



М.В. Павлов, Д.Ф. Карнов, В.А. Князев
 Вологодский государственный университет

КАЧЕСТВЕННО-КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

В соответствии с действующим государственным стандартом результаты тепловизионного обследования зданий и сооружений в зависимости от поставленных задач могут быть разделены на качественные и количественные. В статье рассмотрены особенности качественного анализа тепловых изображений, полученных по итогам термографирования строительного объекта. Представлены существующие методики количественного анализа термограмм, взятые из действующих нормативных документов и методических рекомендаций, с конкретными примерами их использования.

Энергосбережение, энергетическая эффективность, тепловизионное обследование, объект контроля, термограмма.

С каждым следующим десятилетием вопросы энергосбережения и повышения энергетической эффективности объектов теплопотребления в жилищно-коммунальном секторе страны будут играть все большую роль. Переход на возобновляемые и альтернативные источники энергии происходит с учетом имеющегося энергетического потенциала государства крайне медленно в сравнении с другими странами мира. Инновационные технологии энергосбережения, к которым можно отнести пассивное домостроение, солнечную и ветровую энергетику, биотопливо, тепловые насосы, являются дорогостоящими решениями и для большей части России совершенно не рентабельны [5]. Поэтому в данный момент времени актуально не рассматривать революционные способы переустройства отечественной энергетической системы, а искать пути для снижения потребления невозобновляемых топливно-энергетических ресурсов жилым фондом страны. Для этого, в первую очередь, необходимо умение определять потенциал энергосбережения существующих объектов строительства. С решением задач по оценке теплотехнического состояния зданий и сооружений отлично справляются измерительные системы, работа которых основана на тепловом методе неразрушающего контроля – инфракрасной диагностике. Современные тепловизоры позволяют оперативно получать достоверную информацию о распределении радиационных температур, с помощью которой можно судить о тепловом состоянии объекта контроля [10].

В соответствии с государственным стандартом [3] тепловизионному контролю подвергаются наружные и внутренние поверхности ограждающих конструкций. Тепловизионная съемка проводится в отопительный сезон. При этом следует избегать атмосферных осадков, туманов, задымленности. Обследуемые поверхности не должны находиться в зоне прямого и отраженного солнечного облучения в течение 12 часов до проведения измерений. Термографирование не рекомендуется осуществлять, если значение инте-

грального коэффициента излучения поверхности объекта контроля менее 0,70. Места установки тепловизора выбирают таким образом, чтобы поверхность объекта находилась в прямой видимости под углом наблюдения не менее 60°. По обзорной термограмме наружной поверхности ограждающих конструкций выявляют участки с нарушенными теплозащитными свойствами, которые затем подвергают детальному термографированию с внутренней стороны ограждающих конструкций [1].

Результаты тепловизионной диагностики могут быть оценены как качественно, так и количественно [6]. В случае качественного анализа термограмм производится поиск тепловых аномалий по температурному перепаду в местонахождении предполагаемого дефекта и эталонной зоны [1]. Последняя должна выбираться аналогично контролируемой и находиться в тех же условиях теплообмена (располагаться вблизи обследуемого участка).

Существуют правила качественного анализа термограмм, которые позволяют повысить эффективность поиска и оценки тепловых аномалий [10]:

1. Дополнение термограммы видимым изображением (фотографией). Компьютерное совмещение видимого и теплового изображений.
2. При прочих равных условиях внутренний тепловизионный осмотр предпочтительнее наружной тепловизионной съемки.
3. Детальность изображения, качество термограммы ухудшается при удалении от объекта контроля. Кроме того, водяные пары, находящиеся в воздухе, поглощают длинноволновое инфракрасное излучение и, как следствие, искажают показания измерительного прибора. Тепловизионную съемку следует проводить на минимально возможном расстоянии от объекта контроля.
4. Неокрашенные металлические элементы зданий и сооружений выглядят, как правило, более холодными, чем на самом деле, за исключением ситуа-

ций, когда имеет место интенсивная внешняя подсветка.

5. Отопительные приборы, расположенные в заглубленной нише наружной стены, создают избыточные потери тепловой энергии через ограждения здания, которые могут быть ошибочно приняты за строительные дефекты.

6. Тепловые аномалии в области светопрозрачных конструкций могут быть обусловлены открытыми створками, форточками, фрамугами и др.

Качественный анализ тепловых изображений позволяет определить местонахождение и охарактеризовать в общих чертах дефект строительной конструкции. Данный вид оценки технического состояния объекта контроля основывается исключительно на температурном поле, которое формирует тепловизор, а точнее на разности показаний температур на однородном по конструктивным характеристикам элементе ограждения. Наличие резких перепадов температур и минимальных (или максимальных, в зависимости от места проведения тепловизионной съемки) температур, сосредоточенных в определенной области термограммы, дает все основания предполагать наличие тепловой аномалии, а значит, и дефект строительной конструкции.

Количественную оценку тепловых аномалий производят с целью установить степень их опасности для нормального функционирования здания. Обычно результаты количественного анализа сравнивают с эталонными значениями, которые, как правило, регламентированы различными нормативными документами (государственными стандартами, сводами правил и т.п.).

Рассмотрим некоторые варианты количественного анализа тепловых изображений, которые предлагают различные нормативные акты и рекомендательные документы (методические рекомендации).

В ранее упомянутом стандарте [3] количественный анализ тепловых изображений основан на расчете локальных относительных (по отношению к базовому участку) сопротивлений теплопередаче. Значение относительного сопротивления теплопередаче $\bar{R}(x, y)$ в выбранной точке на поверхности ограждающей конструкции определяется следующим образом:

– для внутренних обследований:

$$\bar{R}_{\text{вн}}(x, y) = 1 + \frac{\theta(x, y)}{t_{\text{вн}} - \tau_{\text{вн}}^{\circ} - \theta(x, y)}; \quad (1)$$

– для наружных обследований:

$$\bar{R}_{\text{н}}(x, y) = 1 + \frac{\theta(x, y)}{t_{\text{н}} - \tau_{\text{н}}^{\circ} - \theta(x, y)}, \quad (2)$$

где $\theta(x, y)$ – разность между температурой $t(x, y)$ изотермы, проходящей через точку с координатами x и y на соответствующей поверхности ограждающей конструкции, и температурой поверхности базового участка τ_0° , °C; $t_{\text{вн}}$ и $t_{\text{н}}$ – соответственно температура внутреннего и наружного воздуха в зоне исследуемого фрагмента, °C; $\tau_{\text{вн}}^{\circ}$ и $\tau_{\text{н}}^{\circ}$ – соответственно темпера-

тура поверхности базового участка при внутренних и наружных обследованиях, °C.

При этом значение случайной относительной погрешности определения относительного сопротивления теплопередаче $\delta\bar{R} = \Delta\bar{R}/\bar{R}$ вычисляется соответственно по уравнениям:

– для внутренних обследований:

$$\delta\bar{R}_{\text{вн}} = \left| \frac{1}{t_{\text{вн}} - \tau_{\text{вн}}^{\circ}} \right| \sqrt{\left[\frac{\theta(x, y)}{t_{\text{вн}} - \tau_{\text{вн}}^{\circ}} \Delta t_{\text{вн}} \right]^2 + \left[\frac{\theta(x, y)}{t_{\text{вн}} - \tau_{\text{вн}}^{\circ}} \Delta \tau_{\text{вн}}^{\circ} \right]^2} + \Delta\theta^2; \quad (3)$$

– для наружных обследований:

$$\delta\bar{R}_{\text{н}} = \left| \frac{1}{t_{\text{н}} - \tau_{\text{н}}^{\circ}} \right| \sqrt{\left[\frac{\theta(x, y)}{t_{\text{н}} - \tau_{\text{н}}^{\circ}} \Delta t_{\text{н}} \right]^2 + \left[\frac{\theta(x, y)}{t_{\text{н}} - \tau_{\text{н}}^{\circ}} \Delta \tau_{\text{н}}^{\circ} \right]^2} + \Delta\theta^2, \quad (4)$$

где Δt , $\Delta \tau$ и $\Delta \theta$ – значения абсолютных случайных погрешностей определения температуры воздуха и базового участка, а также разностей температур поверхности ограждающей конструкции, °C.

Приведем пример расчета. Исходные данные: $t_{\text{н}} = -11,3$ °C; $\tau_{\text{н}}^{\circ} = -8,4$ °C; для «горячей» точки М6 $\theta(\text{М6}) = \tau_{\text{н}}^{\text{М6}} - \tau_{\text{н}}^{\circ} = -5,7 - (-8,4) = 2,7$ °C. Тогда по выражению (2) имеем:

$$\bar{R}_{\text{н}}(\text{М6}) = 1 + \frac{2,7}{-11,3 - (-8,4) - 2,7} = 0,518.$$

Таким образом, сопротивление теплопередаче аномальной зоны ограждающей конструкции почти в два раза меньше термического сопротивления базового участка наружной стены.

Случайная относительная погрешность измерений величины $\bar{R}_{\text{н}}$ при $\Delta t_{\text{н}} = \pm 0,5$ °C, $\Delta \tau_{\text{н}}^{\circ} = \pm 0,168$ °C и $\Delta \theta = \pm 0,282$ °C по выражению (4) составила:

$$\delta\bar{R}_{\text{н}} = \left| \frac{1}{-11,3 - (-8,4)} \right| \sqrt{\left[\frac{2,7}{-11,3 - (-8,4)} \cdot 0,5 \right]^2 + \left[\frac{2,7}{-11,3 - (-8,4)} \cdot 0,168 \right]^2} + 0,282^2 = 0,195.$$

Наиболее известным способом количественного анализа тепловых изображений является определение участков ограждающих конструкций с повышенными тепловыми потерями, согласно действующим сводам правил [7, 8]. В этом случае рассчитываются сопротивления теплопередаче R_0 , м² · °C/Вт, для базового и других характерных участков и сравниваются с требуемым значением. На данном этапе необходимо разделить ограждающие конструкции здания на стены, окна, цоколь и в дальнейшем для каждой из этих поверхностей производить отдельные вычисления сопротивления теплопередаче [4].

Участки ограждающих конструкций с повышенными тепловыми потерями выявляют путем сравнения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций, полученного в результате натурных измерений, с требуемым значением, определяемым в соответствии с формулой [8]:

$$R_o^{\text{норм}} = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}}{\Delta t_{\text{н}} \alpha_{\text{вн}}}, \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}, \quad (5)$$

где $t_{\text{вн}}$ – расчетная температура внутреннего воздуха, °C. Для жилых зданий принимается в зависимости от расчетной температуры наружного воздуха. В данном случае, согласно таблице [2], температура внутреннего воздуха будет равна $t_{\text{вн}} = 21 \text{ °C}$; $t_{\text{н}}$ – расчетная температура наружного воздуха в холодный период года, °C. Принимается равной средней температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92. Для климатических условий города Вологды, согласно таблице 3.1* [9], температура наружного воздуха составит $t_{\text{н}} = -32 \text{ °C}$; $\Delta t_{\text{н}}$ – нормируемый температурный перепад, °C, между температурой внутреннего воздуха $t_{\text{вн}}$, °C, и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции $\tau_{\text{вн}}$, °C. Согласно таблице 5 [8], для наружных стен жилых зданий имеем перепад температур $\Delta t_{\text{н}} = 4,0 \text{ °C}$; $\alpha_{\text{вн}}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности конструкции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$. По данным таблицы 4 [8] для наружных стен коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{вн}} = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$.

В итоге нормируемое значение сопротивления теплопередаче наружной стены жилого здания по уравнению (5) составит:

$$R_o^{\text{норм}} = \frac{21 - (-32)}{4,0 \cdot 8,7} = 1,523 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}.$$

Для нахождения сопротивления теплопередаче по результатам натурных измерений можно воспользоваться следующим выражением:

$$R_o^{\text{факт}} = \frac{1}{\alpha_{\text{н}} \tau_{\text{н}} - t_{\text{н}}}, \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}, \quad (6)$$

где $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности конструкции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$. По данным [3] при скорости ветра $w_{\text{н}} = 1,0 \text{ м}/\text{с}$ коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{н}} = 11 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; $\tau_{\text{н}}$ – температура наружной поверхности ограждающей конструкции, найденная по результатам термографирования, °C.

Рассмотрим наружную стену жилого здания. На реперном участке средняя температура поверхности стены равна $\tau_{\text{н}}^6 = -8,4 \text{ °C}$, в зоне температурной аномалии – $\tau_{\text{н}}^{\text{М6}} = -5,7 \text{ °C}$. Тогда по формуле (6) имеем результаты:

$$R_o^{\text{факт}} = \frac{1}{11 \cdot -8,4 - (-11,3)} = 1,022 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт},$$

$$R_o^{\text{факт}} (\text{М6}) = \frac{1}{11 \cdot -5,7 - (-11,3)} = 0,529 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}.$$

Таким образом, фактическое сопротивление теплопередаче наружной стены здания не соответствует санитарно-гигиеническим требованиям (5).

В заключение отметим несколько существенных и принципиальных моментов, касающихся качественно-количественной оценки тепловых изображений (тер-

мограмм), полученных в процессе термографирования различных объектов строительства и их конструктивных элементов. Во-первых, качественный анализ термограмм ограничивается информацией, содержащейся в самих тепловых изображениях, зафиксированных тепловизором. В этом случае идентификация точных температурных данных об объекте тепловизионного контроля не является обязательным условием, так как конечной целью качественного анализа термограмм является выявление дефектов. Во-вторых, количественная оценка тепловых изображений направлена на расчет конкретных теплотехнических параметров. Причем, количественные результаты термографирования сопровождаются компьютерной обработкой снятых термограмм в специализированных прикладных программных средах для определения температурных полей на поверхности объекта тепловизионного контроля. В-третьих, в строительной термографии на основе комплексного качественно-количественного анализа термограмм делают выводы по тепловому состоянию отдельных конструктивных элементов или всего объекта контроля.

Совокупное решение обозначенных задач и реализация возможностей качественно-количественной оценки термограмм в процессе строительного термографирования позволяют ответить на вопрос: соответствует ли объект контроля действующим требованиям по уровню тепловой защиты или нет? Если нет, то составляется список возможных энергосберегающих мероприятий, направленных на полное или частичное решение данной проблемы. К примеру, в случае обнаружения локальных (фрагментарных) избыточных тепловых потерь через наружные стены здания это может быть наружная тепловая изоляция стен с помощью напыления пенополиуретана с защитным покрытием или жидкого утеплителя.

Многочисленные апробации предлагаемого качественно-количественного метода оценки тепловых изображений, зафиксированных в процессе термографирования реальных строительных объектов и их элементов, подтверждают высокую и надежную эффективность его применения [1, 6], а также адекватны и не противоречат результатам, полученным по методикам и принципам, представленным в нормативных документах и методических рекомендациях [3, 4].

Литература

1. Вавилов, В. П. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике: брошюра / В. П. Вавилов, А. Н. Александров. – Москва : НТФ Энергопрогресс, 2003. – 76 с.
2. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях : введен 01.01.2013. – Москва : ФГУП Стандартинформ, 2013. – 12 с.
3. ГОСТ Р 54852-2011. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций : введен 01.05.2012. – Москва : Стандартинформ, 2012. – 16 с.
4. РД 153-34.0-20.364-00. Методика инфракрасной диагностики тепломеханического оборудования : введен 01.05.2000 / Производственная Лаборатория

ИК-техники ОАО «Фирма ОРГРЭС». – Москва, 2000. – 50 с.

5. Окунев, А. Ю. Современные подходы к тепловизионному обследованию строительных объектов / А. Ю. Окунев, Е. В. Левин, К. С. Шагинян // Жилищное строительство. – 2012. – № 6. – С. 7–9.

6. Основы тепловизионной диагностики теплопотребляющих объектов строительства : учебное пособие / А. А. Сеницын, Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов. – Вологда : ВоГТУ, 2013. – 156 с.

7. СП 23-101-2004. Свод правил. Проектирование тепловой защиты зданий : утвержден ОАО ЦНИИ-промзданий и ФГУС ЦНС от 23.04.2004 № 01 : введен 01.06.2004. – Москва : ФГУП ЦПП, 2004. – 140 с.

8. СП 50.13330.2012. Свод правил. Тепловая защита зданий: актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 : утвержден Минрегионом России от 30.06.2012 № 265 : введен 01.01.2012. – Москва : ФАУ ФЦС, 2012. – 96 с.

9. СП 131.13330.2012. Свод правил. Строительная климатология : актуализированная редакция СНиП 23-02-99* : утвержден Минрегионом России от 30.06.2012 № 275 : введен 01.01.2013. – Москва : ФАУ ФЦС, 2015. – 120 с.

10. Тепловизионная диагностика зданий : методические указания к практической работе / составители Т. Н. Немова, К. Д. Трофимов. – Томск : ТГАСУ, 2015. – 39 с.

M.V. Pavlov, D.F. Karpov, V.A. Knyazev

QUALITATIVE AND QUANTITATIVE ANALYSIS OF THERMAL IMAGES IN CONSTRUCTION THERMOGRAPHY

According to the existing state standard, the results of thermovision inspection of buildings and facilities depending on the tasks set can be divided into qualitative and quantitative. The article considers the features of qualitative analysis of thermal images obtained as a result of the project thermal mapping. The article presents the current methods of thermograms quantitative analysis taken from existing normative documents and methodological recommendations with specific examples of their use.

Energy saving, energy efficiency, thermal imaging, object of control, thermogram.