

ка конусности и припасовка конусов при помощи калибров и краски обеспечивает более высокую точность и надежность конусных соединений.

В настоящее время калибры применяют для контроля внутренней и наружной резьбы различного назначения. Существуют приборы для контроля отдельных параметров резьбы — наружного, внутреннего и среднего диаметров резьбы, ее шага, высоты и угла профиля, погрешности винтовой линии, конусности (для конической резьбы) и др. Эти приборы удобны при настройке станков и контроле точной резьбы (ходовые винты, микровинты и т. п.). При этом не всегда обеспечивается свинчиваемость сопрягаемых деталей, прочность и герметичность резьбового соединения. Конечно, можно провести точное измерение резьбы при помощи координатно-измерительной машины или современных оптических приборов (микроскопа или проектора), но это не всегда возможно в производственных условиях и тем более в условиях эксплуатации. Поэтому для комплексной проверки резьбовых деталей широко применяют резьбовые калибры — пробку и втулку.

Особенно важно контролировать резьбу на концах нефтегазовых труб, так как от этого зависит прочность и надежность соединений труб, в том числе опускаемых в скважину. Поэтому основным средством приемки резьбовых изделий остается контроль с использованием калибров.

Достоинство современных резьбовых калибров состоит в том, что их изготавливают на точных резьбошлифовальных станках с ЧПУ, позволяющих получить отклонение от круглости 0,5—1,0 мкм и шероховатость 0,1 мкм. Резьбовые калибры аттестуют с высокой точностью по всем параметрам резьбы на координатно-измерительных машинах.

Таким образом, в настоящее время практически не применяют гладких калибров для контроля диаметров валов и отверстий диаметром более 10—20 мм, а используют их для контроля валов и отверстий малого диаметра, конусов и резьбы.

Литература

1. Медовой И. А., Уманский Я. Г., Журавлев Н. М. Исполнительные размеры калибров: Справ. пособие: М.: Машиностроение, 1980.
2. Медовой И. А., Дроздова Ю. И. Исполнительные размеры калибров: Справ. пособие: М.: Машиностроение, 1980.
3. ГОСТ 2789—73. Шероховатость поверхностей. Параметры и характеристики.
4. ГОСТ 2849—94. Калибры для контроля конусов инструментов. Технические условия.

Дата принятия 25.06.2013 г.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

535.233.43:536.2:539.216.22

Определение действительной температуры объекта при тепловизионных измерениях

В. П. ХОДУНКОВ, А. И. ПОХОДУН

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, С.-Петербург, Россия, e-mail: walkerearth@mail.ru

Теоретически показана возможность экспериментального определения действительной температуры удаленного объекта при неизвестных значениях его излучательной способности и коэффициента ослабления ИК-излучения в промежуточной среде — атмосфере. Приведены некоторые экспериментальные данные.

Ключевые слова: действительная температура, ИК-излучение, тепловизор, плотность потока излучения.

The possibility of experimental determination of the real temperature of remote object with unknown values of its emittance and attenuation coefficient of IR-radiation in the intermediate environment — atmosphere — is theoretically demonstrated. Certain experimental data is presented.

Key words: actual temperature, infrared, thermal imager, radiation flux density.

В методах инфракрасной (ИК) радиометрии конечный результат измерений зависит, главным образом, от температуры исследуемого объекта, а также от спектральных характеристик поверхности объекта и промежуточной среды, разделяющей объект и наблюдателя (регистрирующий прибор). При измерениях такого класса используется априор-

ная информация об излучательной способности поверхности объекта либо применяются специальные методики выполнения измерений, например, основанные на измерениях нескольких яркостных температур [1, 2]. Информация об одном из основных свойств промежуточной среды — коэффициенте пропускания излучения — только, как правило,

априорная, представляемая в виде графиков, таблиц или формул. Данный методический прием преимущественно используется в пирометрии для исследования температурных полей объектов, расположенных близко от наблюдателя, когда поглощением промежуточной среды (пирометрическим ослаблением) можно либо пренебречь, либо, применяя специальные методики и вспомогательные средства, уменьшить ее негативное влияние. Достаточно подробная оценка погрешностей с приведением конкретных примеров для таких случаев дана в [3].

В отношении ИК-радиометрии удаленных (на десятки, сотни и более метров) от наблюдателя объектов ситуация совершенно иная: до настоящего времени не решена задача дистанционного определения действительных температур объектов в условиях неопределенности значений излучательной способности поверхности объекта и поглощающих свойств промежуточной среды, разделяющей объект и наблюдателя. Примеры такого рода задач связаны с измерением температурных полей элементов энергетического оборудования (изоляторов, подстанций, трансформаторов, теплотрасс и т. д.), морской и наземной техники (судов, кораблей, механизмов и движущихся объектов), зданий и сооружений, а также других объектов, доступ к которым невозможен по соображениям безопасности или из-за отсутствия технической возможности.

Основными средствами измерений, предназначенными для дистанционного определения тепловых полей удаленных объектов в ближнем и дальнем ИК-диапазоне, являются тепловизионные приборы и устройства различных типов, что обусловлено такими их высокими техническими показателями как информативность (более 100 000 измеренных значений температур по полю зрения прибора), высокая чувствительность (не более 35 мК), возможность применения при дистанционных измерениях.

В проведенном исследовании сделана попытка обойти негативное влияние неопределенности излучательной способности поверхности объекта, поглощающих свойств разделяющей объект и наблюдателя промежуточной среды (атмосферы) на точность конечного результата измерений — действительных значений температуры анализируемого объекта. При этом не использовали эталонные излучатели (или образцы сравнения с известной излучательной способностью), априорные данные о коэффициенте пропускания атмосферы, влажности, давлении, спектральном диапазоне работы измерительного прибора, расстоянии до объекта, а применяли довольно необычный подход, основанный исключительно на классических законах теплового излучения.

В качестве объекта исследования выбрали произвольный объект, находящийся в пригоризонтном слое атмосферы, имеющий малый тепловой контраст по отношению к окружающему его атмосферному фону, расположенный на значительном удалении от наблюдателя (десятки, сотни и более метров) и занимающий в поле зрения измерительного прибора (тепловизора) незначительную площадь. Учитывали информацию о максимальном габаритном (обычно по горизонтали) размере объекта, технических характеристиках регистрирующего устройства — тепловизионной камеры, температуре окружающей атмосферы (предполагается равенство температуры атмосферы, окружающей объект и наблюдателя). В результате измерений требуется определить действительную температуру (распределение темпе-

ратуры) объекта (участка объекта).

Для решения поставленной задачи использовали закон Стефана—Больцмана, являющийся теоретической основой радиационной пирометрии. Для абсолютно черных тел, обладающих максимальной излучательной способностью, количество теплоты, излучаемое единицей поверхности за единицу времени:

$$q_p = \sigma T_{об}^4,$$

где $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴) — постоянная Стефана—Больцмана; $T_{об}$ — действительная температура объекта.

Любой излучающий объект одновременно получает энергию от окружающих его тел (фона, среды). Если абсолютную температуру этих тел обозначить $T_{ф}$, то собственное излучение объекта будет меньше на величину $\sigma T_{ф}^4$, т. е. потери теплоты с единицы поверхности объекта за единицу времени будут

$$q_p = \sigma (T_{об}^4 - T_{ф}^4). \quad (1)$$

Когда разность температуры объекта и окружающей его среды $\Delta T = T_{об} - T_{ф}$ невелика, уравнение (1) можно упростить [4]. Для этого представим правую его часть как

$$q_p = \sigma \left[(T_{ф} + \Delta T)^4 - T_{ф}^4 \right] = \sigma \Delta T (4T_{ф}^3 + 6T_{ф}^2 \Delta T + 4T_{ф} \Delta T^2 + \Delta T^3)$$

и, исключив члены второго и выше порядков малости ΔT (для малоконтрастного объекта), запишем

$$q_p = 4\sigma T_{ф}^3 \Delta T.$$

Исследуемый объект будем считать серым телом. Его лучистый тепловой поток, падающий на приемную матрицу тепловизионной камеры (рис. 1), можно представить формулой

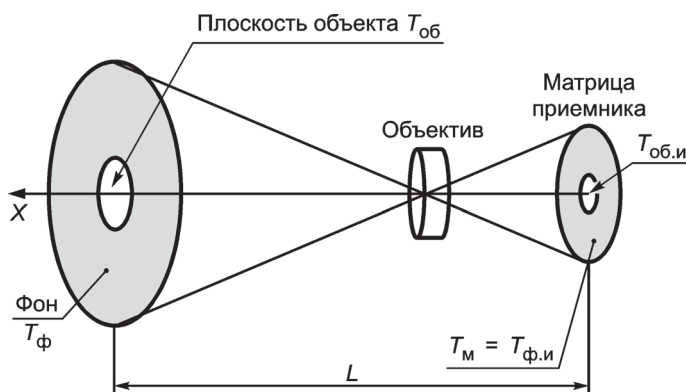


Рис. 1. Схема дистанционного измерения температуры объекта

$$q_p^* = 4\sigma T_M^3 \Delta T^* \varepsilon_{об} \tau_{опт} \tau, \quad (2)$$

где T_M — температура матрицы приемника; $\Delta T^* = T_{об} - T_M$; $\varepsilon_{об}$ — спектральная излучательная способность поверхности объекта; $\tau_{опт}$, τ — спектральные коэффициенты пропускания оптической системы приемника и фона (атмосферы), соответственно.

Лучистый тепловой поток, который отражает матрица приемника, можно представить в аналогичном виде:

$$q_p^{**} = 4\sigma T_{ф.и}^3 \Delta T^{**} \varepsilon_M \tau_{опт},$$

где $\Delta T^{**} = T_{об.и} - T_{ф.и}$, $T_{об.и}$, $T_{ф.и}$ — измеренные тепловизором температуры объекта и фона (атмосферы) с расстояния L , соответственно; ε_M — излучательная способность тепловизионной матрицы.

В установившемся (стационарном) тепловом режиме тепловизионной матрицы выполняется условие $q_p^* = q_p^{**}$, поэтому справедливо равенство

$$4\sigma T_M^3 \Delta T^* \varepsilon_{об} \tau_{опт} \tau = 4\sigma T_{ф.и}^3 \Delta T^{**} \varepsilon_M \tau_{опт}. \quad (3)$$

Из (3) получим коэффициент пропускания атмосферы

$$\tau = \frac{T_{ф.и}^3 (T_{об.и} - T_{ф.и})}{T_M^3 (T_{об} - T_M) \varepsilon_{об}} \varepsilon_M. \quad (4)$$

На матрицу приемника также попадает излучение атмосферы

$$q_p^{***} = 4\sigma T_M^3 \Delta T^{***} \varepsilon_{ф} \tau_{опт}, \quad (5)$$

где $\Delta T^{***} = T_{ф} - T_M$; $T_{ф}$ — действительное значение температуры атмосферы.

Определим поток радиации, который попадает на матрицу приемника, для этого выражение (5) вычтем из (2):

$$q_p^* - q_p^{***} = 4\sigma T_M^3 \tau_{опт} \left((T_{об} - T_M) \varepsilon_{об} \tau + (T_{ф} - T_M) \varepsilon_{ф} \right). \quad (6)$$

С другой стороны,

$$q_p^* - q_p^{***} = \sigma (T_{об}^4 - T_{ф}^4) = 4\sigma T_{ф}^3 (T_{об} - T_{ф}). \quad (7)$$

Приравняв (6) и (7), с учетом (4) найдем выражение

$$T_{об} = T_{ф} + \frac{T_{ф.и}^3}{T_{ф}^3} (T_{об.и} - T_{ф.и}) \varepsilon_M - \tau_{опт} \varepsilon_{ф} \frac{T_M^3}{T_{ф}^3} (T_M - T_{ф}). \quad (8)$$

Так как первоначально было принято, что объект мало-контрастный и занимает небольшую долю площади, т. е. близок к точечному источнику, то правомерно соотношение $T_M = T_{ф.и}$. Тогда (8) приобретает вид

$$T_{об} = T_{ф} + \frac{T_{ф.и}^3}{T_{ф}^3} \left(T_{об.и} \varepsilon_M - T_{ф.и} (\tau_{опт} \varepsilon_{ф} + \varepsilon_M) + T_{ф} \tau_{опт} \varepsilon_{ф} \right). \quad (9)$$

Проанализируем выражение (9). В [5] отмечено, что вблизи горизонта излучательная способность более толстого слоя атмосферы и паров воды близка к единице ($\varepsilon_{ф} \approx 1$), т. е. как абсолютно черного тела при температуре атмосферы $T_{ф}$. В [5] также указано, что излучение чистого ночного неба примерно соответствует излучению абсолютно черного тела при температуре 273 К с максимумом на длине волны 10,5 мкм. На основании данного факта при $\varepsilon_{ф} \approx 1$ выражение (9) запишем как

$$T_{об} = T_{ф} + \frac{T_{ф.и}^3}{T_{ф}^3} \left(T_{об.и} \varepsilon_M - T_{ф.и} (\tau_{опт} + \varepsilon_M) + \tau_{опт} T_{ф} \right). \quad (10)$$

Таким образом, выражение (10) является основной расчетной формулой для действительной температуры $T_{об}$ объекта (либо его части). Чтобы получить искомое значение $T_{об}$, необходимо при помощи тепловизионной камеры измерить температуры атмосферы $T_{ф.и}$ в плоскости объекта, самого объекта $T_{об.и}$ и атмосферы в месте нахождения на-

блюдателя $T_{ф}$ (в последнем случае желательно использовать контактный метод, применив термопары или термометры сопротивления). При этом также должны быть известны технические характеристики тепловизионной камеры: ε_M — излучательная способность тепловизионной матрицы для выбранного спектрального диапазона и $\tau_{опт}$ — эффективный коэффициент пропускания ИК-излучения оптической системой.

Согласно [6] чаще всего $\varepsilon_M \approx 0,25$, в то же время ведутся работы по повышению значений данной характеристики вплоть до $\varepsilon_M \approx 0,8$.

В соответствии с [7] для современных многолинзовых оптических сис-



а



б

Рис. 2. Тепловые портреты силового токоввода (а) и танкера (б)

Результаты измерений действительной температуры объектов

| Объект | T_{ϕ}, K (°C) | $T_{\phi.и}, K$ (°C) | $\bar{T}_{об.и}^p, K$ (°C) | $T_{об.и}^{max}, K$ (°C) | $\bar{T}_{об.и}, K$ (°C) | $T_{об.и}^{max}, K$ (°C) | τ | $\epsilon_{об}$ | $q_{об}^k, Вт/м^2$ |
|------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------|-----------------|--------------------|
| Токоввод силовой | 285,0 (12,0) | 271,5 (-1,5) | 325,3 (52,0) | 343,9 (70,9) | 349,1 (76,1) | 366,8 (93,8) | 0,82 | 0,91 | 305 |
| Танкер | 297,0 (24,0) | 289,6 (16,6) | 294,3 (21,3) | 302,3 (29,3) | 308,2 (35,2) | 315,6 (42,6) | 0,90 | 0,92 | 67 |

тем $\tau_{опт} \approx 0,7 \dots 0,95$; чаще встречаются оптические системы со средним коэффициентом пропускания $\tau_{опт} \approx 0,85$ (в диапазоне длин волн 8—12,5 мкм).

Следует особо отметить, что для удобства использования тепловизионных средств измерений предприятия-изготовители на стадии настройки приборов осуществляют их калибровку с учетом отличия от единицы ($\epsilon_m, \tau_{опт}$). Поэтому значения параметров $T_{об.и}, T_{\phi.и}$, выдаваемые тепловизором, соответствуют фактическим и, следовательно, выражение (10) можно упростить:

$$T_{об} = T_{\phi} + T_{\phi.и}^3 (T_{об.и} - 2T_{\phi.и} + T_{\phi}) / T_{\phi}^3. \quad (11)$$

Отсюда следует, что второе слагаемое в правой части (11) является постоянным для любых расстояний от наблюдателя до объекта исследования. Однако на большом удалении от объекта наблюдения начинает влиять амплитудная характеристика тепловизора [8], т. е. данное условие может выполняться не в полной мере.

Так как в предложенном подходе пригоризонтный слой атмосферы фактически принят за абсолютно черное тело, для коэффициента пропускания ИК-излучения атмосферой вполне справедливо выражение

$$\tau = T_{\phi.и}^4 / T_{\phi}^4.$$

Тогда действительную (на «нулевом» расстоянии) радиационную температуру интересующего объекта можно представить в виде [3]:

$$T_{об}^p = T_{об.и} \tau^{-1/4} = T_{об.и} T_{\phi} / T_{\phi.и},$$

а излучательную способность поверхности объекта для выбранного спектрального диапазона как

$$\epsilon_{об} = (T_{об}^p / T_{об})^4.$$

Для реализации предложенного метода определения и алгоритма вычисления действительной температуры удаленного объекта была создана программа обработки и анализа тепловизионных изображений GetIIAS. Программа предназначена для анализа тепловизионных снимков и вычисления параметров объекта, связанных не с отдельными микрофрагментами, занимающими на экране тепловизора 1 пикс., а с большими поверхностями, имеющими сложные формы. Она является дополнением к программе Infrared

Image Analysis System 6.02. В рамках данной статьи описание программы не приводится.

С целью проверки работоспособности предложенного подхода определения действительной температуры поверхности объекта были проведены эксперименты: фиксировали тепловые поля различных элементов энергетического оборудования, гражданских судов в акватории Финского залива и т. д. В результате оказалось, что расхождение между значениями действительных температур участков объекта, измеренными различными известными способами и вычисленными по (11), не превышает 10 %, при этом излучательная способность обследуемых объектов менялась в пределах 0,8—0,95.

На рис. 2, а, б представлены тепловые портреты работающего в режиме перегрузки силового токоввода, удаленного на 10 м и окрашенного краской (время съемки — октябрь 2011 г., 11 ч), и танкера-бункеровщика длиной 96 м водоизмещением 3000 т, удаленного на расстояние 924 м (время съемки — август 2012 г., 17 ч, акватория Финского залива). В таблице приведены некоторые экспериментальные данные для указанных объектов.

В таблице введены следующие обозначения: $\bar{T}_{об.и}^p, \bar{T}_{об}$ — средневзвешенные по поверхности объекта значения радиационной температуры, соответственно измеренной и действительной; $T_{об.и}^{max}, T_{об}^{max}$ — максимальные значения тех же температур; $q_{об}^k$ — средневзвешенное по поверхности объекта значение действительного контрастного (по отношению к атмосфере) теплового потока.

На основании выполненного исследования и результатов предварительных экспериментов можно оценить эффективность применения классической теории теплообмена для анализа тепловых режимов тепловизионной техники (как элемента радиоэлектронной аппаратуры) в совокупности с природными закономерностями, явлениями. Справедливости ради следует заметить, что тепловизоры признаны средствами измерений только с момента вступления в силу стандарта [9]. В то же время данный класс измерительных средств к настоящему времени еще недостаточно изучен с точки зрения теплового режима работы. Безусловно необходим дальнейший теплофизический анализ режимов работы неохлаждаемых тепловизионных приборов, незаменимую помощь в таких исследованиях могут оказать труды и научные достижения теплофизической школы Г. М. Кондратьева, Г. Н. Дульнева [4, 10, 11].

Авторы надеются, что предложенный метод получит свое скорейшее практическое применение.

Л и т е р а т у р а

1. Свет Д. Я. Оптические методы измерения истинных температур. М.: Наука, 1982. С. 250—253.

2. Фрунзе А. А., Фрунзе А. В. Определение температуры объекта с неизвестной излучательной способностью по пяти измеренным яркостным температурам // Измерительная техника. 2012. № 12. С.36—39; Frunze A. A., Frunze A. V. Determination of the temperature of an object with unknown emissivity using five measured brightness temperatures // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 12. P. 1396—1400.

3. Герашенко О. А. и др. Температурные измерения: Справ. пособие. Киев: Наукова Думка, 1984.

4. Кондратьев Г. М. Тепловые измерения. М.-Л.: ГНТИ, 1957.

5. Хэворд Генри Л. Инфракрасное излучение / Пер. с англ. М.-Л.: Энергия, 1964.

6. Андришин С. Я. и др. Состояние разработок микроболюметрических матриц в Государственном научном центре РФ «НПО «Орион» // Прикладная физика. 2000. № 5. С. 5—17.

7. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Современные проблемы инфракрасной техники. М.: Изд-во МИИГАиК, 2011.

8. Дульнев Г. Н., Походун А. И., Ходунков В. П. Теплофизический анализ качества инфракрасных изображений удаленных слабоконтрастных объектов // Измерительная техника. 2013. № 3. С. 28—32; Dul'nev G. N., Pokhodun A. I., Khodunkov V. P. A thermal analysis of the quality of infrared images of distant low-contrast objects // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N 3. P. 289—296.

9. ГОСТ Р 8.619—2006. ГСИ. Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки.

10. Дульнев Г. Н. Тепло-массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высшая школа, 1984.

11. Кондратьев Г. М. и др. Прикладная физика. Теплообмен в приборостроении. СПб.: Изд-во СПб ГУИТМО, 2003.

Дата принятия 22.08.2013 г.

536.51.083

Разработка и опыт применения серии датчиков Celsius для контроля температуры рабочего тела в системе управления процессами сушки керамических изделий

А. А. СИНИЦЫН*, Д. А. БЕЛЯНСКИЙ**

* Вологодский государственный технический университет, Вологда, Россия
e-mail: nee-energo@yandex.ru

** ООО «Энергоэксперт», Вологда, Россия, e-mail: dimcherch@inbox.ru

Проанализированы различные устройства для измерения температуры в кирпичах-сырцах и предложен способ организации оптимального управления процессом сушки керамического кирпича для снижения энергетических затрат промышленного предприятия посредством новых термодатчиков Celsius. Показано, что устройство универсально и будет эффективно для нужд предприятий, для которых контроль термодинамических параметров — основа технологического процесса.

Ключевые слова: аналого-цифровое устройство, датчик температуры, керамические изделия, сушильная печь.

The different devices for temperature measurement in raw bricks are analyzed and the method of organization of optimal control of ceramic brick drying process to reduce the industrial enterprise energy consumption by means of the new Celsius thermal sensors is suggested. It is shown that the the device is universal and will be effective for enterprises where the thermodynamic parameters control is a basis of technological process.

Key words: analog-digital device, temperature sensor, ceramics, seasoning kiln.

Развитие строительной индустрии неразрывно связано с увеличением спроса на продукцию строительных материалов на рынке, при этом требования к качеству изделий постоянно возрастают. Стремление руководителей модернизировать действующие производства способствует развитию здоровой конкуренции среди производителей. Чтобы повысить конкурентоспособность продукции на рынке, нужно автоматизировать длительные и энергоемкие технологические процессы для снижения себестоимости изделия. Од-

ним из таких технологических процессов является сушка керамического кирпича (КК). Каждый вид продукции характеризуется различными габаритными размерами и пустотностью, достигающей 55 %, следовательно, процесс удаления влаги из кирпича-сырца будет носить индивидуальный характер.

При проведении сушки изделий необходимо учитывать климатические условия добычи и предварительной обработки исходного сырья, а также его физико-химические свой-