

УДК 620.1179.13

**МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ
ТЕПЛОВИЗИОННОГО ЭНЕРГОАУДИТА
СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

В.П. Вавилов, И.А. Лариошина

Томский политехнический университет

E-mail: vavilov@tpu.ru

Вавилов Владимир Платонович, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий лабораторией Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: vavilov@tpu.ru

Область научных интересов: инфракрасная термография, тепловой контроль, обработка изображений, теория теплопроводности.

Лариошина Ирина Анатольевна, аспирант Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: irinalarioshina@mail.ru

Область научных интересов: тепловизионная диагностика, энергоаудит.

Описаны результаты экспериментальной оценки погрешности тепловизионных измерений при проведении энергоаудита строительных сооружений.

Ключевые слова:

Энергоаудит, тепловизионные обследования, методические погрешности.

Введение

Принятие федерального закона ФЗ № 261 от 23 ноября 2009 г. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» стимулировало рост продаж инфракрасных (ИК) тепловизоров на российском рынке и спрос на тепловизионные обследования строительных сооружений, в результате чего оператор-термографист (энергоаудитор) обнаруживает локальные дефекты и получает оценки фактического сопротивления ограждающих конструкций [1–3]. В 2012 г. в Национальном исследовательском Томском политехническом университете разработаны и сертифицированы в системе ZOND «Методические рекомендации по энергетическому аудиту строительных зданий и сооружений с использованием метода инфракрасной термографии».

Сходные методики используются в ряде других российских организаций, вовлеченных на протяжении последних лет в энергетические обследования. Тем не менее, в ситуации, сложившейся в области тепловизионного энергоаудита, можно выделить ряд неприятных особенностей, а именно: слабое метрологическое обоснование тепловизионных измерений; использование экономичных тепловизоров с небольшим форматом термоизображений (160×120 и менее) и существенной погрешностью температурных измерений (обычно ± 2 % или ± 2 °С, что мало приемлемо в энергоаудите); невыполнение методических рекомендаций по обеспечению точных температурных измерений при априорном отсутствии значений ряда параметров. Метрология тепловизионного энергоаудита обсуждалась в работе [4], в результате чего сформулирован достаточно пессимистический взгляд на возможности количественной тепловизионной оценки теплопотерь из зданий.

В настоящей статье рассмотрены основные методические погрешности тепловизионных измерений.

Погрешность тепловизионных измерений

В работе [4] показано, что погрешности определения теплопотерь $\Delta W/W$ и сопротивления теплопередаче, в основном, обусловлены ошибками измерения плотности теплового потока Q и температуры наружных ограждающих конструкций T_{out}^w :

$$\frac{\Delta W}{W} = \sqrt{\left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta T_{out}^w}{T_{out}^w - T_{out}^{air}}\right)^2}, \quad (1)$$

где T_{out}^{air} – температура наружного воздуха.

В условиях реальной тепловизионной съемки величина $\Delta W/W$ может достигать 30...100 %, причем основным источником ошибки является неточное измерение температуры наружных стен (окон), если принять, что основная погрешность современных измерителей теплового потока равна 5 % [4].

Следует заметить, что все вышесказанное в равной мере относится и к определению сопротивления теплопередаче по результатам тепловизионной съемки, когда плотность мощности теплового потока измеряют в отдельных точках, а ее средние значения по фасаду рассчитывают, определяя среднюю температуру по фасаду.

Экспериментальные результаты

Эксперименты были выполнены с помощью тепловизора ThermoCAM P65 производства фирмы FLIR Systems (США), который является типичным представителем приборов среднего класса, широко используемых в строительной ИК термографии.

На первом этапе измеряли наружные температуры стены из красного кирпича и двухкамерного стеклопакета при температурах внутреннего и наружного воздуха соответственно +22 °С и +2 °С. Таким образом, температурный напор составил 20 °С, что соответствует требованию ГОСТ 26629-85 «Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций». На объектах съемки размещали два маркера: поливинилхлоридную пленку черного цвета (рекомендованное значение коэффициента излучения $\varepsilon = 0,95$) и алюминиевую фольгу (рисунок). Согласно известным рекомендациям работы с тепловизорами была измерена величина *отраженной температуры фона* $T_{refl} = -2,1$ °С, а затем *коэффициентов излучения* красного кирпича ($\varepsilon = 0,93$) и оконного стекла ($\varepsilon = 0,85$). Измерения проводились после включения тепловизора внутри помещения и выноса его наружу в течение 60 минут (обычно рекомендуют начинать измерения через 20 минут после включения тепловизора).

Результаты эксперимента приведены в табл. 1 для двух случаев: 1) коэффициент излучения $\varepsilon = 0,95$ – часто используемое практиками значение по умолчанию, а величина $T_{refl} = +2$ °С, т. е. равна температуре наружного воздуха; 2) вышеуказанные параметры выбраны истинными: $\varepsilon = 0,93$ для кирпича, $\varepsilon = 0,85$ для стекла и $T_{refl} = -2,1$ °С. Принято, что истинные значения температур стены и воздуха измерены через 60 минут после включения тепловизора.

Данные табл. 1 показывают, что пренебрежение временем измерения и корректирующими параметрами приводит к ошибкам измерения температуры от 0,3 до 1,8 °С, в то время как введение правильных корректирующих параметров обеспечивает погрешность от 0,4 до 1,1 °С, иными словами, вопреки распространенному мнению корректирующие параметры незначительно улучшают результаты измерений по сравнению с интуитивно выбранными параметрами тепловизионной съемки.

Дальнейшие оценки погрешностей тепловизионных измерений при различных комбинациях корректирующих параметров, а именно, отраженной температуры фона T_{refl} , коэффициента излучения ε , расстояния до объекта съемки L и влажности атмосферы w , приведены в табл. 2. Данные табл. 2 показывают, что, в соответствии с известными рекомендациями, наибольшие погрешности связаны с неточным заданием отраженной температуры фона и коэффициента излучения. Тем не менее, незначительный разброс в задании этих параметров приводит к ошибкам измерения не более 0,4 °С. Соответственно, расстояние до объекта съемки и влажность атмосферы не влияют на результаты тепловизионных измерений в строительстве.

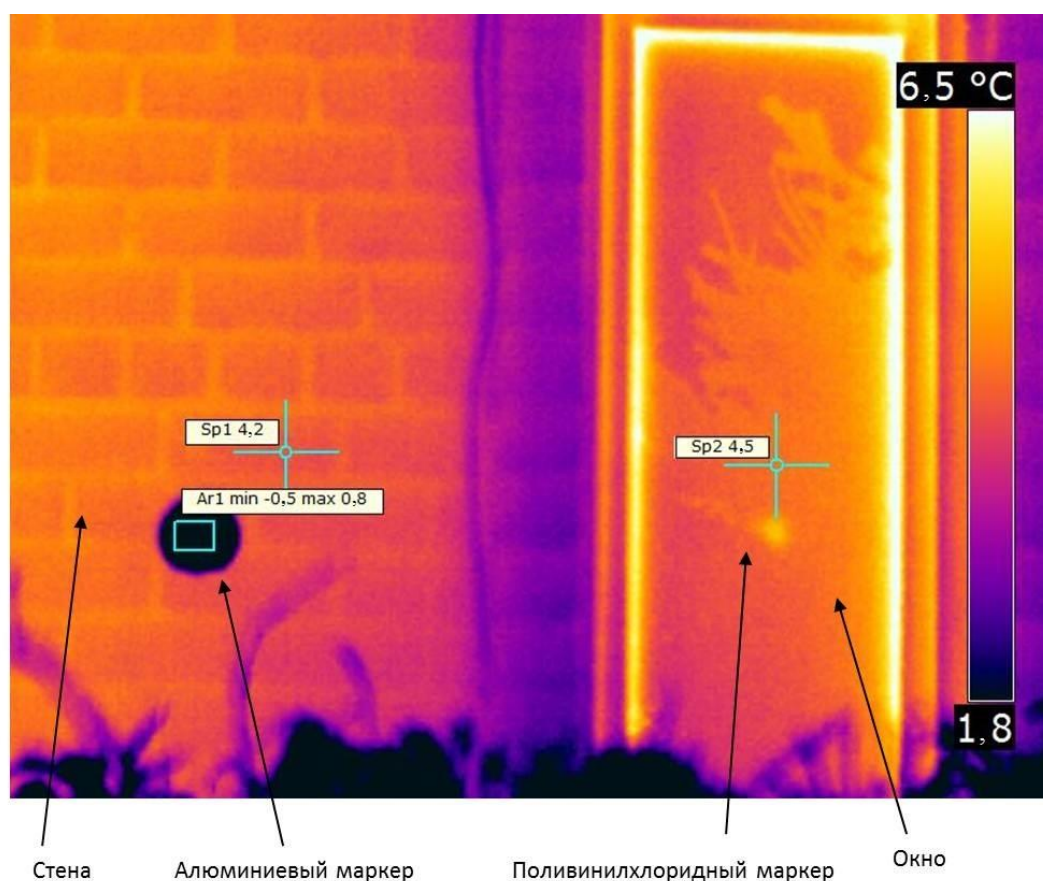


Рисунок. ИК термограмма, иллюстрирующая экспериментальную процедуру

Таблица 1. Точность тепловизионных измерений температуры в строительстве в зависимости от времени съемки после включения тепловизора ThermoCAM P65

Время после включения в помещении (+22 °C) и выноса на улицу (+2 °C), мин.	Температура			
	стены	окна	стены	окна
	$T_{out}^{air} = +2\text{ °C}$ $T_{refl} = +2\text{ °C}$ $\varepsilon = 0,95$	$T_{out}^{air} = +2\text{ °C}$ $T_{refl} = +2\text{ °C}$ $\varepsilon = 0,95$	$T_{out}^{air} = +2\text{ °C}$ $T_{refl} = -2,1\text{ °C}$ $\varepsilon = 0,93$	$T_{out}^{air} = +2\text{ °C}$ $T_{refl} = -2,1\text{ °C}$ $\varepsilon = 0,85$
2	3,3 (0,4)*	3,5 (1,0)	3,6 (0,1)	4,4 (0,1)
4	2,8 (0,9)	3,2 (1,3)	3,2 (0,5)	4,1 (0,4)
7	2,4 (1,3)	2,8 (1,7)	2,8 (0,9)	3,6 (0,9)
11	2,4 (1,3)	2,7 (1,8)	2,6 (1,1)	3,5 (1,0)
17	2,8 (0,9)	3,1 (1,4)	3,1 (0,6)	3,9 (0,6)
27	2,3 (1,6)	2,6 (1,9)	2,9 (0,8)	3,6 (0,9)
45	2,4 (1,3)	3,0 (1,5)	3,2 (0,5)	4,1 (0,4)
60	3,4 (0,3)	3,6 (0,9)	3,7**	4,5**

* В скобках: абсолютная ошибка измерения

** Значение принято в качестве истинного

Таблица 2. Точность тепловизионных измерений температуры в строительстве при различных комбинациях корректирующих параметров

Время после включения в помещении (+22 °С) и выноса на улицу (+2 °С) равно 60 мин. (базовая влажность атмосферы $w = 30 \%$, базовое расстояние $L = 4$ м, кроме оговоренных ниже изменений)	Температура стены, °С $T_{out}^{air} = +2$ °С $T_{refl} = -2,1$ °С	Температура окна, °С $T_{out}^{air} = +2$ °С $T_{refl} = -2,1$ °С
$T_{out}^{air} = +2$ °С, $T_{refl} = -2,1$ °С, $\varepsilon = 0,93$ (стена), $\varepsilon = 0,85$ (окно)	3,7*	4,5*
$T_{out}^{air} = +4$ °С, $T_{refl} = -2,1$ °С, $\varepsilon = 0,93$ (стена), $\varepsilon = 0,85$ (окно)	3,7 (0)**	4,5 (0)
$T_{out}^{air} = 0$ °С, $T_{refl} = -2,1$ °С, $\varepsilon = 0,93$ (стена), $\varepsilon = 0,85$ (окно)	3,8 (0,1)	4,5 (0)
$T_{out}^{air} = +2$ °С, $T_{refl} = 0$ °С, $\varepsilon = 0,93$ (стена), $\varepsilon = 0,85$ (окно)	3,6 (0,1)	4,1 (0,4)
$T_{out}^{air} = +2$ °С, $T_{refl} = -4$ °С, $\varepsilon = 0,93$ (стена), $\varepsilon = 0,85$ (окно)	3,9 (0,2)	4,8 (0,3)
$T_{out}^{air} = +2$ °С, $T_{refl} = -2,1$ °С, $\varepsilon = 0,96$ (стена), $\varepsilon = 0,88$ (окно)	3,6 (0,1)	4,3 (0,2)
$T_{out}^{air} = +2$ °С, $T_{refl} = -2,1$ °С, $\varepsilon = 0,90$ (стена), $\varepsilon = 0,82$ (окно)	3,9 (0,2)	4,7 (0,2)
$T_{out}^{air} = +2$ °С, $T_{refl} = -2,1$ °С, $\varepsilon = 0,93$ (стена), $\varepsilon = 0,85$ (окно), $L = 10$ м	3,8 (0,1)	4,5 (0)
$T_{out}^{air} = +2$ °С, $T_{refl} = -2,1$ °С, $\varepsilon = 0,93$ (стена), $\varepsilon = 0,85$ (окно), $w = 60 \%$	3,7 (0)	4,5 (0)

* Значение принято в качестве истинного

** В скобках: абсолютная ошибка измерения

Заключение

Получены экспериментальные оценки погрешности тепловизионного измерения температуры фасадов строительных сооружений, которые могут достигать 1,8 °С при невыполнении методических рекомендаций по правилам проведения тепловизионных съемок, 1,1 °С – при введении корректирующих параметров со слишком коротким временем съемки после включения тепловизора и 0,4 °С – в случае полного соблюдения методических правил съемки и наличия относительно слабых отклонений значений отраженной температуры фона и коэффициента излучения от истинных. В целом, если избыточная температура наружных фасадов относительно температуры наружного воздуха составляет от 1,5 до 5 °С в зависимости от фактического сопротивления теплопередачи ограждающих конструкций и климатических условий, то погрешность определения тепловых потерь и сопротивления теплопередаче может составлять от 12 до 170 % согласно формуле (1). При этом наибольшие погрешности имеют место при обследовании ограждающих конструкций с высоким сопротивлением теплопередаче при неточном задании корректирующих параметров и несоблюдении методических требований к тепловизионной съемке, в частности, при использовании тепловизора немедленно после включения в условиях низких температур наружного воздуха.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.132.21.1722.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: Спектр, 2009. – 544 с.
2. Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И., Троицкий-Марков Т.Е., Абрамова Е.В. Тепловой неразрушающий контроль изделий. – М.: Наука, 2002. – 476 с.
3. Власов А.Б. Тепловизионная диагностика объектов электро- и теплоэнергетики (диагностические модели). – Мурманск: Изд-во Мурманского государств. технич. университета. – 2005. – 66 с.
4. Вавилов В.П. Пессимистический аспект тепловизионного энергоаудита строительных сооружений // Дефектоскопия. – 2010. – № 12. – С. 49–54.

Поступила 26.09.2012 г.