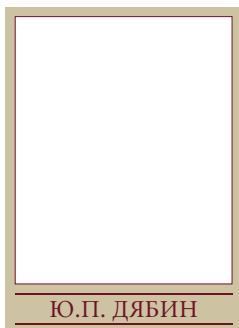


ОБЗОРНАЯ (ПАНОРАМНАЯ) ТЕРМОГРАММА ВЫСОКОГО КАЧЕСТВА – ОСНОВА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ



Ю.П. Дябин, канд. физ.-мат. наук, Специалист по тепловизионному контролю 2-й уровень, начальник отдела
АНО ПИИ «ЦЭИС», г. Казань

Инфракрасная термография — реализованная в виде тепловизионного контроля, широко применяется в различных областях науки и техники, в том числе в строительной отрасли, преимущественно, в целях контроля качества тепловой защиты зданий и сооружений. Основным средством теплового контроля, согласно [1], является тепловизор, с помощью которого дистанционно измеряют поля температур обследуемых поверхностей с последующим формированием термограмм, записываемых в память электронных носителей, и одновременной визуализацией на устройствах отображения. Таким образом, первичной — исходной информацией тепловизионного обследования является **термограмма**, качество которой будет определять корректность и достоверность тепловизионной диагностики.

Согласно [2], **термограмма** — это многоэлементное двумерное изображение, каждому элементу которого приписывается цвет/или градации одного цвета /или градации яркости экрана, определяемые в соответствии с условной температурной шкалой. **Элемент разложения термограммы** — минимальный участок термограммы, соответствующий сигналу, измеренному одним элементом матрицы тепловизора (для матричных приборов), либо элемент разложения изображения (для приборов сканирующего типа). Необходимо отметить, что качественная термограмма, соответствующая обработке которой позволяет определять численные

значения характеристик температурных полей обследуемого объекта, может быть получена с помощью **измерительного тепловизора**, имеющего высокие технические характеристики, основной состав которых и порядок определения (метрологического измерения, включающего методику первичной и периодической поверок) приведен в [2]. По результатам поверки на телевизор выдают свидетельство в соответствии с требованиями [3].

В основной состав параметров тепловизора входят [2]:

- **угол поля зрения** — пространственный угол, в пределах которого осуществляется формирование термограммы;

- **элементарное поле зрения (мгновенный угол поля зрения)** — пространственный угол, в пределах которого инфракрасное излучение воспринимается одним фоточувствительным элементом фотоприемного устройства;

- **порог температурной чувствительности (разность температур, эквивалентная шуму)** $\Delta T_{\text{пор}}$ — приращение температуры, равное среднеквадратичному значению шума в термограмме, при наблюдении однородного фона с заданной температурой;

- **действительное количество элементов разложения термограммы** — число исправных фоточувствительных элементов в фотоприемном устройстве тепловизора;

- **неравномерность чувствительности тепловизора по полю** — максимальное

значение перепада температур фрагментов термограммы равноизлучающего по поверхности эталонного (образцового) протянутого излучателя;

- **диапазон измерений и основная погрешность** измерения радиационной температуры;

- **сходимость показаний** тепловизора.

Разработчики тепловизоров ведущих зарубежных фирм (FLIR — США, NEC — Япония, TESTO — Германия и др.) отдельные параметры, указанные выше, обозначают и определяют по-разному. Так, параметр — **порог температурной чувствительности (разность температур, эквивалентная шуму)** определяется как:

- разрешающая способность;
- температурная чувствительность (NETD);
- чувствительность на 30 °С.

Параметр — **элементарное поле зрения (мгновенный угол поля зрения)** определяется как:

- пространственное разрешение (IFOV);
- мгновенное поле зрения;
- иногда не указано, но приведено количество пикселей и угол поля зрения, т.е. можно самостоятельно посчитать и определить.

Что касается параметров — **действительное количество элементов разложения термограммы и неравномерность чувствительности тепловизора по полю**, то в технических характеристиках имеющихся тепловизоров данные отсутствуют. Более того, при проведении

поверок в соответствующих метрологических органах в свидетельстве о проверке эти данные также не указываются. Отсутствие указанных параметров не позволяет отнести конкретный тепловизор к **классу измерительных** с последующими выводами и ограничением практической области применения.

Как следует из определения, **термограмма** — это многоэлементное двумерное изображение. Точность измерения величины сигнала каждого элемента разложения термограммы, а также однозначность соответствия элемента термограммы реальному (действительному) элементу обследуемой поверхности, определяет качество термограммы в целом. **Точность измерений тепловизором**, в основном, можно охарактеризовать величиной $\Delta T_{\text{пор.}}$, которая представляет собой разность температур объекта и фона, излучающих как черные тела в стандартном тест-объекте, при которой отношение пикового значения сигнала к среднеквадратичной величине шума на выходе системы, рассматривающей тест-объект, равна единице. При этом тест-объект полностью перекрывает угол поля зрения тепловизора, что необходимо для обеспечения получения полной реакции фотоприемника излучения в данной системе. $\Delta T_{\text{пор.}}$ характеризует в общем чувствительность системы. Если две идентичные по другим параметрам системы отличаются значительно, то система с меньшей величиной $\Delta T_{\text{пор.}}$ имеет большую чувствительность [4].

В большей степени на качество термограммы оказывает величина, определяющая **действительное количество элементов разложения термограммы**, — число исправных фоточувствительных элементов в фотоприемном устройстве тепловизора. Дело в том, что специфика тепловизионного изображения накладывает определенные требования на процесс поиска, обнаружения, распознавания, идентификации объектов, находящихся на различных расстояниях и в разнообразных температурных условиях. В настоящее время разработан и успешно

применяется ряд методик, основанных на определенных критериях [5], позволяющих определить максимальные дальности, на которых с помощью тепловизионного прибора, при заданной вероятности Р, объекты с произвольной формой контура при наблюдении на неоднородном фоне могут быть обнаружены и опознаны. В случае, связанном с обнаружением и опознанием дефектных зон (участков) на внешней поверхности строительных и производственных объектов, наиболее эффективно использование концепции эквивалентных мир, согласно которой вероятность решения задачи по обнаружению (опознанию, идентификации) полностью определяется числом полупериодов (штрихов) N эквивалентной разрешаемой миры, укладываемых на минимальный размер дефектного участка. Согласно исследованиям Джонсона [6], диапазон значений критерия N в зависимости от типа решаемой задачи составляет:

- режим «обнаружения» $N = 2 (+1 - 0.5)$ штрихов на высоту участка;
- режим «опознавания» $N = 8 (+1.6 - 1.4)$ штрихов или полупериодов эквивалентной миры на минимальный размер участка.

Один период эквивалентной миры содержит два штриха равной толщины — темный («холодный») и светлый («теплый»).

С течением времени критерии Джонсона уточнялись и их современные значения, представленные в **таблице 1**, несколько отличаются от значений, приведенных выше, но их также называют критериями Джонсона.

Величина N в **таблице 1** определяет количество периодов эквивалентной миры, разрешаемых наблюдателем для данного уровня восприятия с 50%-ной вероятностью.

Для оценки других величин вероятности восприятия вычислены множители для пересчета вероятности восприятия, величины которых приведены в **таблице 2**.

Из представленных данных **табл. 1, 2** следует, что для идентификации объекта с вероятностью 0.95 необходимо, чтобы на его критическом (минимальном) раз-

мере уложилось $8 \times 2 = 16$ периодов эквивалентной миры. В обычной практике (с целью упрощения оценки эффективности применения тепловизора для решения задач обнаружения и опознавания) период эквивалентной миры, состоящей из двух штрихов, для простоты оценок заменяется двумя пикселями, тем самым в **таблице 1** принимается различие объекта с вероятностью 50% при 8 пикселях на термограмме, размещенных на минимальном размере обследуемого участка. Такой подход не вносит значительных погрешностей в процедуру опознавания, обнаружения, поскольку не противоречит применению концепции эквивалентной штриховой миры, имеющей прямоугольную форму, ширина которой равна минимальному (критическому) размеру объекта, а длина соответствует его размеру в направлении, перпендикулярном критическому. Следует также отметить, что данный подход, в определенной степени, лежит в основе критерия, учитывающего число элементов разложения в изображении объекта [5] при определении дальности опознавания, обнаружения.

В указанных выше критериях считается, что элемент разложения термограммы соответствует каждому пикселю приемника излучения, величина сигнала которого пропорциональна сигналу от обследуемого объекта, сформированного в поле зрения отдельного пикселя (мгновенного угла поля зрения системы), при условии наличия достаточного температурного контраста. Мгновенное поле зрения в этом случае определяет расстояние, на котором критический размер объекта попадет на требуемое число пикселей для обеспечения обнаружения, распознавания и идентификации. Это обстоятельство отражено в актуализированной редакции ГОСТ 26629-85 по тепловизионному контролю [7], где рекомендуется процедура выбора удаленности точки съемки L, м (расстояния до объекта), исходя из величины наименьшего линейного размера Δh , м, подлежащего

Таблица 1. Современные критерии визуального восприятия

Уровень видения	Описание	N
Обнаружение	Выделение размытого пятна на фоне помех	1.0
Различение	Объект выделяется с достаточной ясностью и дифференцируется по принадлежности к классу	4.0
Идентификация (опознавание)	Объект дифференцируется по принадлежности к типу внутри класса	8.0

Таблица 2. Множители для пересчета вероятности восприятия

Вероятность восприятия	1.0	0.95	0.80	0.5	0.30	0.10	0.02
Множитель	3.0	2.0	1.5	1.0	0.75	0.50	0.25

выявлению участка ограждающей конструкции по формуле:

$$L \leq \Delta h / 5\Delta\phi, \quad (1)$$

где $\Delta\phi$ — мгновенное поле зрения тепловизора, определяемое как линейный угол зрения одного элемента разложения термограммы, рад.

Значение Δh может быть принято равным:

- при контроле внутренней поверхности — от 0.01 до 0.2 м;
- при контроле наружной поверхности — от 0.2 до 1 м.

Данная формула (1) фактически предполагает, согласно табл. 1, 2, процедуру различения с вероятностью менее 40%, что следует из формулы (1), записанной в следующем виде:

$$\Delta h / L \cdot \Delta\phi \geq 5. \quad (2)$$

Это означает, что на выбранном расстоянии L , при заданном мгновенном поле зрения $\Delta\phi$, на линейном размере обследуемого участка Δh укладывается 5 штрихов (ширина штриха составляет величину, равную $L \cdot \Delta\phi$) полупериодов эквивалентной миры. Из приведенных данных следует актуальность величины мгновенного поля зрения, особенно при обследовании малоразмерных объектов на значительных удаленностях (расстояниях), а также количество элементов разложения (пикселей), составляющих изображение объекта.

Как отмечалось выше, в технических характеристиках тепловизоров не приводятся основные данные, определяющие качество термограмм (**действительное количество элементов разложения термограммы** — число исправных фоточувствительных элементов в фотоприемном устройстве тепловизора, **неравномерность чувствительности тепловизора по полю**), что в свою очередь затрудняет объективный выбор измерительного тепловизора, необходимого для выполнения надежных тепловизионных измерений.

В сложившейся ситуации имеется возможность получить объективную оценку технических характеристик тепловизора, исходя из специфических конструктивных особенностей конкретного прибора. В последнее десятилетие XX века тепловизионные приборы совершенствовались по двум основным направлениям: с использованием дискретных приемников излучения, совместно с механическими системами сканирования (развертки) изображения, и

приборов без механического сканирования. В настоящее время можно выделить четыре поколения тепловизионных приборов [8].

Нулевое поколение основано на применении одиночных приемников излучения и двумерной развертки изображения с помощью сканирующей оптико-механической системы; **первое поколение** — на применении одномерных линеек фотоприемников и одномерной оптико-механической развертки изображения; **второе поколение** — на применении матриц фотоприемников в виде двух–шести линеек с ВЗН (временная задержка и накопление) и одномерной оптико-механической развертки изображения. Новое, **третье поколение**, основано на применении «смотрящих» фокально-плоскостных двумерных многоэлементных матриц фотоприемников, расположенных в фокальной плоскости оптической системы FPA (Focal Plane Arrays), без использования оптико-механических систем развертки изображения [8]. Исходя из данного деления приборов по поколениям, можно с уверенностью утверждать, что тепловизор с одноэлементным приемником и сканирующей оптической системой с плоскими зеркалами [5] является в полной мере измерительным тепловизором, так как вопрос о **действительном количестве элементов разложения термограммы** выполняется автоматически (обычно используется высокочувствительный охлаждаемый фотонный приемник с высокой стабильностью параметров). Применяемая оптическая система сканирования развертки изображения с минимальными оптическими aberrациями, в свою очередь, обеспечивает высокую однородность **чувствительности тепловизора по полю**, так как подобная система сканирования не вносит дополнительных aberrаций.

В свою очередь, тепловизор с приемником на основе микроболометрической матрицы с количеством фоточувствительных приемных элементов от (160 x 120 до 640 x 480) и соответствующей линзовой оптикой характеризуется рядом ограничений, не позволяющих однозначно отнести его к классу измерительных тепловизоров.

Во-первых, наличие большого числа приемных фотоэлементов микроболометрической матрицы требует специальных мер по выравниванию и стабилизации чувствительности каждого приемного элемента с целью минимизации естественной неоднородности параметров, что в определенной степени сказывается на сходимости показаний тепловизора при использовании в изменяющихся окружающих условиях измерений.

Во-вторых, каждая матрица имеет долю дефектных чувствительных приемных фотоэлементов [9], число которых в зависимости от материала и технологий изготовления изменяется в пределах 0.005–1% от общего числа приемных элементов. Данное обстоятельство учитывается в схемном решении тепловизора с применением микроболометрической матрицы. Блок-схема прибора в обязательном порядке включает в себя цифровой корректор неоднородности сигналов, а также корректор неработающих элементарных фотоприемников матрицы [8]. Следует также отметить необходимость применения специальных методов цифровой обработки изображений [10], с целью компенсации неоднородностей параметров и характеристик элементов матричного приемника, а также выявления дефектных элементов и их замещения.

В-третьих, применение линзовой оптики характеризуется существенными aberrациями. Таким образом, тепловизор с микроболометрической матрицей в качестве приемника ИК-излучения в обязательном порядке должен поверяться на предмет определения действительного количества элементов разложения термограммы с целью определения числа **исправных** чувствительных элементов приемника. Также необходимо определение неравномерности чувствительности тепловизора по полю для учета вклада приемной оптики в формирование термограммы.

В дополнение отметим характерные особенности применения тепловизора в строительной области. Специфика тепловизионного обследования в строительстве состоит в том, что требуется одновременно решать вопросы по поиску, обнаружению и идентификации скрытых дефектов тепловой защиты наружных ограждающих конструкций зданий и сооружений, имеющих значительные линейные размеры как по высоте, так и по длине (порядка десятков и сотен метров), и при этом необходимо не пропустить дефектные зоны с линейными размерами от 0.1 м и более. Следует также отметить, что дефектные (аномальные) зоны необходимо оценивать по температурному перепаду в зоне аномалии путем сравнения с эталонной (реперной) зоной. Величина перепада может достигать значений порядка 0.1–0.5 °C. Кроме того, согласно [7], на первом этапе обследования требуется получать обзорные (панорамные) термограммы фасадов зданий, необходимые для выбора базовых и реперных

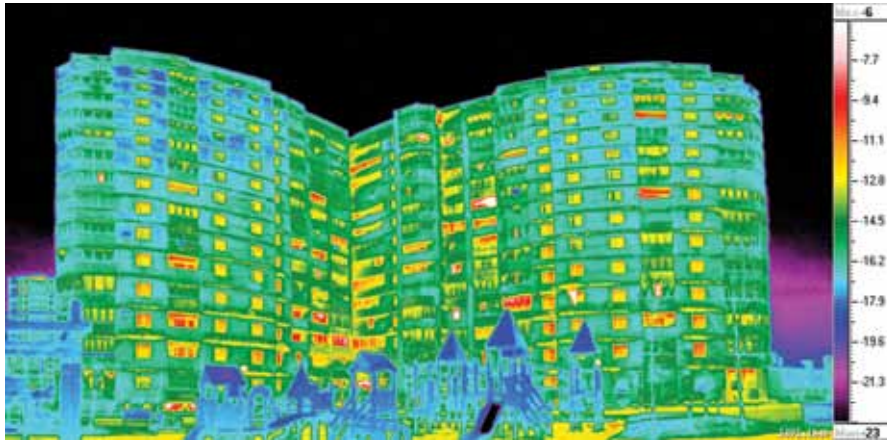


Рис. 1.

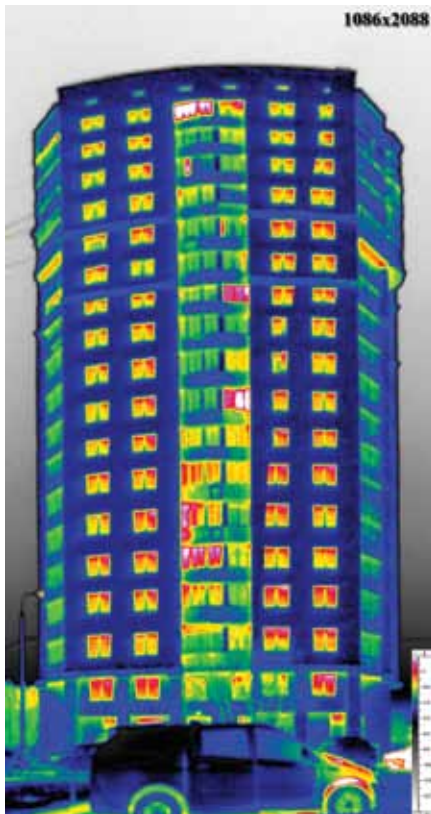


Рис. 2.

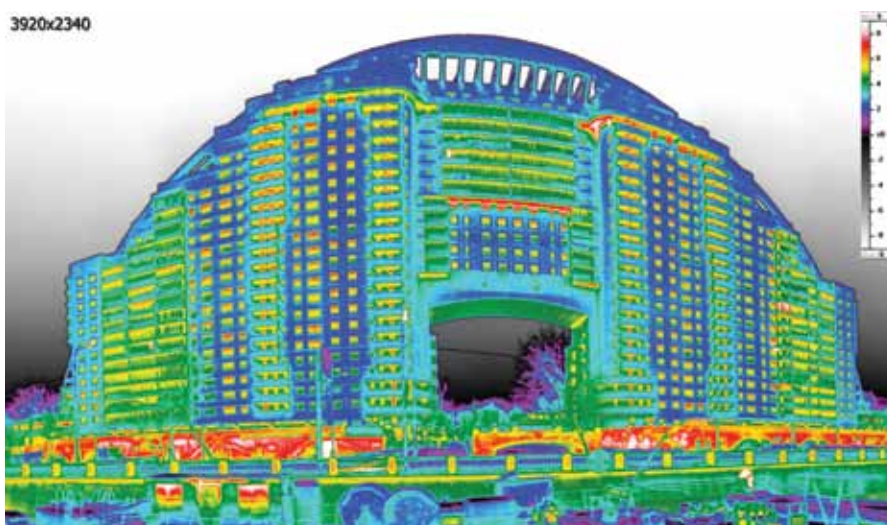


Рис. 3.

участков (ОК), что, в свою очередь, весьма непросто выполнить с требуемой точностью по всему фасаду здания, если учесть что объект может быть высотным.

Таким образом, возрастает значимость данных о числе неработающих элементов фотоприемника, а также их месторасположения в матрице. Необходимо дополнительно знать применяемый алгоритм замещения неработающих пикселей, реализованный в каждом тепловизионном приборе. Если же учесть, что требуется анализировать как минимум 10 пикселей (что определяет детальность тепловизионного обследования), то наличие даже одного неработающего элемента приемника и при неизвестном алгоритме замещения (обычно используются сигналы от работающих соседних приемных площадок), приводит к значительному понижению вероятности опознавания локальных объектов, либо вообще к полной потере данного объекта на термограмме. Дополнительно следует указать на важность выполнения требования однородности **чувствительности тепловизора по полю**, что в значительной

степени определяет качество термограммы, реализованной в виде отдельного кадра. Дело в том, что формирование качественной обзорной термограммы из отдельных кадров требует перекрытия соседних кадров в пределах 15–20% [1]. Подводя итог вышеизложенному, можно констатировать, что в настоящее время тепловизор с одноэлементным приемником и сканирующей оптической системой с плоскими зеркалами разработки и производства компании «ИРТИС» отвечает в полной мере требованиям, предъявляемым к измерительным тепловизионным приборам (тепловизорам), гарантирующим высокую точность радиометрических измерений.

Примеры термограмм-панорам приведены на рис. 1–3.

Библиография

1. РД 13-04-2006. О порядке проведения теплового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах. М.: 2007.
2. ГОСТ 8.619-2006. Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки. М.: Стандартинформ, 2006. 16 с.
3. ПР 50.2.006-94. ГСИ. Порядок проведения поверки средств измерений. М.: 1994.
4. Ллойд Дж. Системы тепловидения. / Пер. с англ. под ред. А.И. Горячева. М.: Мир, 1978. 416 с.
5. Макаров А.С., Омелаев А.И., Филиппов В.Л. Введение в технику разработки и оценки сканирующих тепловизионных систем. Казань: Изд-во «Унипресс», 1988. 320 с.
6. Johnson J. Analysis of Image Forming Systems. Proceedings of the U.S. Army Engineer Research and Development Laboratories, Port Baelvar. Va. Image Intensifier Symposium. 1958, 6–7 Oct/ (AD 220160). P. 249–273.
7. ГОСТ Р 54852-2011. Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций. М.: Стандартинформ, 2012. 16 с.
8. Ковалев А.А., Ковалев А.В. Технические средства антитеррористической и криминалистической диагностики. М.: Изд. дом Спектр, 2011. 206 с.
9. Дмитриев Е. Разработка элементной базы фотоприемных устройств отображения видеоинформации. // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес № 2.2005, С. 74–79.
10. Демидов В.М. Методы и средства цифровой коррекции изображения в оптико-электронных системах визуализации. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. М.: 2008. 23 с.