

УДК 536.521

Повышение точности измерения температуры пирометром спектрального отношения

А.В. Фрунзе

АНО НТП Термоконт, Москва

E-mail: alex.fru@mail.ru

В работе описан алгоритм, позволяющий численными методами вычислить связь между температурой спектрального отношения и действительной температурой «несерого» объекта, который учитывает не только зависимость спектральной излучательной способности объекта от длины волны, но и ее температурную зависимость, присущую практически всем реальным объектам (материалам). Данный алгоритм применим к любым пирометрам спектрального отношения: узкополосным и широкополосным. Ранее как в отечественной, так и в зарубежной литературе отсутствовало решение рассматриваемой задачи с одновременным учетом обеих этих зависимостей. Предлагаемое решение основано на известном алгоритме, позволяющем вычислить связь между температурой спектрального отношения и действительной температурой «несерого» объекта, который учитывал только зависимость спектральной излучательной способности объекта от длины волны. Представленный алгоритм модифицирован для возможности учета еще и ее температурной зависимости. Приведен пример реализации описанного алгоритма.

Ключевые слова: пирометрия, методологические принципы, законы излучения, спектральная излучательная способность, температурная зависимость спектральной излучательной способности.

Введение

Как было показано в работах [1, 2], излучательные характеристики реальных объектов могут сильно отличаться от таковых у абсолютно черного тела (АЧТ). Это приводит к тому, что калиброванные по АЧТ средства измерений при измерении температуры подобных реальных так называемых «несерых» [3] объектов имеют большие погрешности, которые, как было показано в исследовании [4], носят методический характер, т.е. имеют место даже в идеальном пирометре при идеальной калибровке. В настоящее время, как неоднократно отмечалось в научных публикациях, указанные методические погрешности на порядок, а то и на два превышают инструментальные. Поэтому вопрос об их минимизации или полном исключении чрезвычайно актуален. Для этого желательно располагать корректирующими данными, связывающими между собой результат средства измерения (СИ), имеющего эти методические погрешности, и температуру реального объекта. Такие корректирующие данные могут быть выражены функциональной, табличной или графической зависимостью. Располагая ими, можно перейти от показаний СИ, содержащего методическую погрешность, к действительному значению измеряемой температуры.

Поскольку настоящая работа посвящена коррекции пирометров спектрального отношения, вначале необходимо затронуть вопрос о том, как в этих устройствах возникает методическая погрешность, о коррекции которой будет идти речь ниже. Механизм ее возникновения при измерении температуры «несерых» объектов описывался в работе [5]. Суть его заключается в том, что «несерым» объектам присуще непостоянство по длине волны спектральной излучательной способности (в отличие от «серых», где она постоянна). Это непостоянство приводит к изменению спектрального отношения в измеряющем «несерый» объект пирометре в сравнении со спектральным отношением, имеющим место при измерении нагретого до той же температуры АЧТ. Соответственно, показания пирометра возрастают, если спектральная излучательная способность уменьшается с ростом длины волны, и уменьшаются, если она растет.

Как получить вышеупомянутые корректирующие данные? Рассматриваемую задачу можно решить экспериментальным путем: нагревать реальный объект, при этом одновременно измеряя его температуру как пирометром, так и термометром. Однако это весьма трудоемкий путь, т.к. надо добиться равномерности температуры нагреваемого образца в поле зрения пирометра, термостатировать образец при температурах, на которых будут проводиться измерения, исключить влияние сторонних нагретых объектов и т.д. А самое главное, если спустя какое-то время пирометр будет заменен на другой, с аналогичными точностными характеристиками, но с иной спектральной чувствительностью, измерения придется повторить.

Если известна спектральная излучательная способность упомянутого реального «несерого» объекта и спектральные характеристики чувствительности пирометра, то вышеуказанные корректирующие данные могут быть получены расчетным путем. Как было отмечено, влияние изменения с ростом длины волны спектральной излучательной способности приводит к изменению присущего реальному «несерому» объекту спектрального отношения в измеряющем этот объект пирометре. Располагая градуировочной характеристикой пирометра, можно легко определить, какое значение температуры при том или ином спектральном отношении будет отображено на его индикаторе. Следовательно, необходимо научиться получать расчетным путем градуировочную характеристику пирометра, а также уметь вычислять спектральное отношение, присущее данному реальному «несерому» объекту при выбранной температуре.

Градуировочные и калибровочные характеристики (функции) и их вычисление

Под градуировочной характеристикой (функцией) пирометра спектрального отношения будем понимать зависимость температуры, отображаемой на индикаторе пирометра, от отношения сигналов в каналах пирометра. Для определенности будем полагать, что в упомянутом отношении сигнал коротковолнового канала всегда находится в числителе дроби, а длинноволнового — в знаменателе. Какой из сигналов оказывается в числителе, а какой — в знаменателе, в данном случае не принципиально. Выбор автора основывался на том, что в проводимых им пирометрических измерениях коротковолновый сигнал почти всегда превышал длинноволновый и при таком выборе спектральное отношение оказывалось больше единицы.

Условимся, что если речь идет о занесенной в реальный пирометр зависимости температуры, отображаемой на индикаторе этого пирометра, от отношения сигналов в каналах пирометра, то будем называть ее градуировочной характеристикой. Эту харак-

теристику обычно получают экспериментально. Аналогичную зависимость, полученную путем вычислений и предназначенную для коррекции пирометра, будем называть градуировочной функцией, поскольку она получается путем функционального преобразования.

Характеристика, обратная градуировочной, обычно носит название калибровочной. То есть под калибровочной характеристикой (функцией) пирометра спектрального отношения будем понимать зависимость отношения сигналов в каналах пирометра от температуры излучателя в виде АЧТ, по которому был калиброван пирометр. При этом зависимость, получаемую в результате калибровки, проведенной экспериментальным путем, будем называть калибровочной характеристикой, а аналогичную зависимость, полученную вычислительным путем, будем называть калибровочной функцией. Вначале обычно находят именно калибровочную функцию. Как только она найдена, необходимо сделать обратное функциональное преобразование, т.е. найти функцию, обратную калибровочной. Она и будет градуировочной функцией.

Рассмотрим, как может быть определена калибровочная функция. Для простоты ее нахождения ограничимся случаем пирометра спектрального отношения на фотодиодных приемниках излучения. Как известно [6], ток выхода освещаемого излучателем-АЧТ фотодиодного приемника излучения определяется соотношением

$$I_{\text{фд}}(T) = a \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda, T) S_{\text{фд}}(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где a — константа, определяемая характеристиками оптической системы, в которой установлен фотодиод, $\text{м}^2 \cdot \text{ср}$; $E(\lambda, T)$ — спектральная плотность энергетической яркости АЧТ, $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{ср})$; $S_{\text{фд}}(\lambda)$ — спектральная чувствительность фотодиода, $\text{А}/\text{Вт}$; λ_1, λ_2 — нижняя и верхняя границы спектральной чувствительности фотодиода, м ; T — абсолютная температура, К . С учетом (1), калибровочная функция может быть вычислена с использованием следующего соотношения:

$$Q_{\text{ачт}}(T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda, T) S_{\text{коротк}}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} E(\lambda, T) S_{\text{длинн}}(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{ачт}}(T)$ — спектральное отношение, $S_{\text{коротк}}(\lambda), S_{\text{длинн}}(\lambda)$ — спектральная чувствительность коротковолнового и длинноволнового фотодиодов соответственно, $\text{А}/\text{Вт}$; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ — нижняя и верхняя границы спектральной чувствительности коротковолнового и длинноволнового фотодиодов соответственно, м . Константа a определяется площадью входной линзы оптической системы пирометра и телесным углом, под которым она видна из центра излучающего объекта. Очевидно, данная величина одинакова как для коротковолнового, так и для длинноволнового фотодиодов. Поэтому, оказавшись и в числителе, и в знаменателе, она сократилась и в окончательном виде отношения (2) отсутствует.

Располагая соотношением (2) и значениями $S_{\text{коротк}}(\lambda), S_{\text{длинн}}(\lambda)$, можно вычислить присущее АЧТ спектральное отношение для любой из заданных температур.

Поскольку выражение (2) аналитически в общем виде неразрешимо, вычисления должны быть проведены численными методами с использованием стандартных

вычислительных операций для определенных интегралов, имеющих во всех пакетах для численных математических вычислений. В результате получим таблицу из двух столбцов: в левом — значения температуры $t_{\text{АЧТ}}$, в правом — соответствующие этим значениям спектральные отношения. Отметим, что в такой таблице удобнее выражать температуру в привычных градусах Цельсия, о чем свидетельствует строчная буква t . Фрагмент подобной таблицы для одного из пирометров «Термоконт» приведен в табл. 1.

Далее, как отмечалось выше, необходимо найти функцию, обратную калибровочной:

$$t = f^{-1}(Q). \quad (3)$$

Эту обратную функцию получают из вышеуказанной таблицы путем обмена местами ее столбцов — в левом столбце теперь будут значения спектрального отношения, в правом — соответствующие им значения температуры $t_{\text{АЧТ}}$. Такой способ нахождения обратной функции допустим, поскольку калибровочная функция является гладкой и не содержит особых точек. Фрагмент таблицы с градуировочной функцией приведен в табл. 2.

Спектральное отношение и температура реального объекта

Ток выхода фотодиодного приемника излучения, освещаемого «несерым» объектом со спектральной излучательной способностью $\varepsilon(\lambda, T)$, определяется соотношением

$$I_{\text{фд}}(T) = a \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) E(\lambda, T) S_{\text{фд}}(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$

Тогда спектральное отношение от излучающего «несерого» объекта со спектральной излучательной способностью $\varepsilon(\lambda, T)$ может быть записано в виде:

$$Q_{\text{объекта}}(T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) E(\lambda, T) S_{\text{коротк}}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \varepsilon(\lambda, T) E(\lambda, T) S_{\text{длинн}}(\lambda) d\lambda}. \quad (5)$$

Очевидно, соотношение (2) совпадает с соотношением (5) при $\varepsilon \equiv 1$. Вычисления по формуле (5) также выполняются с помощью численных методов с использованием стандартных вычислительных операций для определенных интегралов. Результат представляется в виде таблицы из двух столбцов: в левом — значения температуры $t_{\text{объекта}}$, в правом — соответствующие этим значениям спектральные отношения. Вычисления

Таблица 1
Фрагмент таблицы вычисления
калибровочной функции,
рассчитанной согласно (2)

$t_{\text{АЧТ}}, ^\circ\text{C}$	$Q_{\text{АЧТ}}$
844	0,864
856	0,883
868	0,903
880	0,923
890	0,941
902	0,961

Таблица 2
Фрагмент таблицы
с градуировочной функцией

$Q_{\text{АЧТ}}$	$t_{\text{АЧТ}}, ^\circ\text{C}$
0,864	844
0,883	856
0,903	868
0,923	880
0,941	890
0,961	902

проводятся для всего диапазона значений действительной температуры объекта (с шагом, например, в $1-2\text{ }^{\circ}\text{C}$), в котором необходимо получить корректирующие данные. После этого для каждой из этих температур необходимо выбрать соответствующее спектральное отношение (5) и подставить его как аргумент в градуировочную функцию. В результате функционального преобразования с использованием градуировочной функции будет получен ряд значений температур, которые и будут температурами спектрального отношения. Подробнее об этом алгоритме можно узнать в работах [7, 8]. В работе [9] приводилось также описание разработанных для подобных расчетов свободно распространяемых программ `specotn.exe` и `tspecotn.exe`, а также рассматривался пример их применения для расчета коррекции показаний пирометра спектрального отношения серии «Диэлтест» для вольфрама при температуре 2600 К. Данные о спектральной излучательной способности вольфрама для расчета были взяты из [1].

Учет температурной зависимости спектральной излучательной способности объекта

Как было отмечено выше, в работе [9] для расчета связи между действительной температурой объекта из вольфрама и его температурой спектрального отношения использовалась спектральная излучательная способность вольфрама для $T = 2600\text{ К}$. Однако, как хорошо известно, спектральная излучательная способность W изменяется с изменением его температуры (рис. 1). Поэтому результаты расчета, приведенные в [9] (см. табл. 10.1), корректны только вблизи данной температуры. С удалением от этой температуры температура спектрального отношения, получаемая экспериментальным путем (если поставить такой эксперимент), будет отличаться от вычисленной, приведенной в табл. 10.1 в работе [9], и тем сильнее, чем дальше от нее окажется найденная $t_{\text{действ}}$. Иными словами, в значениях $t_{\text{действ}}$, найденных в соответствии с вышеуказанным расчетом, будут иметь место ошибки, и тем большие, чем больше отличие $t_{\text{действ}}$ от $2327\text{ }^{\circ}\text{C}$.

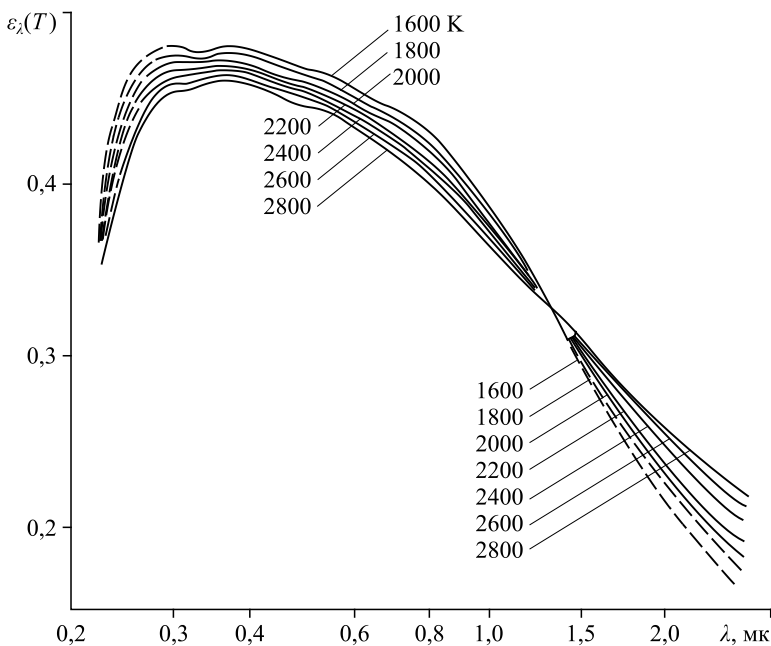


Рис. 1. Спектральные излучательные характеристики W согласно работе [1].

Возникает вопрос: как избежать или минимизировать эти расчетные ошибки? В работе [1] спектральная излучательная способность вольфрама приводилась не только для $T = 2600$ К, но и для $T = 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200$ и 2400 К. Нужно выполнить расчеты, аналогичные приведенным в работе [9], с использованием спектральных излучательных характеристик W для всех вышеперечисленных температур. И далее с учетом полученных результатов найти связь между температурой спектрального отношения и действительной температурой для любых температур.

Найти связь между температурой спектрального отношения и действительной температурой для температур, отличных от $T = 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200$ и 2400 К, можно путем полиномиальной регрессии. Это осуществляется следующим образом. Из расчетных таблиц, полученных в результате описанных выше вычислений, выбираются следующие пары значений: $t_{\text{действ}} = 927$ °С (1200 К) и значение температуры спектрального отношения, соответствующее ей в табл. 10.1 из [9] для 1200 К, $t_{\text{действ}} = 1127$ °С (1400 К) и значение температуры спектрального отношения, соответствующее ей в таблице для 1400 К, и т.д. до 2600 К. Фактически каждая такая пара представляет собой одну точку графика зависимости $t_{\text{действ}}$ от $t_{\text{сп.отн.}}$, где $t_{\text{сп.отн.}}$ — абсцисса, $t_{\text{действ}}$ — ордината точки. Связывающая эти точки функциональная зависимость записывается в виде полинома второй, третьей или четвертой степени: $t_{\text{действ}} = C_0 + C_1 \cdot t_{\text{сп.отн.}} + C_2 \cdot (t_{\text{сп.отн.}})^2 + \dots$. Рассматриваемому случаю с семью таблицами соответствуют семь точек этой зависимости, т.е. 7 уравнений с известными значениями температур $t_{\text{действ}}$ и $t_{\text{сп.отн.}}$ и неизвестными значениями коэффициентов полинома $C_0, C_1, C_2 \dots$. Коэффициенты полинома далее вычисляются в соответствии со стандартным для полиномиальной регрессии алгоритмом.

Степень полинома должна быть на две и более единицы меньше количества точек аппроксимируемой зависимости (для 7 точек она может быть не выше 5 степени). Рекомендуется использовать полином минимально возможной степени, при которой точки аппроксимации отличаются от точек исходной зависимости в минимально разумной степени (например, не более чем на $0,5 - 1$ %, в зависимости от решаемой задачи).

Пример расчета связи между температурой спектрального отношения и действительной температурой для любых значений температур в соответствии с описанным алгоритмом приведен в Приложении.

Заключение

В настоящей работе описан алгоритм, позволяющий с помощью численных методов вычислить связь между температурой спектрального отношения и действительной температурой «несерого» объекта, который учитывает не только зависимость спектральной излучательной способности объекта от длины волны, но и ее температурную зависимость, присущую практически всем реальным объектам (материалам). Данный алгоритм применим к любым пирометрам спектрального отношения: узко- и широкополосным. Ранее решения задачи с одновременным учетом обеих этих зависимостей как в отечественной, так и в зарубежной литературе не предлагалось. Решение основано на алгоритме, позволяющем вычислить связь между температурой спектрального отношения и действительной температурой «несерого» объекта, который учитывает только зависимость спектральной излучательной способности объекта от длины волны [7, 8]. Представленный алгоритм модифицирован для возможности учета еще и ее температурной зависимости. В Приложении приведен пример реализации описанного алгоритма.

Для реализации алгоритма необходимо располагать набором реальных зависимостей спектральной излучательной способности интересующего объекта как от длины волны излучения, так и от температуры, а также реальными характеристиками спектральной чувствительности приемников пирометра спектрального отношения.

Приложение

Пример расчета связи между температурой спектрального отношения и действительной температурой для любых значений температур в соответствии с описанным в статье алгоритмом

Проведем вычисления с использованием программ, описанных в работе [9]. Все исходные данные и результаты расчетов можно найти на сайте [10] в материале «Справочник\Исключение систематической методической погрешности при измерении вольфрама при 1200–2400 К». Эти данные размещаются в папках с именами W_1200, W_1400, W_1600, ..., W_2400 в корне диска C:\.

Файлы FD_K1.dat и FD_D1.dat содержат типовые характеристики спектральной чувствительности коротковолнового и длинноволнового приемников пирометра соответственно. В файле EPS_1_all_F.dat размещены единичные значения функции для всех длин волн в диапазоне от 200 до 2000 нм. Файл specotn.inf задает границы расчета. Перечисленные файлы содержат исходные данные для программы specotn.exe в каждой из вышеперечисленных директорий.

В файлах EPS1200W.dat–EPS2400W.dat находятся составленные на основании данных работы [1] спектральные излучательные способности вольфрама для $T = 1200 - 2400$ К.

Из папки W_1200 запускаем specotn.exe следующим образом (предполагается, что читатель умеет запускать программы из командной строки ОС):

```
specotn.exe FD_K.dat FD_D.dat EPS_1_all_F.dat.
```

Результат вычислений заносится в файл specotn.res. Копируем его в файл file1.dat, при этом убираем в самом начале данного файла пустую строку (с ней программа tspecotn.exe работать не сможет).

Далее запускаем программу specotn.exe:

```
specotn.exe FD_K.dat FD_D.dat EPS1200W.dat.
```

Результат вычислений снова попадает в файл specotn.res. Теперь копируем его в файл file2.dat, при этом убираем в нем также пустую строку в самом начале файла. Данные для работы программы tspecotn.exe готовы.

Находясь по-прежнему в папке W_1200, выполняем запуск следующей программы:

```
tspecotn.exe file1.dat file2.dat 1.
```

Результат вычислений заносится в файл file2.txt. Удаляем в нем идущие вначале строки, принадлежавшие исходному файлу file2.dat. Далее для удобства преобразовываем его в файл file21.txt, в котором третьим столбцом являются значения $t_{\text{действ}}$, соответствующие построчно значениям $t_{\text{сп.отн.}}$ и Δt . На этом вычисления для спектральной излучательной способности вольфрама для $T = 1200$ К завершены.

Теперь повторяем изложенные действия последовательно из папок W_1400, W_1600, W_1800, ..., W_2400 для файлов EPS1400W.dat, EPS1600W.dat, EPS1800W.dat, ...,

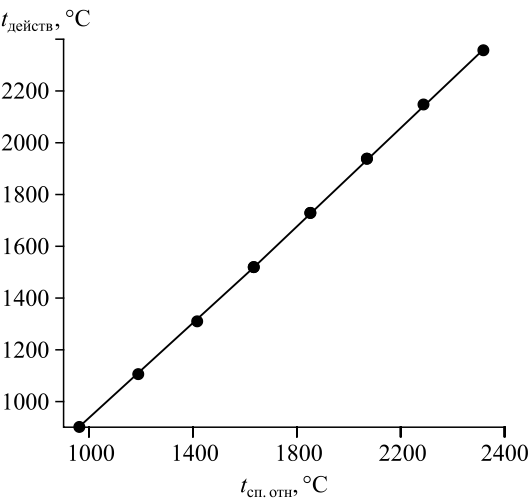
EPS2400W.dat. В каждой из этих папок в итоге будет сформирован файл с результатами file21.txt, соответствующий использованному в расчете файлу EPSxx00W.dat (xx = 12, 14, 16, ..., 24).

Далее из файла file21.txt в папке W_1200 найдем, что для $t_{\text{действ}} = 927^\circ\text{C}$ вычисленное значение температуры спектрального отношения составит $t_{\text{сп.отн.}} = 980,3^\circ\text{C}$. Это следует из того, что при переводе 1200 К в градусы Цельсия мы получаем (с точностью до целых) 927°C , а далее, с учетом того, что $t_{\text{действ}} = 920^\circ\text{C}$ соответствует $t_{\text{сп.отн.}} = 972,7^\circ\text{C}$, а $t_{\text{действ}} = 930^\circ\text{C}$ соответствует $t_{\text{сп.отн.}} = 983,5^\circ\text{C}$, в предположении практически линейной зависимости между $t_{\text{сп.отн.}}$ и $t_{\text{действ}}$ в 10-градусном интервале находим искомое $t_{\text{сп.отн.}}$.

Аналогичным образом получаем: для $t_{\text{действ}} = 1127^\circ\text{C}$ вычисленное значение температуры спектрального отношения будет равно $t_{\text{сп.отн.}} = 1194,0^\circ\text{C}$, для $t_{\text{действ}} = 1327^\circ\text{C}$ — $t_{\text{сп.отн.}} = 1408,5^\circ\text{C}$, для $t_{\text{действ}} = 1527^\circ\text{C}$ — $t_{\text{сп.отн.}} = 1623,3^\circ\text{C}$, для $t_{\text{действ}} = 1727^\circ\text{C}$ — $t_{\text{сп.отн.}} = 1839,6^\circ\text{C}$, для $t_{\text{действ}} = 1927^\circ\text{C}$ — $t_{\text{сп.отн.}} = 2057,2^\circ\text{C}$, для $t_{\text{действ}} = 2127^\circ\text{C}$ — $t_{\text{сп.отн.}} = 2274,0^\circ\text{C}$, для $t_{\text{действ}} = 2327^\circ\text{C}$ — $t_{\text{сп.отн.}} = 2492,3^\circ\text{C}$. Зависимость $t_{\text{действ}}$ от $t_{\text{сп.отн.}}$ в соответствии с вышеприведенными результатами вычислений приведена на рис. 2.

В результате вычислений мы располагаем восемью точками искомой зависимости, которые соответствуют восьми значениям температуры, при которых у вольфрама были измерены спектральные излучательные характеристики. Для получения аналитического вида этой зависимости целесообразно воспользоваться методом полиномиальной регрессии, аппроксимировав искомую зависимость степенным полиномом. В данном случае приемлемый результат получается при аппроксимации полиномом второй степени вида $t_{\text{действ}} = C_0 + C_1 \cdot t_{\text{сп.отн.}} + C_2 \cdot (t_{\text{сп.отн.}})^2$, где $C_0 = 8,8145 \cdot 10^{-1}$, $C_1 = 9,5228 \cdot 10^{-1}$, $C_2 = -7,6287 \cdot 10^{-6}$. Коэффициенты полинома вычисляются в соответствии со стандартным для полиномиальной регрессии алгоритмом.

Степень полинома должна быть на две и более единицы меньше количества точек аппроксимируемой зависимости (для 8 точек — не выше 6 степени). Рекомендуется использовать полином минимально возможной степени, при которой точки аппроксимации отличаются от точек исходной зависимости в минимально разумной степени



(например, не более чем на 0,5–1 % в зависимости от решаемой задачи). Приведенный выше аппроксимирующий полином второй степени обеспечил точность аппроксимации чуть лучше 0,2 %.

Рис. 2. Зависимость действительной температуры $t_{\text{действ}}$ от температуры спектрального отношения $t_{\text{сп.отн.}}$ для W с учетом его температурно-зависимой спектральной излучательной способности.

Список литературы

1. Излучательные свойства твердых материалов. Справочное издание / Под ред. А.Е. Шейндлина. М.: Энергия, 1974. 471 с.
2. Лисенко В.Г., Шлеймович Е.М., Ладыгичев М.Г., Санников С.П., Щелоков Я.М. Температура: теория, практика, эксперимент. Справочное издание в 3-х томах. Т. 1, кн. 2. Методы контроля температуры. М.: Теплотехник, 2009. 339 с.
3. Фрунзе А.В. Метрологические проблемы современной энергетической пирометрии // Метрология. 2018. № 1. С. 42–57.
4. Фрунзе А.В. Методические погрешности современных пирометров и способы их минимизации // Метрология. 2012. № 7. С. 25–38.
5. Фрунзе А.В. Об одной малоизвестной сегодня особенности пирометров спектрального отношения // Фотоника. 2013. № 3. С. 86 – 94.
6. Яковлев А.В. Особенности применения широкополосных приемников излучения в пирометрах спектрального отношения // Автометрия. 2004. № 4. С. 44 – 49.
7. Фрунзе А.В. Расчетный метод определения температуры спектрального отношения // Измерительная техника. 2010. № 6. С. 39–42.
8. Самойлов М.Л., Фрунзе А.В. Повышение точности измерений температуры «несерых» тел широкополосным пирометром спектрального отношения // Метрология. 2010. № 6. С. 23–31.
9. Битюков В.К., Битюков Р.А., Горбунов Д.С., Симачков А.В., Фрунзе А.В. Комплект низкоуровневых программ для расчета температуры спектрального отношения при измерении двухспектральными широкополосными пирометрами температуры «несерых» тел // Сб. науч. статей по материалам V Междунар. научно-практич. конф. «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» («Радиоинфоком-2021»), Москва, РТУ МИРЭА: Сб. научных статей. М.: МИРЭА–Российский технологический университет, 2021. С. 420–426.
10. Режим доступа: <http://www.pyrometer.ru>.

*Статья поступила в редакцию 21 июля 2022 г.,
после доработки — 5 февраля 2023 г.,
принята к публикации 2 марта 2023 г.*