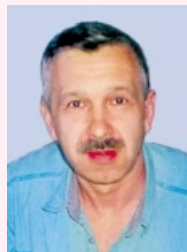


ДИАГНОСТИКА СТРОИТЕЛЬНЫХ ИНФРАКРАСНОЙ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ ТЕРМОГРАФИИ

В связи с развитием энергосберегающих технологий в строительстве метод инфракрасной термографии приобретает второе дыхание. Администрация российских городов начали разрабатывать программы внедрения данного метода при диагностике строительных конструкций, анализе теплопотерь и оценке степени теплозащиты зданий. В статье дан краткий обзор современного состояния строительной тепловизионной диагностики, в основном на базе многолетнего опыта Томского НИИ интроскопии.

Energy-saving technologies stimulate growing interest in using infrared thermography in building. Russian local authorities start developing programs to introduce this diagnostic method to detect envelope defects, analyzing heat losses and evaluating building thermal insulation. The paper gives a brief review of the current situation in building infrared thermography, particularly by summarizing experience of Tomsk Institute of Introscopy.

Об авторе



Ваилов
Владимир
Платонович

Доктор технических наук, профессор, заведующий отделом тепловых методов контроля Томского НИИ интроскопии. Член Европейской Рабочей Группы «Евротерм» по инфракрасной термографии, сертифицирован Госстандартом РФ на III уровне по тепловым методам контроля.

1. Терминология

Инфракрасная (ИК) термография (тепловидение) включает методы и средства бесконтактного анализа теплового излучения физических объектов, складывающегося из собственного излучения тел, интенсивность которого определяется их температурой и излучательными свойствами, а также из отраженного и прошедшего излучений посторонних источников. При низком уровне посторонних излучений ИК термограммы отражают структуру *температурного поля* исследуемого тела. В этом случае мы имеем дело с *пирометрией* – бесконтактным измерением температуры по собственному тепловому излучению тел. Основное отличие ИК *тепловизоров* от ИК термометров (*пирометров*) состоит в уникальной возможности фиксировать температуру в огромном количестве точек (до 10^6) с частотой телевизионной развертки. Современные портативные *измерительные* тепловизоры обеспечивают формат 320 x 240 пикселей при частоте кадров 30 Гц. Другие стандартные параметры тепловизоров без охлаждения приемника излучения: температурная чувствительность $0,1^\circ\text{C}$, диапазон измеряемых температур $-20 \div 2000^\circ\text{C}$, масса прибора $2 \div 3$ кг, запись до $200 \div 1000$ термограмм на PCMC1 карту. Приборы с азотным, термоэлектрическим или компрессорным охлаждением могут иметь более высокое температурное разрешение, но не всегда удобны при практической полевой съемке. *Показывающие* тепловизоры, то есть не обеспечивающие измерения температуры, могут иметь до 1024×1024 пикселей в кадре.

ИК термограммы визуализируются в одной из цветовых палитр, чаще применяются *черно-белая*, *цветов радуги* и компромиссная палитра *цветов каления*. Тепловидение характеризуется такими же особенностями расшифровки *псевдоцветов*, как и другие диагностические методы, работающие с изображениями (рентген, ультразвук, ЯМР и т. п.). Профессионалы зачастую предпочитают серые полутона, которые делают изображения более естественными. Компьютерная обработка изображений с последующим формированием цветных термограмм позволяет представить результаты съемки в наиболее наглядном виде.

2. Краткая историческая справка

Основные области промышленного применения тепловизионной диагностики: энергетика, нефтехимия, строительство, металлургия.

В строительстве различают диагностику крыш и ограждающих конструкций. Плоские гидроизолированные крыши являются идеальным объектом тепловизионной диагностики зон инфильтрации влаги [1]. Осмотр проводится с борта вертолета или непосредственно путем обхода крыши. Ограждающие конструкции, как правило, инспектируются с земли. Объективной предпосылкой метода является наличие перепада температуры между внутренними помещениями и окружающей средой – не менее 10°C согласно требованиям стандарта ISO 6781-83.

В мировой практике строительная тепловизионная диагностика используется с 60-х гг. Пионером строительной термографии была шведская фирма AGA (затем *AGEMA Infrared Systems*), которая в 1998 – 99 гг. слилась с американскими фирмами *FLIR* и *Inframetrics*, создав в настоящее время крупнейшую мировую компанию *FSI*. Эта фирма поставляет на мировой рынок наибольшее число тепловизоров военного, а также промышленного и медицинского применения.

В силу особенностей климата Скандинавия, а затем Финляндия, Канада и США стали первыми странами, где тепловидение в строительстве нашло широкое применение [2, 3]. Начало внедрения метода в России (бывшем СССР) также датируется 60-ми гг., когда фирма AGA начала осваивать наш рынок. На протяже-

нии ряда лет на базе шведских и отечественных систем во ВНИИ строительной физики, НИИ Мосстроя и некоторых других организациях проводились исследования и практические осмотры ограждающих конструкций, крыши, дымовых труб и других объектов. Большого распространения эти работы, обобщенные в монографии [4], не получили из-за высокой стоимости зарубежных тепловизоров и низкого качества отечественных приборов. Переход к новой экономической системе в России сопровождался, с одной стороны, большей доступностью зарубежной тепловизионной техники, с другой – повышенным интересом к энергосберегающим технологиям и технической диагностике сложных инженерных систем. С 1998 г. введена в действие новая редакция СНиП II-3-79 «Строительная теплотехника», согласно которой при проектировании нового жилья сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций должно быть существенно увеличено (до 3 раз).

В последние годы на Западе произошла смена поколений тепловизоров. На место приборов со встроенными холодильниками пришли портативные тепловизоры с неохлаждаемыми мозаичными детекторами двух типов: показывающими (стоимость 15 – 30 тыс. долларов) и измерительными (стоимость 40 – 50 тыс. долларов). Разрыв между типичными зарубежными и отечественными приборами по нашим оценкам составляет 10 – 15 лет. Основными недостатками отечественных тепловизоров являются низкая метрологичность, необходимость охлаждения детектора, большие габариты и вес, отсутствие автономного питания и современных устройств записи термограмм.

В настоящей работе приводятся результаты использования тепловидения в строительстве, полученные в Томском НИИ интроскопии, начиная с 1994 г.

3. Цели тепловизионной диагностики в строительстве

В зависимости от технического задания заказчика тепловидение может применяться для – общей качественной оценки теплового режима и количественного определения теплопотерь на отдельных участках; – обнаружения дефектов строительства; – оценки сопротивления теплопередаче.

Из опыта НИИ интроскопии следует, что тепловизионная диагностика эффективна – на стадии передачи здания от строителей заказчику (при работе государственной комиссии); – при определении объема ремонтных работ; – расследовании жалоб жильцов; – составлении энергетического паспорта здания, в котором отмечают особенности теплового режима и оценивают теплопотери как отдель-

ных частей, так и всего здания в целом; – при анализе эффективности новых строительных материалов и конструкций и оптимизации архитектурных решений.

4. Нормативная база

В США, Швеции, Финляндии утверждены национальные стандарты и разработаны инструктивные указания (guidelines) по строительному тепловидению [5, 6]. В Европе действует стандарт ISO 6781-83 [7], который вводит соответствующую терминологию и определяет самые общие положения. Репликой данного документа является ГОСТ 26629-85 [8]. В ряде СНиП тепловизоры упомянуты в качестве средства измерения температуры в строительстве. В Москве силами ряда организаций, в частности, НИИ Мосстроя, разработаны местные инструктивные документы по строительному тепловидению [9, 10]. На базе этих документов в Томском НИИ интроскопии разработана методика диагностики строительных конструкций, на основе которой в г. Северске Томской области указом главы администрации с 1999 г. внедрена 100 % тепловизионная диагностика нового жилья. Расценки на тепловизионные осмотры утверждены Прейскурантом Минтопэнерго РФ.

5. Оценка сопротивления теплопередаче

Сопротивление теплопередаче R является основной количественной характеристикой ограждающей конструкции:

$$R = 1/\alpha_{\text{ind}} + 1/\alpha_{\text{out}} + R_i, \quad (1)$$

где α_{ind} и α_{out} – коэффициенты теплообмена соответственно внутренней и наружной поверхностей с учетом конвективной и лучистой компоненты, $R_i = d/\lambda$ – термическое сопротивление ограждающей конструкции (d – толщина стенки; λ – коэффициент теплопроводности).

Коэффициенты теплообмена на внутренних и наружных поверхностях зависят от условий съемки и требуют специальных измерений, в частности, с помощью датчиков теплового потока. Непосредственной характеристикой ограждающей конструкции является термическое сопротивление стенки R_i , которое легко определяется, если известны коэффициент теплопроводности и толщина стенки.

В строительной практике необходимо оценивать сопротивление теплопередаче на «живом» доме с целью установления соответствия фактических значений проектным. Методика определения этой величины регламентирована ГОСТ 26254-84 [19]. Расчетной формулой является:

$$R = \frac{1}{\alpha_{\text{ind}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{out}}} + \frac{T_{\text{ind}}^{\text{air}} - \frac{\alpha_{\text{out}}}{\alpha_{\text{ind}}}(T_{\text{out}}^{\text{wall}} - T_{\text{out}}^{\text{air}}) - T_{\text{out}}^{\text{wall}}}{\alpha_{\text{out}} \cdot (T_{\text{out}}^{\text{wall}} - T_{\text{out}}^{\text{air}})}, \quad (2)$$

где T_{ind}^{air} и T_{out}^{air} – температура соответственно внутреннего и наружного воздуха, T_{out}^{wall} – температура наружной стенки; формула (2) является модификацией соотношения, рекомендуемого ГОСТ 26254-84.

Значения коэффициентов теплоотдачи на внутренних и наружных поверхностях измеряются экспериментально по средним тепловым потокам и средним температурам с помощью датчика теплового потока, например, ИТП-11.

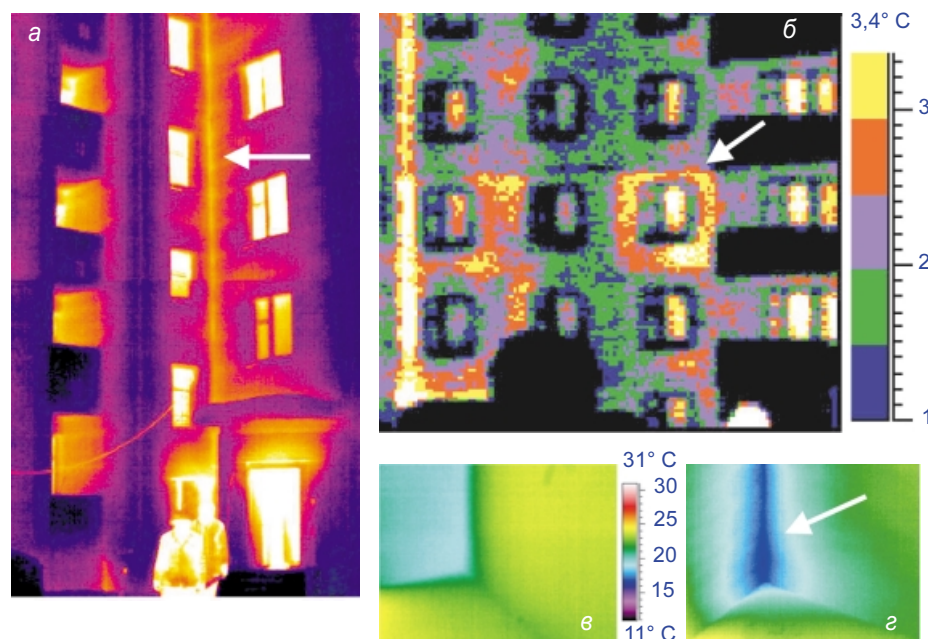
Основная методическая проблема заключается в том, что определение R путем натуральных измерений является типичной *обратной* задачей технической диагностики. Математически такие задачи являются *некорректными* (неустойчивыми), поскольку малым изменениям измеряемых параметров, например, температуры T_{out}^{wall} соответствуют значительные изменения определяемых параметров, в частности R . Другим источником погрешности определения R является нестационарный характер реального теплообмена в зданиях, тогда как формула (2) справедлива для стационарного случая. По ГОСТ 26254-84 натурные испытания ограждающих конструкций следует проводить в течение 15 суток. С этой точки зрения тепловизор является таким же средством измерения температуры, как и термометр, поэтому необходимо отслеживать процесс нестационарного теплообмена снижает привлекательность тепловидения как оперативного способа исследования больших поверхностей.

По нашему опыту, применение тепловизоров в работах по оценке R , требуемых Госархстройнадзором при сдаче зданий в эксплуатацию, не дает преимуществ по сравнению со стандартными термометрами, поскольку эти работы требуют дополнительно применять датчики теплового потока и измерять температуру в течение длительного времени.

Тепловизионный метод более применим в лабораторных условиях, где легко выполнимо условие стационарности, и все необходимые параметры можно измерить с требуемой точностью. Например, размещая в климатической камере несколько образцов строительных материалов, возможно определить как абсолютные, так и относительные значения R_i . Разработанная в НИИ интроскопии компьютерная программа «Buildidge» позволяет преобразовывать стандартные термограммы в цветные распределения значения R_i по исследуемым поверхностям. Погрешность такого метода нами оценена на уровне $\pm 15\%$.

Тепловизионная оценка сопротивления теплопередаче окон имеет свою специфику из-за 1) нелапбертовского характера излучения и отражения на стеклянных поверхностях, 2) влияния воздушных протечек из оконных щелей на температуру поверхности стекла и 3) возможной полупрозрачности конструкций.

Рис. 1. Тепловизионная диагностика в строительстве: а – дефектный угловой шов в кирпичном доме ($\Delta T = 2,5^\circ C$); б – панель с пониженной теплозащитой ($\Delta T = 1,0^\circ C$); в – угловой шов бездефектной наружной и внутренних стен; г – дефектный угловой шов ($\Delta T = 5^\circ C$)



руктивных элементов для ИК излучения, например, пленок, покрытий и т. д. Соответствующие методики разрабатываются.

6. Дефекты строительных конструкций (пассивный режим обнаружения)

Пассивный режим обнаружения скрытых дефектов возможен, если дефекты столь значительны, что температурные аномалии в зоне их нахождения возникают даже в стационарном режиме. В ограждающих конструкциях такими дефектами являются протечки воздуха, мостики холода и существенные локальные изменения сопротивления теплопередаче.

Амплитуда температурного сигнала в месте протечки (*инфильтрации*) воздуха зависит от перепада давления (температурного напора) между внутренними помещениями и наружной атмосферой. Температурный напор может быть как положительным, так и отрицательным, в зависимости от особенностей вентиляции и высоты точки контроля. Во многих случаях именно протечки создают легко идентифицируемые температурные сигналы амплитудой до $6 - 12^\circ C$ на внутренних поверхностях и до $3 - 6^\circ C$ на наружных. Протечки характерны для угловых и температурных швов зданий, оконных проемов, подбалконных плит, козырьков и т. п. Типичное температурное поле дефектного углового шва в кирпичном доме показано на рис. 1а.

Мостики холода возникают в местах заделки элементов несущих конструкций (ригелей, балок, колонн), в частности, в результате непродуманных архитектурных решений. Например, при определенных температурных условиях металлические балки между крышей и стенами могут приводить к обильному образованию сосулек.

Локальные изменения R , если они не сопровождаются протечками воздуха, приводят к существенно меньшим температурным аномалиям: на наружных поверхностях температурные сигналы достигают $0,5 - 3^\circ C$, например, в зонах низкокачественной кирпичной кладки, в результате оседания утеплителя в панелях и т. п. При одинаковых температурах внутри помещений дефектные панели характеризуются повышенной температурой наружной поверхности (рис. 1б).

Более тщательный анализ дефектов строительства

производят при осмотре внутренних помещений. Типичные термограммы бездефектного и дефектного углового шва изображены на рис. 1в, г.

Конечным результатом тепловизионного осмотра является карта дефектов (рис. 2), которая составляется на основе анализа как панорамных, так и отдельных термограмм.

7. Дефекты строительных конструкций (активный режим обнаружения)

Активная диагностика предусматривает наличие дополнительных источников теплового стимулирования объектов контроля. Выявление мест протечек воздуха может быть существенно улучшено путем искусственного понижения давления в отдельных помещениях.

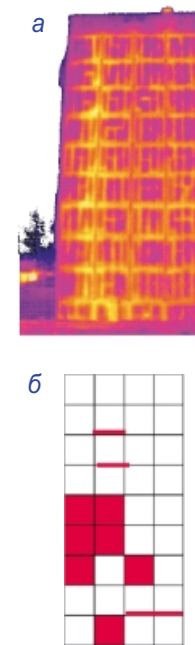
Отслоения штукатурки от основной стены могут быть обнаружены как при естественном солнечном нагреве, так и путем принудительного нагрева с помощью электрических ламп накаливания или воздушных пушек. В частности, метод активной тепловизионной диагностики разрабатывается автором совместно с итальянскими исследователями при диагностике настенных фресок [11]. В России этот метод был использован при обнаружении дефектов декоративной штукатурки на здании сценической коробки Новосибирского театра оперы и балета.

Отдельной сравнительно малоисследованной областью применения тепловидения в строительстве является анализ механических напряжений в конструкциях при циклической нагрузке. Известно, что механические деформации приводят к появлению температурных градиентов. Лабораторные исследования в этой области описаны, например, в [12]. Анализ здания казармы Томского военного училища связи, разрушившейся в результате катастрофы в 1997 г., показал, что спустя неделю после разрушения в некоторых стыках горизонтальных ригелей и вертикальных колонн наблюдались температурные аномалии, которые через месяц полностью исчезли [13]. Тем не менее, практическое использование тепловидения для предсказания разрушения зданий, в особенности при работающей в здании системе отопления, остается проблематичным и требует фундаментальных исследований.

8. Заключение

Тепловизионная диагностика строительных конструкций испытывает возрождение благодаря появлению на рынке портативных тепловизоров с неохлаждаемыми мозаичными детекторами излучения. Стандартная процедура диагностики включает 100% осмотр наружных поверхностей здания и выборочный осмотр внутренних помещений в течение 1–2 часов с фиксацией 30–200 термограмм на гибких дисках или РСМСИ картах. Конечным результатом осмотра является карта дефектов, на основе которой производится ремонт здания. Основными обнаруживаемыми дефектами являются протечки воздуха, мостики холода и участки пониженного сопротивления теплопередаче.

Рис. 2. Панорамная термограмма торцевого фасада панельного жилого дома с многочисленными дефектами швов (а) и карта обнаруженных дефектов (б)



При дополнительной тепловой стимуляции возможно обнаружение скрытых структурных дефектов в активном режиме.

Тепловидение также может служить наглядным средством исследования механических напряжений в строительных конструкциях, однако его практическое применение для прогнозирования несущей способности сооружений остается проблематичным.

Современное состояние тепловизионной диагностики в строительстве характеризуется качественными оценками, в которых существенную роль играет опыт оператора-термографиста. Количественная оценка сопротивления теплопередаче в натуральных экспериментах возможна по методике, регламентируемой ГОСТ 26254-84, и не дает тепловизорам существенных преимуществ перед стандартными контактными средствами измерения температуры.

Широкое внедрение тепловизионного метода сдерживается высокой стоимостью зарубежных и относительно низким качеством отечественных тепловизоров, а также отсутствием нормативных документов, которые бы создавали мотивацию для использования метода как строительными, так и эксплуатирующими организациями.

Литература

1. Sopko V. A. Discussion of the "Standard Practice for the Location of Wet Insulation in Roofing Systems Using Infrared Imaging". – Proc. SPIE "Thermosense XIII". 1991. Vol. 1467, P. 16 – 22.
2. Petersson B., Axen B. Thermography: Testing of Thermal Insulation and Airtightness of Buildings. – Swedish Council for Building Research and Sweden, 1980. – 130 p.
3. Ljungberg S. A. Infrared Techniques in Buildings and Structures: Operation and Maintenance. – In: Infrared Methodology and Technology / Nondestructive Testing Monographs and Tracts / Vol. 7. – USA: Gordon and Breach Science Publishers. 1994. P. 211 – 252.
4. Дроздов В. А., Сухарев В. И. Термография в строительстве. – М.: Стройиздат, 1987. – 238 с.
5. ASTM Standard C1060 / Thermographic Inspection of Insulation in Envelope Cavities in Wood Frame Buildings / – Philadelphia (USA): ASTM. 1987
6. Guidelines for Specifying and Performing Infrared Inspections. – Infraspection Inst., 1988.
7. Международный стандарт ISO 6781-83 "Теплоизоляция. Качественное выявление теплотехнических нарушений в ограждающих конструкциях. Инфракрасный метод".
8. ГОСТ 26629-85 "Метод тепловизионного контроля качества. Теплоизоляция ограждающих конструкций".
9. Инструктивные указания по осуществлению прямых тепловизионных методов определения фактических теплотехнических показателей ограждающих конструкций при паспортизации жилых домов массовых серий. – Разр. НИИ Мосстроя г. Москвы по договору № 6-4/97 от 3 июня 1998г. с Управлением внебюджетного планирования и развития г. Москвы.
10. Ведомственные строительные нормы по теплотехническому обследованию наружных ограждающих конструкций зданий с применением малогабаритного тепловизора (ВСН 43-96). – Утв. 30.07.96 Департаментом строительства г. Москвы.
11. Vavilov V. P., Grinzato E., Bison P. G., Marinetti S. Nondestructive Testing of Delaminations in Frescoes Plaster Using Transient Infrared Thermography. – Res. in NDE. 1997. Vol. 5. No. 4. P. 57 – 71.
12. Luong M. P. Infrared Thermography of Fatigue Behavior of Concrete. – In: Proc. 11th European Conf. on Earthquake Engineering, 6-11 Sept. – Paris, 1998. – 11 p.
13. Vavilov V. P. Infrared thermographic survey of building debris: Tomsk High Military School of Communication Engineering catastrophe case study. – Proc. SPIE "Thermosense-XX" 1998. Vol. 3361. P. 68 – 72.