

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ ТЕПЛОвого ПОТОКА ЧЕРЕЗ ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ

DETERMINATION OF ACCURACY OF THE ESTIMATE OF THE HEAT FLOW THROUGH THE BUILDING ENVELOPE

I. Yakushkin

Annotation

Today's high resolution technology is becoming a new trend thermographic nondestructive testing. This requires the development of fast and accurate techniques and post-processing for thermal imaging techniques. This study presents a method of analysis and evaluation of the heat flow through the surface in the building envelope. The method of calculating the estimation error of the heat flow statistical modeling on a personal computer. Similarly, the analytical method used for calculation of the heat flow error. These solutions enable high-precision into account the amount of heat loss, thereby reducing heat emissions into the atmosphere and increase the efficiency of heat consumption systems.

Keywords: Non-destructive thermal control, infrared diagnostics, heat loss, envelope, thermal protection, error.

Якушкин Иван Павлович
Аспирант, ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники"

Аннотация

Современные технологии высокого разрешения становятся новой тенденцией термографического неразрушающего контроля. Это требует разработки быстрых и точных техник и методик постобработки данных для тепловых изображений. В данном исследовании рассмотрен метод анализа и оценки теплового потока через поверхность ограждающей конструкции. Предложен способ расчета погрешности оценки теплового потока статистическим моделированием на персональном компьютере. Так же, применен аналитический метод для расчета погрешности теплового потока. Данные решения позволят с высокой точностью учитывать количество тепловых потерь, что приведет к снижению тепловых выбросов в атмосферу и повысит коэффициент полезного действия теплопотребляющих систем.

Ключевые слова:

Неразрушающий тепловой контроль, инфракрасная диагностика, тепловые потери, ограждающие конструкции, тепловая защита, погрешность.

В любом помещении сохраняется тепловой баланс и для того, чтобы поддерживать температуру и параметры внутреннего воздуха на нужном уровне, необходимо компенсировать все тепловые потери. Согласно [1], на тепловые потери через стены в среднем приходится 32% потерь, на окна и двери – 29%, на кровлю и кровельные конструкции – 24%, на воздухообмен – 9%, на потери через фундамент – около 6%. Данное распределение тепловых потерь в зданиях приведено на рис. 1.

Компенсация тепловых потерь чаще всего производится за счет отопления – 82%, инсоляции (поступления тепла с солнечным излучением) – 12% и так называемых бытовых теплопоступлений (от техники различного назначения, ламп, людей и животных) – 6%.

В зависимости от объекта распределение тепловых потерь может выглядеть другим образом, т.к. свой вклад вносит назначение зданий, окружающая среда, состав и процент остекления ограждающих и ряд других параметров. Так же, в энергетике жилых домов существуют проблемы определения реальных тепловых балансов и учета реально потребленной тепловой энергии на нужды отоп-

ления, кондиционирования или вентиляции.

Стены, окна и двери в большей мере подвержены визуальному и приборному контролю, что позволяет, для

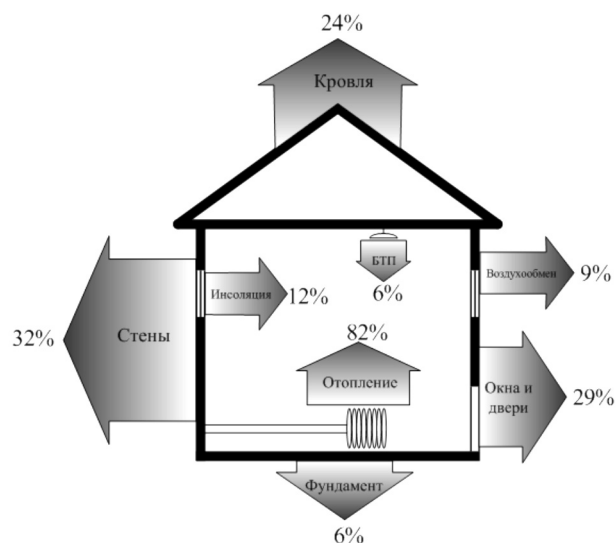


Рисунок 1. Дендрограмма схождения

оценки состояния, использовать различные методики диагностики состояния теплозащиты, в том числе методы теплового неразрушающего контроля.

Неразрушающий контроль – контроль свойств и параметров объекта, при котором не нарушается пригодность объекта к использованию и эксплуатации. Тепловой контроль основан на измерении, мониторинге и анализе температур в контролируемых объектах [2]. Основным условием применения теплового неразрушающего контроля является наличие в контролируемом объекте тепловых потоков. Процесс передачи тепловой энергии, выделение или поглощение тепла приводит к тому, что температура изменяется относительно температуры окружающей среды. Температурное распределение по поверхности объекта является основным параметром в тепловом контроле, так как несет информацию об особенностях процесса теплопередачи, режиме работы объекта, его внутренней структуре и наличии скрытых внутренних дефектов [3].

Для того, чтобы удерживать температуру внутреннего воздуха на нужном уровне с наименьшими затратами, необходимо, чтобы ограждающие конструкции обладали высокими свойствами энергоэффективности. Дополнительным фактором, повышающим энергоэффективность отопления, является составление и регулирование тепловых балансов жилых зданий. Это возможно за счет контроля и обработки актуальной информации о полученной тепловой энергии от источников теплоснабжения, о количестве и структуре расходуемой тепловой энергии и о состоянии теплозащиты жилых зданий, строений и сооружений.

Как видно из рис. 1 основным ресурсом, компенсирующим тепловые потери через ограждающие конструкции, является отопление. Отопление в жилых домах может быть как централизованным (от генерирующей станции, общей для группы пользователей), так и индивидуальным (собственная генерация, зачастую основанная на сжигании различных видов топлива, так же могут использоваться возобновляемые источники энергии, электроэнергия).

Ограждающую конструкцию здания в большинстве случаев можно рассматривать как плоскопараллельную стенку. В процессе теплообмена стены здания с окружающей средой тепловая энергия, проходящая через ограждающую конструкцию, рассеивается на наружной поверхности стены в окружающую среду. Процесс передачи тепловой энергии на поверхности ограждения складывается из тепловых потоков с излучением и конвекцией. Для излучения – процесс описывается законом Стефана–Больцмана, для конвекции – законом Ньютона–Рихмана. В толще ограждения процесс передачи тепловой энергии происходит преимущественно с помощью тепло-

проводности, который описывается законом Фурье.

По закону Ньютона–Рихмана [4], на границе внутреннего воздуха и стенки в помещении тепловой поток q_{θ} будет равен:

$$q_{\theta} = \alpha_{\theta} (T_{\theta\theta} - T_{\theta c}) = (\alpha_{\theta\theta} + \alpha_{\theta c}) (T_{\theta\theta} - T_{\theta c}) \quad (1)$$

где: α_{θ} – коэффициент теплоотдачи на границе воздуха и стенки в помещении; $T_{\theta c}$ – температура стенки в помещении, К; $T_{\theta\theta}$ – температура воздуха в помещении, К;

Согласно [5] для вертикально ориентированных поверхностей в помещении на поверхности стенки коэффициент конвективной теплоотдачи можно оценить по следующей формуле:

$$\alpha_{\theta c} = 1,66 (T_{\theta\theta} - T_{\theta c})^{1/3} \quad (2)$$

Коэффициент теплоотдачи с излучением $\alpha_{\theta\theta}$ в таком случае можно рассчитать, используя уравнение Стефана–Больцмана [6]:

$$\begin{aligned} q_{\theta 2} &= \varepsilon \sigma (T_{22}^4 - T_{2A}^4) = \\ &= \varepsilon \sigma (T_{22}^2 + T_{2A}^2)(T_{22} + T_{2A})(T_{22} - T_{2A}) = \\ &= \alpha_{\theta 2} (T_{22} - T_{2A}) \end{aligned}$$

где: ε – приведенный коэффициент излучения; σ – постоянная Стефана–Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Таким образом, получаем выражение для $\alpha_{\theta\theta}$:

$$\alpha_{\theta\theta} = \varepsilon \sigma (T_{\theta\theta}^2 + T_{\theta c}^2)(T_{\theta\theta} + T_{\theta c}) \quad (3)$$

Для ограждающих конструкций зданий, суммарный коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности сложится из коэффициентов для конвекции и излучения [7] и будет равен:

$$\begin{aligned} \alpha_{\theta} &= \alpha_{\theta\theta} + \alpha_{\theta c} = 1,66 (T_{\theta\theta} - T_{\theta c})^{1/3} + \\ &+ \varepsilon \sigma (T_{\theta\theta}^2 + T_{\theta c}^2)(T_{\theta\theta} + T_{\theta c}) \end{aligned} \quad (4)$$

При подстановке формул (4) в (1) получается итоговое выражение для расчета теплового потока q на внутренней поверхности стены, т.е. в помещении:

$$\begin{aligned} q_{\theta} &= \alpha_{\theta} (T_{\theta\theta} - T_{\theta c}) = \\ &= 1,66 (T_{\theta\theta} - T_{\theta c})^{4/3} + \varepsilon \sigma (T_{\theta\theta}^4 - T_{\theta c}^4) \end{aligned} \quad (5)$$

Предложенная методика позволяет оценить тепловой поток через ограждающие ограждения реальных объектов, используя современные методы измерения температуры на поверхности ограждающих конструкций. Современные методы позволяют определить температуры $T_{\theta\theta}$, $T_{\theta c}$ с точностью $\pm 0,1^{\circ} \text{С}$. Возникает вопрос, а с какой точностью будет определен тепловой поток исследуемой

ограждающей конструкции. Для получения оценки точности было применено два метода расчета погрешности: статистического моделирования на ЭВМ и аналитический.

Для реализации метода статистического моделирования на ПК была применена программа MS Excel. При определении температуры элементов конструкции возникает погрешность, которая распределена, как правило, по нормальному закону. Поэтому измеренные температуры будут случайными числами, имеющими нормальное распределение с математическим ожиданием равным номинальной величине и средним квадратичным отклонением приблизительно равным 1/6 от предельной погрешности измерения.

Для расчетов примем, что температуры внутреннего воздуха и стенки в помещении равны соответственно $T_{вв}=300\text{K}$, $T_{вс}=295\text{K}$.

Точность измерения температуры, как и описывалось выше, равна

$$\Delta T_{вв} = \Delta T_{вс} = \pm 0,1 \quad ,$$

тогда среднее квадратическое отклонение $\sigma=0,033$.

MS Excel позволяет генерировать случайные значения измеренной температуры используя функцию НОРМОБР(слчис(), $T_{ср}$, σ_t). Для выбранного набора температур вычисляется суммарный коэффициент теплоотдачи по формуле (4) и тепловой поток через элемент конструкции по формуле (5). Если повторить приведенные действия N раз то можно получить статистику теплового потока через ограждающую конструкцию, для которой можно определить среднее значение параметра $q_{ср}$ и его среднее квадратическое отклонение δ_q .

В табл. 1 приведены обрезанные листы моделирования в среде MS Excel для обеих вариантов. Было выполнено 50 вариантов расчета для выбранных значений.

Таблица 1.

Входные данные и результаты моделирования.

Твп	Тсп	альфа	q		
300,041	294,972	8,824	44,733	$q_{ср}$	44,016
300,028	295,018	8,814	44,150	σ	0,409064
300,002	295,047	8,804	43,619	δ	0,010734
299,956	294,982	8,804	43,791	Δq	0,064406
300,046	295,061	8,811	43,919		
300,002	295,044	8,804	43,655		
299,942	294,997	8,799	43,511		
300,024	294,967	8,821	44,606		
300,028	295,020	8,814	44,137		
299,990	295,027	8,804	43,694		
300,019	294,996	8,815	44,275		
299,942	295,054	8,789	42,964		
300,009	295,029	8,808	43,862		
300,003	294,954	8,819	44,527		
299,957	295,011	8,800	43,520		
299,991	295,036	8,803	43,627		
300,054	295,019	8,820	44,411		
299,970	294,964	8,810	44,111		
299,994	294,979	8,813	44,199		
299,980	294,989	8,808	43,955		

В результате моделирования получены значения среднего теплового потока q_{cp} и среднего квадратического отклонения σ_R . Коэффициент вариации вычисленного значения теплового потока

$$\delta_q = \sigma_q / q_{cp} = 0,0107$$

соответственно, относительная погрешность определения теплового потока

$$\Delta q = 6\sigma_q / q_{cp} = 0,064$$

(6,4% от измеряемой величины). Результаты моделирования показывают, что предложенная методика оценки теплового потока через ограждающие конструкции зданий позволяет оценивать эти параметры с инженерной точностью.

Так же, для оценки погрешности измерения величины теплового потока, был применен аналитический метод. Суть аналитического метода заключается в том, что если $q=f(T_{вв}, T_{вс})$, то есть измеряется не сама величина q , а $T_{вв}$ и $T_{вс}$, то измерения носят косвенный характер.

Тогда:

$$\Delta q = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial T_{вв}} \Delta T_{вв}\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial T_{вс}} \Delta T_{вс}\right)^2} \quad (6)$$

Подставив формулу (5) в формулу (6) получим:

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

Результаты расчетов на основе выбранных изначально значений представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Входные данные и результаты оценки погрешности оценки теплового потока.

Входные данные		Результаты		
Tвп	Tсп	q	Δq	%
300	295	44,05	2,76	6,27

Из полученных результатов видно, что погрешность составляет 6,3% (меньше 6,5%), что является достаточно точным измерением.

Таким образом, показано, что при достижении определенной точности измерения параметров, погрешность оценки теплового потока через ограждающую конструкцию может определяться с инженерной точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вавилов В.П., "Инфракрасная термография и тепловой контроль", 2-е издание, дополненное, М.: Издательский дом "Спектр" 2013 – 544 с.
2. Будадин О.Н., Потапов А.И., Когланов В.И. и др. Тепловой неразрушающий контроль изделий. М.: Наука, 2002. 476 с.
3. Pablo Rodrigues Muniza, Robson da Silva, Clainer Bravin Donadela Non-contact measurement of angle of view between the inspected surface and the thermal imager // Infrared Physics & Technology. – 2015. – Vol.72 P 77–83.
4. Госсорг Ж. ИК термография. М.: Мир, 1988 – 396 с.
5. Малявина Е.Г., Теплотери здания. АВОК-ПРЕСС, 2007 – 144 с.
6. Видин Ю.В., Иванов В.В. Расчет температурных полей в твердых телах, нагреваемых конвекцией и радиацией одновременно. Красноярск, 1965 – 95 с.
7. Ермаков С. М., Михайлов Г. А. Статистическое моделирование. – М.: Изд-во "Наука", 1982 – 296 с

© И.П. Якушкин, (ivan@yakushkin.su), Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»,

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ИНСТИТУТ БИЗНЕС-ОБРАЗОВАНИЯ

негосударственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

Реклама

Традиции. Инновации. Успех!

МИБО