

УДК. 536.521

К вопросу о точности измерения температуры с помощью тепловизора

Канд. техн. наук С. С. ПРОШКИН
stach@mail.ru

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»
199106, Санкт-Петербург, 21 линия ВО, 2

Рассмотрены теоретические и технические предпосылки возникновения тепловизионной техники. В краткой форме рассмотрен принцип работы современных тепловизоров и ИК-термометров. На основе анализа законов теплового излучения показана важность учета интегрального коэффициента излучения при температурных измерениях.

Подробно рассмотрены факторы, влияющие на точность измерения температурных полей с помощью тепловизионной техники. К таким факторам следует отнести: структуру поверхности; наличие покрытий на поверхности; угол наблюдения; форму поверхности. Особое внимание уделено учету параметров окружающей среды, например, отраженной температуры и конвективного потока воздуха. Изложение материала сопровождается конкретными примерами из практики тепловизионных измерений реальных объектов.

Ключевые слова: тепловое излучение, тепловизор, коэффициент излучения.

The problem of the accuracy of temperature measuring by means of a thermographic camera

Ph. D. S. S. PROSHKIN
stach@mail.ru

National mineral resources university (university of Mines)

Theoretical and technical background of thermal imaging technology is discussed. Operational principles of a modern thermal camera and infrared thermometer are briefly reviewed. The importance of taking into account the integral emissivity coefficient in temperature measurements is demonstrated on the basis of the analysed regularities of heat radiation.

The factors affecting the accuracy of temperature field measurements with the help of thermal imaging technology are speculated upon in detail. Such factors are surface structure, presence of coating on the surface, angle of observation, and shape of the surface. Special attention is given to environmental factors that need to be considered, such as, for example, reflected temperature and convective air flow. The content of the article is illustrated by specific examples of applying thermal imaging in practical measurements.

Keywords: heat radiation, thermographic camera, emissivity coefficient.

За последние двадцать лет значительно возрос интерес к измерениям температуры с помощью тепловизоров и ИК-термометров. Современные тепловизоры используются в тех случаях, когда необходим тщательный контроль за тепловым состоянием объектов и необходимо бесконтактное измерение температуры. Особенно широкое применение тепловизоры получили в строительстве, энергетике, металлургии, в дорожном строительстве, судостроении, строительстве и эксплуатации железнодорожного полотна.

В последние годы тепловизоры все чаще используются при работе пожарных и спасательных служб. Также тепловизоры применяются вооруженными силами развитых государств для обнаружения теплоконтрастных целей (живой силы и техники) в любое время суток. Особо следует подчеркнуть преимущества, которые дает тепловизионная техника при использовании в медицинских целях.

Несмотря на то, что первые тепловизоры были созданы еще в 30-х годах XX века, в последние двадцать лет в этой области наблюдается бурный прогресс. Связано это, прежде всего, с колоссальными успехами, достигнутыми в области микроэлектроники и технологии получения чистых полупроводниковых веществ.

Дело в том, что принцип действия тепловизора основан на преобразовании инфракрасного теплового излучения в электрический сигнал, который усиливается и затем воспроизводится на ЖК-экране в виде цветной картины распределения температуры [1]. Принцип работы тепловизоров, разработанных в 60-е годы прошлого века, основывался на том, что тепловизионное изображение строилось посредством построчного сканирования одного ИК-датчика по поверхности объекта. В результате такие устройства были крайне непроизводительны и позволяли наблюдать за происходящими в объекте температурными изменениями с очень низкой скоростью и большой инерционностью.

Современные тепловизоры в своей работе используют матричные фотоприемники (матрицы ПЗС-датчиков) (рис. 1), дающие сразу полное изображение температурного поля объекта [1]. Данный принцип построения изображений позволил создать портативные устройства, с высокой скоростью обработки информации, которые дают возможность вести контроль за изменением температур в режиме реального времени.

Миниатюрные фотоприемники, устанавливаемые в фокальной плоскости объектива тепловизора, состоят из множества чувствительных элементов, расположенных по рядам и столбцам прямоугольной матрицы. Таким образом, в тепловизоре каждый пиксель — это

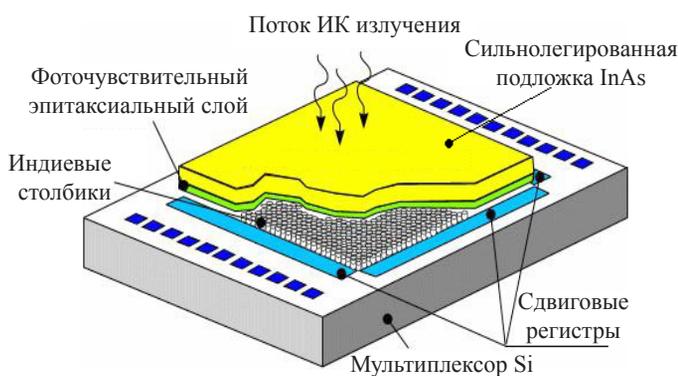


Рис. 1. ПЗС-матрица современного тепловизора

измеренное значение температуры в данной точке. Например, тепловизор с размерами матрицы 320×240 пикселей отображает ИК-изображение, состоящее из 76800 значений температуры. Фактически размер матрицы датчиков определяет разрешающую способность тепловизора. По этой причине любой тепловизор обладает приборным ограничением чувствительности по температурным измерениям, а количество элементов матрицы определяет качество получаемого инфракрасного изображения.

Тепловизионная техника служит для измерения температуры объектов бесконтактным способом, однако, при этом следует помнить, что тепловизор фиксирует не само температурное поле, а лишь тепловой поток в ИК-области, излучаемый поверхностью тела. Определение поля температур и построение термограмм производится программным обеспечением, «зашитым» в память тепловизора. Само же программное обеспечение прибора зачастую не учитывает многие физические эффекты, возникающие при излучении, поглощении и отражении теплового излучения, что неминуемо сказывается на результатах измерения температуры.

Напомним, что в основе тепловизионного метода лежат физические законы теплового излучения, в частности закон Стефана-Больцмана [2]:

$$\Phi_0 = \sigma T^4, \quad (1)$$

где Φ — суммарный тепловой поток с единицы поверхности тела, Вт/м²; σ — постоянная Стефана — Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); T — абсолютная температура поверхности, изучаемого объекта, К.

Формула (1) отвечает излучению абсолютно черного тела, под которым понимают физическую абстракцию. Считается, что абсолютно черное тело (АЧТ) полностью поглощает все падающее на него электромагнитное излучение, причем во всем диапазоне длин волн. Естественно в природе нет тел полностью соответствующих данному определению. Поэтому закон Стефана-Больцмана для реальных тел часто записывают следующим образом:

$$\Phi = \varepsilon_T \sigma T^4, \quad (2)$$

где ε_T — интегральный коэффициент излучения (черноты).

Формула (2) применяется для, так называемых, «серых» тел, у которых коэффициент черноты считается постоянным во всем диапазоне длин волн. Однако бо-

лее детальной характеристикой излучения тела является спектральный коэффициент черноты:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{\Phi_\lambda}{\Phi_{0\lambda}}, \quad (3)$$

где $\Phi_\lambda = \frac{d\Phi}{d\lambda}$ и $\Phi_{0\lambda} = \frac{d\Phi_0}{d\lambda}$ — соответственно спектральные плотности потоков реального тела и АЧТ, т. е. потоки, отнесенные к элементарному диапазону длин волн.

Спектральный коэффициент черноты оказывается гораздо более информативной характеристикой, чем интегральный коэффициент, поскольку излучение реальных тел отличается от излучения абсолютно черного тела, как по спектральному составу, так и по величине (рис. 2) [3]. При равных температурах реальные тела излучают тепловой энергии меньше, чем АЧТ. И при этом максимум спектральной плотности потока излучения у металлов оказывается смещенным в сторону коротковолновой части спектра, а у диэлектриков — в сторону длинноволновой части спектра относительно максимума спектральной плотности потока излучения АЧТ. Кроме того, реальные тела могут обладать селективностью, как в спектре излучения, так и поглощения. Наиболее заметен такой эффект для газов и чистых металлов.

Все современные тепловизоры, пирометры и ИК-термометры производят вычисление температуры по формуле (2), т. е. фактически изначально считается, что все тела — серые. Как легко заметить, коэффициент излучения ε_T является довольно значимым фактором в тепловых измерениях, и от того, правильно ли он задан в меню тепловизора перед началом работы, во многом зависят результаты контроля. Измерить ε_T непосредственно с приемлемой точностью по тем или иным причинам нередко оказывается невозможно. В связи с этим вводимое в тепловизор значение излучательной способности содержит ошибки, что приводит к погрешностям измерений, во много раз большим, чем основная погрешность используемого приемника.

Сказанное может быть проиллюстрировано следующим примером [4]. Предположим, что для измерения температуры 1000 °С объекта используется тепловизор, чья основная погрешность равна 1% от измеренного результата. Пусть излучательная способность объекта равна $\varepsilon_T = 0,63$, а оператор ошибочно будет считать, что ее значение равно 0,6. Подобная, несущественная на первый взгляд, ошибка в значении вводимой величины излучательной способности приведет к тому, что в результате измерения температура получится не 1000 °С, а 1037 °С, т. е. погрешность измерения окажется практически вчетверо больше основной погрешности прибора.

Таким образом, предварительное знание точного значения коэффициента ε_T исследуемого объекта является залогом получения удовлетворительных результатов при измерении температуры с помощью тепловизора. Проблема заключается в том, что коэффициент черноты сам является функцией большого числа параметров, учет которых на практике оказывается самостоятельной и трудно разрешимой задачей. К этим параметрам относятся: материал, структура поверхности, геометрия, угол визирования, длина волны, температура. Рассмотрим их влияние подробнее.

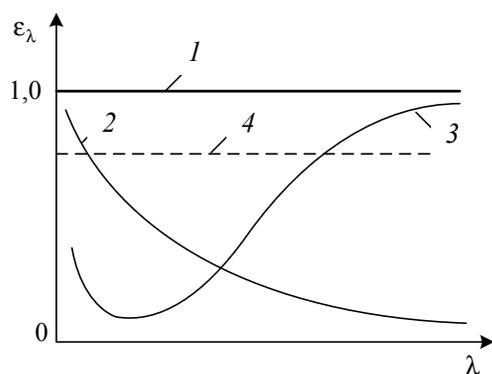


Рис. 2. Зависимость ϵ_λ от длины волны различных тел: 1 — АЧТ; 2 — металл; 3 — диэлектрик; 4 — серое тело [3]

Различные материалы могут обладать как низким, так и высоким коэффициентом излучения. Например, все неметаллы, как правило, обладают довольно высоким значением коэффициента излучения (асбест, кирпич, бетон, дерево имеют $\epsilon_T \approx 0,9$). Коэффициент излучения таких материалов, как правило, незначительно изменяется в зависимости от типа или состава материала, поэтому они практически не изменяют своих излучательных свойств с течением времени, а также с изменением температуры, и для таких материалов интерпретация тепловых изображений, в целом не представляет значительной трудности.

Для металлов, наоборот, разброс значений коэффициента черноты может быть очень значительным: например, чистый гладкий металл имеет $\epsilon_T \approx 0,05$, тогда как необработанный или корродированный — $\epsilon_T \approx 0,95$. Кроме того, коэффициент излучения металлов может изменяться с течением времени, а также незначительно меняться с изменением температуры. Поэтому измерение температуры и интерпретация термограмм у материалов с низкой излучательной способностью (т. е. хорошо отражающих) зачастую оказывается сложной задачей.

Рассмотрим процесс измерения температуры металлической пластины, у которой середина поверхности гладкая, а слева и справа — поверхность сильно окислена [4]. Так как в средней части пластины коэффициент излучения меньше, чем по краям, то и кажущаяся температура в центре окажется отличной от кажущейся температуры на краях: там, где коэффициент излучения больше, там температура кажется выше, хотя на самом деле температура пластины во всех местах одинакова.

Некоторые материалы обладают способностью зеркального отражения, что может стать причиной неправильного толкования полученной термограммы. Например, отражение теплового излучения самого оператора или света лампочки может привести к получению неправильных данных по температуре исследуемого объекта.

Некоторые металлы, в особенности с блестящей поверхностью, являются сильными отражателями длинноволнового инфракрасного измерения. Они обладают чрезвычайно низким коэффициентом излучения, который меняется в зависимости от температуры. В то же время, окрашенные металлические поверхности имеют высокий коэффициент излучения. Однако высокая зеркальная способность материала не всегда определяет его высокую отражательную способность. Например, зеркальное

отражение внешнего излучения можно увидеть на термограмме окрашенной поверхности в виде силуэта оператора, проводящего измерение, хотя краска обычно обладает высоким коэффициентом излучения ($\sim 0,95$) [4].

Часто исследуемые объекты покрыты пленкой, следовательно, при измерении температуры необходимо учитывать тот факт, что прозрачная пленка обладает довольно высокой излучательной способностью и имеет низкий коэффициент отражения. При этом ее степень пропускания и коэффициент излучения сильно зависят от толщины пленки, — чем она тоньше, тем ниже коэффициент излучения. При необходимости точных измерений температуры следует учитывать, что на поток теплового излучения может накладываться поток отраженного излучения, причем от двух поверхностей пленки.

На коэффициент излучения сильное влияние может оказывать структура поверхности. Как правило, чем более шероховата поверхность, тем выше ее коэффициент излучения. Это можно проиллюстрировать следующим примером [5]: пусть в поле тепловизора одновременно попадают две разные поверхности стены здания. Пусть левая часть стены покрашена масляной краской с $\epsilon_T \approx 0,95$ и является гладкой, а правая часть стены сделана из песчаника и, следовательно, более шероховата. Опыт покажет, что на экране тепловизора на левой половине термограммы стена будет казаться более холодной, чем часть этой же стены с правой стороны, хотя, очевидно, обе части стены должны иметь одинаковую температуру. С правой стороны, где поверхность стены более шероховата, коэффициент излучения оказывается выше, поэтому эта часть стены на термограмме будет иметь температуру выше, чем на левой стороне.

В ряде случаев при тепловизионных измерениях важное влияние оказывает угол визирования (наблюдения), т. е. угол, под которым расположен прибор к поверхности исследуемого объекта. Считается, что угол визирования при тепловизионной съемке не должен превышать 60° . Это связано с тем, что максимум излучения наблюдается в направлении, перпендикулярном поверхности тела, поэтому при увеличении угла визирования резко уменьшается поток принимаемого тепловизором излучения, что влияет на результаты. При этом может возникнуть трудность, о которой упоминалось выше: при визировании объекта с «гладкой» поверхностью по нормали к ней можно увидеть отражение излучения самого оператора.

Вследствие зависимости коэффициента излучения от угла наблюдения, эффективный коэффициент излучения неплоских поверхностей различен в разных точках, хотя речь идет об одном и том же материале, коэффициент излучения которого по нормали — величина постоянная.

Для металлов коэффициент излучения постоянен в интервале углов наблюдения $0 \dots 40^\circ$, для диэлектриков — в интервале углов $0 \dots 60^\circ$. За пределами этих значений, коэффициент излучения быстро уменьшается до нуля при направлении наблюдения по касательной. Так, при длине волны излучения 10 мкм при наблюдении по нормали, поверхность воды по своим излучающим свойствам близка к абсолютно черному телу, а при наблюдении по касательной становится зеркальной поверхностью с $\epsilon_T \approx 0$ [3].

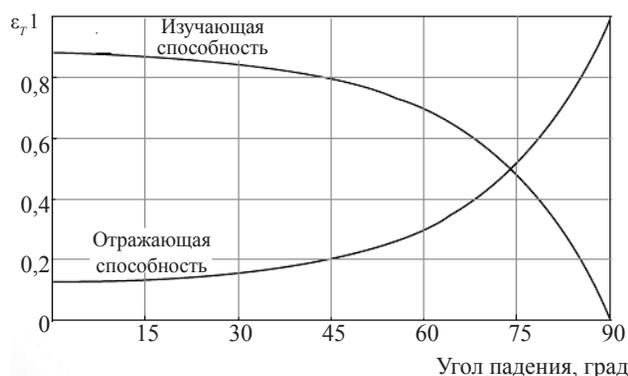


Рис. 3. Угловая зависимость излучающей и отражающей способности стекла

График, показанный на рис. 3, наглядно демонстрирует важность учета угла визирования при тепловизионной съемке в применении к стеклу [1].

Геометрия (форма) объекта также влияет на результаты тепловизионной съемки, т. к. излучательные свойства поверхности меняются с изменением ее формы. Так, различные полости, углы, отверстия приводят к множественным отражениям между поверхностями и увеличивают коэффициенты поглощения (а значит, и излучение), тем самым имитируют модель АЧТ. Например, излучение от трехгранных углов всегда оказывается выше, чем от плоских поверхностей.

Все современные тепловизоры для правильного измерения температуры требуют предварительной установки не только коэффициента излучения ϵ_r , но и, так называемой, отраженной температуры. В большинстве случаев этот параметр соответствует температуре окружающей среды, которую целесообразно заранее измерить с помощью термометра. Поэтому его учет мало влияет на полученную при измерениях температуру. Но ситуация оказывается кардинально другой, если вблизи исследуемого объекта, расположены тела с температурой, значительно отличающейся от температуры измеряемого объекта. Такие тела могут исказить инфракрасное излучение по причине собственного излучения, поэтому необходимо избежать или нейтрализовать источники излучения такого рода, загородив или изолировав их. Если влияние источника по-прежнему невозможно, температура отражения не будет совпадать с температурой окружающей среды.

При измерениях на открытом воздухе необходимо всегда учитывать возможное влияние солнца на интенсивность инфракрасного излучения объектов [5]. Для этого во время проведения измерения целесообразно менять местоположение, чтобы определить возможные направления отражения солнечного света. В этом случае солнечное отражение перемещается, в том время как инфракрасные характеристики измеряемого объекта остаются неизменными, даже при изменении угла наблюдения. Следует учитывать, что в некоторых случаях температура, полученная в результате облучения солнечной радиацией, держится на протяжении нескольких часов, даже после прекращения солнечного воздействия.

В ряде руководств по эксплуатации тепловизоров рекомендуют проводить измерения на открытом воздухе при сильной облачности, т. к. облака экранируют измеряемые объекты от прямого солнечного света.

Ветер или сквозняк в помещении также может оказывать влияние на измерение температуры с помощью тепловизора [4, 6]. Процесс теплообмена посредством конвекции между поверхностью тела и прилегающего воздуха приводит к тому, что температура исследуемого объекта и окружающей среды примерно одинаковы. Однако если в среде присутствует ветер или сквозняк, прилегающий слой воздуха постоянно заменяется новым слоем, с температурой отличной от температуры измеряемого объекта. Данный эффект теплообмена усиливается при большей разнице между температурой поверхности измеряемого объекта и температурой окружающей среды.

Список литературы

1. Инфракрасная термография в энергетике Афонин А. В. и др. Под ред. Ньюпорта Р. К., Таджибаева А. И. Т. 1. Основы инфракрасной термографии. — СПб.: СПЭ-ИПК, 2000. 240 с.
2. Михеев М. А., Михеева И. М.. Основы теплопередачи. — М.: Энергия, 1977. 344 с.
3. Новицкий Л. А., Степанов Б. М. Оптические свойства материалов при низких температурах. — М.: Машиностроение, 1980. 224 с.
4. Курбатова Н. А. Методика калибровки тепловых излучателей для определения характеристик оптико-электронных приборов/Курбатова Н. А., Троценко Д. П. // Сборник трудов конференции молодых ученых. — СПб: ЛИТМО, 2009. Вып. 3. С. 254–259.
5. Поляков В. С. Применение тепловизионных приемников для выявления дефектов высоковольтного оборудования/Методические указания по контролю оборудования тепловизорами. — Л.: ПЭИПК, 1990. 57 с.
6. Баранов И. В., Прошкин С. С. Измерение тепловых характеристик веществ и материалов в области агрегатных, химических и структурных превращений // Вестник Международной академии холода. 2003. №4. С. 31–34.

References

1. Infrakrasnaja termografija v jenergetike Afonin A. B. i dr. Pod red. N'juporta R. K., Tadžibaeva A. I. T. 1. Osnovy infrakrasnoj termografii. — SPb.: SPJeIPK, 2000. 240 p.
2. Miheev M. A., Miheeva I. M.. Osnovy teploperedachi. — M.: Jenergija, 1977. 344 p.
3. Novickij L. A., Stepanov B. M. Opticheskie svojstva materialov pri nizkih temperaturah. — M.: Mashinostroenie, 1980. 224 p.
4. Kurbatova N. A. Metodika kalibrovki teplovyh izluchatelej dlja opredelenija harakteristik optiko-jelektronnyh priborov/Kurbatova N. A., Trocenko D. P. // Sbornik trudov konferencii molodyh uchenyh. — SPb: LITMO, 2009. Vol. 3. pp. 254–259.
5. Poljakov V. S. Primenenie teplovizionnyh priemnikov dlja vyjavlenija defektov vysokovol'tnogo oborudovanija/Metodicheskie ukazanija po kontrolju oborudovanija teplovizorami. — L.: PJEIPK, 1990. 57 p.
6. Baranov I. V., Proshkin S. S. Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda. 2003. No 4. pp. 31–34.