрешением (не менее 320×240 точек), регистрирующий ИК-излучение в диапазоне 7–14 мкм [3]. При съемке создается координатная сетка измеряемого объекта (рисунок), количество элементов которой определяется разрешающей способностью прибора и требуемой точностью измерений.

Для компьютерной обработки результатов измерений рассчитываются тепловые потоки q_{Π} в каждом элементе по известным уравнениям теплопроводности:

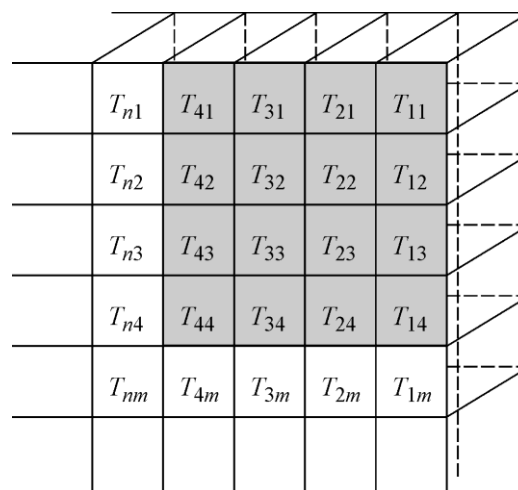
$$q_{\Pi} = \alpha_{\Pi} (T_{\text{в.в}} - T_{\text{в.с}}) = 1,66(T_{\text{в.в}} - T_{\text{в.с}})^{4/3} + \sigma(T_{\text{в.в}}^4 - T_{\text{в.с}}^4), \quad (1)$$

где α_{Π} – коэффициент теплоотдачи на границе воздуха и стенки в помещении; $T_{\text{в.с}}$ – температура внутренней поверхности стенки в помещении, К; $T_{\text{в.в}}$ – температура воздуха внутри помещения, К; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана–Больцмана.

Оценку погрешности определения теплового потока проводили методом статистического компьютерного моделирования и аналитическим методом.

Для реализации первого метода применена программа MS Excel, позволяющая генерировать случайные значения температуры с использованием функции НОРМОБР(слчис(), $T_{\text{ср}}$, σ). Распределение погрешностей измерения температуры подчиняется нормальному закону с математическим ожиданием, равным номинальной величине, и средним квадратичным отклонением $\sim 1/6$ от предельной погрешности измерения. Принимается, что температура внутреннего воздуха и внутренней поверхности стенки в помещении, измеренная с точностью $\pm 0,1$ К при среднем квадратическом отклонении $\sigma_t = 0,033$, равна соответственно $T_{\text{в.в}} = 300$ К и $T_{\text{в.с}} = 296$ К.

Для выбранного набора температур вычисляется суммарный коэффициент теплоотдачи и тепловой поток через элемент конструкции по формуле (1). При повторении аналогичных действий N раз получим статистику теплового по-



Разбивка измеряемой поверхности на элементы и создание координатной сетки

тока через ограждающую конструкцию с его средним значением q_{cp} и средним квадратическим отклонением σ_q .

В результате компьютерного моделирования установлено, что коэффициент вариации вычисленного значения теплового потока составляет $\delta_q = \sigma_q / q_{cp} = 0,012$ при относительной погрешности его определения $\Delta q = 6\sigma_q / q_{cp} = 0,075$ (7,5% от измеряемой величины), что свидетельствует о применимости предложенной методики для инженерных оценок теплового потока через ограждающие конструкции зданий.

При аналитическом методе тепловой поток $q = f(T_{в.в}, T_{в.с})$ не измеряется, а определяется косвенно через значения $T_{в.в}$ и $T_{в.с}$. Тогда

$$\Delta q = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial T_{в.в}} \Delta T_{в.в}\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial T_{в.с}} \Delta T_{в.с}\right)^2}. \quad (2)$$

После подстановки выражения (1) в уравнение (2) получим для теплового потока

$$\Delta q = \sqrt{\left((2,21(T_{в.в} - T_{в.с})^{1/3} + 4\sigma T_{в.в}^3) \Delta T_{в.в}\right)^2 + \left((-2,21(T_{в.в} - T_{в.с})^{1/3} + 4\sigma T_{в.с}^3) \Delta T_{в.с}\right)^2}. \quad (3)$$

В результаты аналитических вычислений по уравнению (3) получаем значение погрешности 7,8%, что приемлемо для инженерных расчетов.

Таким образом, с помощью предлагаемой методики можно оперативно оценить и устранить тепловые потери различных объектов. С учетом актуальности проблемы энергосбережения не вызывает сомнений применимость данной методики к таким объектам контроля, как жилые, общественные и производственные здания и сооружения.

Литература

1. **Фокин В.М., Чернышов В.Н.** Неразрушающий контроль теплофизических характеристик строительных материалов: монография. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 212 с.
2. **Kylilia An., Fokaidesa Pa.A., Christoua P., Kalogiroub A.** Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: review // Applied Energy. – 2014. – Vol. 134. – P. 531–549.
3. **Вавилов В.П.** Инфракрасная термография и тепловой контроль. 2-е изд., доп. – М.: Издательский дом «Спектр», 2013. – 544 с.

Поступило
29 марта 2016 г.

Якушкин Иван Павлович – аспирант кафедры промышленной экологии (ПЭ) МИЭТ. *Область научных интересов:* тепловой контроль, тепловизионная съемка, энергоаудит и энергоманажмент. **E-mail:** ivan@yakushkin.su

Каракеян Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры ПЭ МИЭТ. *Область научных интересов:* безопасность жизнедеятельности, экономика природопользования, экологическое право, мониторинг природно-технических геосистем.