

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПИРОМЕТРА

Фрунзе А.А., Фрунзе А.В. (оба - ННТП ТЕРМОКОНТ)

(расширенная и дополненная версия настоящей статьи в ближайшее время будет доступна на сайте www.pyrometer.ru)

Введение

Описанная ниже ситуация знакома многим технологам и метрологам крупных предприятий.

Предприятие приобрело у известного западного производителя полностью укомплектованную производственную линию (например, прокатный стан с шириной листа до 4000-5000 мм для производства труб). В комплекте стана для измерения температуры прокатываемого листа используются 3-4 энергетических пирометра одного из ведущих мировых производителей. В эксплуатационной документации на оборудование указано, что при работе со сталью определенной марки в пирометрах нужно устанавливать коэффициент излучения, равный, к примеру, 0,88.

По прошествии времени один из этих пирометров выходит из строя, и для его замены приобретается другой, от другого производителя, но с той же основной погрешностью и с практически тем же показателем визирования. Однако установка нового пирометра с введенным в него значением 0,88 сопровождается появлением заметной погрешности в измерениях. Для исключения этой погрешности в него приходится ввести вместо 0,88 значение 0,91. У пользователей возникает вопрос – так каков же коэффициент излучения данной марки стали, 0,88 или 0,91? Для нахождения ответа на этот вопрос в другом цеху находится третий пирометр, от третьего производителя. Но проведенные им измерения ставят метрологов и технологов в окончательный тупик – в третий пирометр, чтобы получить тот же результат измерения температуры, необходимо ввести значение коэффициента излучения, равное 0,69!

Упомянутые значения коэффициентов излучения в известной мере произвольны, и в каждом конкретном случае они могут быть своими. Но главное – они различны для одного и того же материала в одних и тех же условиях, но для различных пирометров. И эта неопределенность вызывает законное недовольство у пользователей пирометров.

Определение коэффициента излучения ε

Сложившаяся на сегодняшний день практика измерений энергетическими пирометрами предполагает вводить в них корректирующий коэффициент (или коэффициент излучения) ε , связанный со значением излучательной способности измеряемого объекта. Однако методик, позволяющих получить метрологически значимые значения ε (т.е. с метрологически подтвержденным значением погрешности измерений ε) у пользователей нет. Нет у них также и средств

измерений ε . Поэтому им приходится использовать ориентировочные значения ε , взятые из справочной литературы. Но здесь возникают две серьезные метрологические проблемы.

Как было упомянуто выше, коэффициент излучения – величина не только материалозависимая, но и приборозависимая. То есть, коэффициент излучения одного и того же материала в одних и тех же условиях может быть разным для разных приборов с различными спектральными чувствительностями приемников излучения.

Чтобы понять причину такого поведения коэффициента излучения, обратимся к рисункам.

На рис. 1 изображена построенная на основании данных из [2] зависимость спектральной излучательной способности $\varepsilon(\lambda)$ низколегированной стали от длины волны излучения λ . Поскольку в оригинале эта зависимость в диапазоне длин волн менее 1 мкм не измерялась, она интерполирована в область коротких волн на основании данных, имеющих в [3] и в [4]. Точность такой интерполяции весьма низка, но для данного случая, где предполагается лишь качественно объяснить происхождение коэффициента излучения ε и его различия при использовании разных пирометров, этого достаточно.

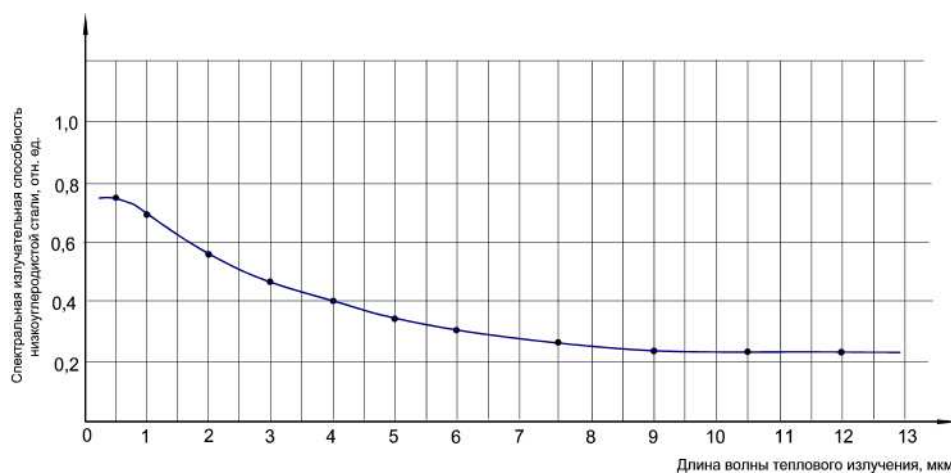


Рис. 1. Зависимость спектральной излучательной способности $\varepsilon(\lambda)$ низколегированной стали от длины волны излучения λ .

Необходимо отметить, что рассматриваемая зависимость $\varepsilon(\lambda)$ от λ не является константой, по крайней мере в видимой и ближней ИК-области спектра. Объекты, характеризующиеся такой зависимостью $\varepsilon(\lambda)$ от λ , получили название “несерых объектов” или “несерых тел”.

На рис. 2 приведены спектральные характеристики чувствительности трех различных приемников излучения. Кривая $s_a(\lambda)$ соответствует приемнику на основе Si-фотодиода с отрезающим фильтром из стекла марки ИКС. Кривая $s_b(\lambda)$ соответствует приемнику на основе In-

GaAs-фотодиода. Кривая $s_c(\lambda)$ соответствует “солнечно слепому” тепловому приемнику с диапазоном спектральной чувствительности от 7...8 мкм до 12...13 мкм.

На рис. 3 спектральные характеристики чувствительности вышеупомянутых приемников излучения совмещены со спектральной излучательной способностью $\mathcal{E}(\lambda)$ низколегированной стали из рис. 1. Очевидно, что в диапазоне чувствительности первого приемника спектральная излучательная способность $\mathcal{E}(\lambda)$ изменяется вблизи значения 0,7. В диапазоне чувствительности второго приемника спектральная излучательная способность $\mathcal{E}(\lambda)$ изменяется примерно от 0,65 до 0,6. А в диапазоне чувствительности третьего приемника спектральная излучательная способность $\mathcal{E}(\lambda)$ изменяется примерно от 0,27 до 0,22.

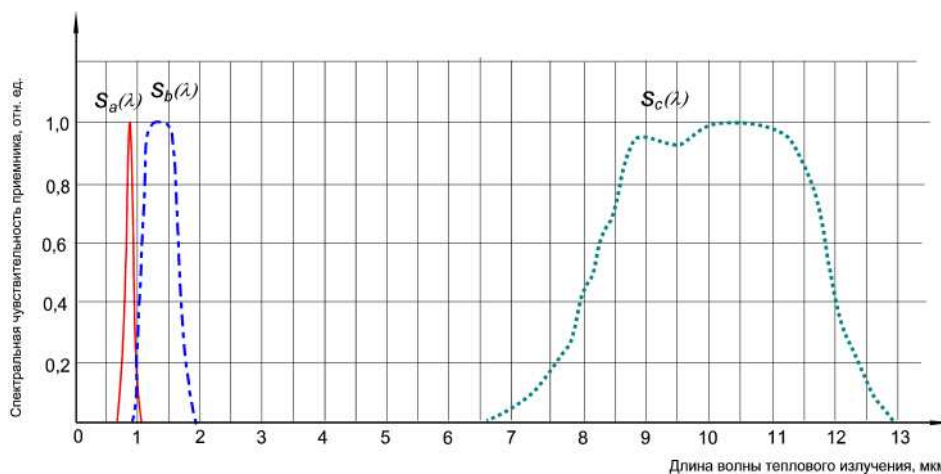


Рис. 2. Спектральные характеристики чувствительности приемников излучения на основе Si-фотодиода ($s_a(\lambda)$), InGaAs-фотодиода ($s_b(\lambda)$) и термоэлемента ($s_c(\lambda)$).

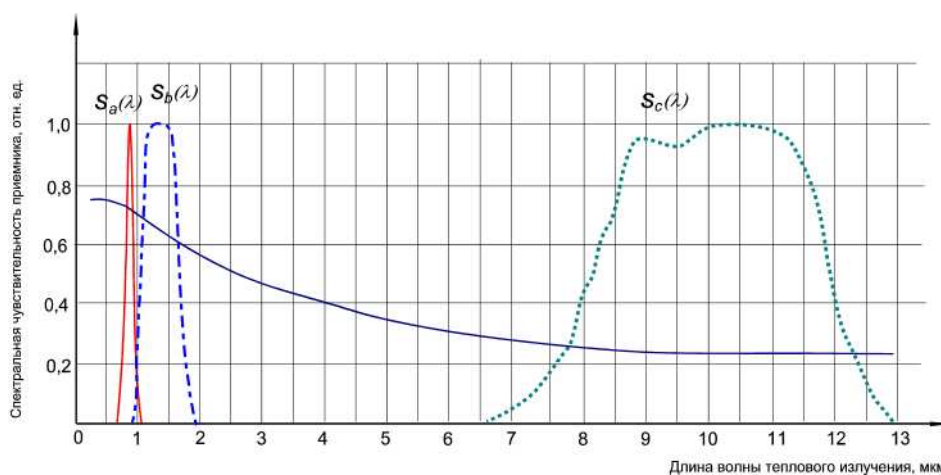


Рис. 3. Совмещение спектральных характеристики чувствительности приемников со спектральной излучательной способности $\mathcal{E}(\lambda)$ низколегированной стали

Таким образом, для “несерых тел”, к которым относится подавляющее большинство металлов, коэффициент излучения оказывается зависящим от спектрального диапазона, в котором работает энергетический пирометр. А в справочной литературе практически повсеместно от-

сутствует информация о том, в каком спектральном диапазоне были проведены измерения, представленные в соответствующих таблицах. Поэтому пользователь запросто может ввести в свой пирометр значение коэффициента излучения, соответствующее пирометру с другим спектральным диапазоном. Если эти значения различны, т.е. объект “несерый”, возникнет методическая погрешность вследствие ввода ошибочного значения коэффициента излучения, определяемая (для яркостных пирометров) соотношением:

$$\frac{T_{\delta} - T'_{\delta}}{T_{\delta}} = \frac{T_{\delta} \cdot \frac{\lambda}{c_2} \cdot \ln\left(1 + \frac{\Delta\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T)}{\varepsilon_{\lambda}^u(\lambda, T)}\right)}{1 + T_{\delta} \cdot \frac{\lambda}{c_2} \cdot \ln\left(1 + \frac{\Delta\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T)}{\varepsilon_{\lambda}^u(\lambda, T)}\right)}. \quad (1)$$

Здесь T_{δ} – действительное значение температуры объекта, T'_{δ} – значение температуры объекта, получаемое при вводе ошибочного значения коэффициента излучения, $\varepsilon_{\lambda}^u(\lambda, T)$ – действительное (соответствующее используемому пирометру) значение излучательной способности, а $\Delta\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T)$ – ошибка ввода коэффициента излучения, т.е. разность между $\varepsilon_{\lambda}^u(\lambda, T)$ и тем значением, которое взято из справочной литературы.

Из (1) следует, к примеру, что если пирометр работает на длинах волн 1,5...2 мкм, и $\Delta\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) = 0,1 * \varepsilon_{\lambda}^u(\lambda, T)$, то для $T_{\delta} = 1600\text{K}$ дополнительная погрешность составит 2%. При $\Delta\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) = 0,2 * \varepsilon_{\lambda}^u(\lambda, T)$ эта погрешность превысит уже 5%, и т.д. Иными словами, эта дополнительная погрешность очень часто является значимой, заметно влияющей на результат измерения. А пользователь при этом не только не знает величины этой погрешности, но чаще всего даже не догадывается о ее существовании! В этом заключается первая из упомянутых метрологических проблем.

Предположим, однако, что с этой проблемой пользователь справился, и ввел в пирометр значение коэффициента излучения, соответствующее измеряемому материалу и используемому пирометру. Значение коэффициента излучения по-прежнему взято из справочных источников. Но анализ этих данных показывает, что погрешности приводимых там значений коэффициентов излучения неопределены. А если так, то и погрешности измерений пирометрами, опирающиеся на эти значения ε , вообще говоря, также неопределены. И вот в этом суть второй серьезнейшей метрологической проблемы, связанной с использованием значений коэффициентов излучения, взятых из литературных и справочных материалов.

Поэтому необходима разработка новых способов получения значений коэффициентов излучения ε измеряемых объектов, которые могут обеспечить метрологическую значимость полученного результата измерения температуры.

Можно показать, что значение коэффициента излучения, которое надо ввести в пирометр для того, чтобы он правильно измерил температуру такого “несерого объекта”, определяется соотношением:

$$\varepsilon = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot P(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} s(\lambda) \cdot P(\lambda, T) d\lambda}, \quad (2)$$

где $\varepsilon(\lambda)$ - спектральная излучательная способность измеряемого объекта (в данном случае из рис. 1), $s(\lambda)$ - спектральная характеристика чувствительности конкретного приемника (в рассматриваемом случае – $s_a(\lambda)$, $s_{\bar{o}}(\lambda)$ или $s_c(\lambda)$ из рис. 2), $P(\lambda, T)$ - функция Планка.

Для вычислений согласно (2) необходимо располагать спектральной излучательной способностью измеряемого объекта и спектральной чувствительностью приемника пирометра. Что касается спектральной чувствительности приемников излучения пирометров, то для пирометров ДИЭЛТЕСТ и ТЕРМОКОНТ типовые спектральные характеристики в ближайшее время будут размещены на сайте www.pyrometer.ru. Поскольку авторам представляется, что характеристики спектральной чувствительности не представляют собой коммерческой тайны предприятий-производителей пирометров, можно предполагать, что в обозримом будущем пользователям будут доступны типовые спектральные характеристики всех (или почти всех) производимых пирометров, и эта часть проблемы будет снята.

Со спектральной излучательной способностью измеряемых объектов дело обстоит намного хуже. В [4] собрано большое количество экспериментального материала, касающегося этой характеристики, однако с момента издания этой книги прошло около 30 лет, и появилось много новых данных, которые надо выбирать из периодических изданий. К тому же характеристики одних и тех же материалов могут различаться в условиях производства на различных предприятиях вследствие разного состояния поверхности материала, что обусловлено различиями технологических циклов. Поэтому может оказаться необходимым производить измерения реальной спектральной излучательной способности выпускаемых предприятиями материалов. Большое количество методов, позволяющих осуществить такие измерения, также есть в [4].

И последнее, для вычисления (2) необходимо считать определенные интегралы, что для рядового пользователя, не использующего постоянно в своей работе знания из высшей математики, весьма проблематично. К тому же ε_λ и s_λ обычно известны не в виде аналитических функций, а в виде отдельных экспериментальных точек, полученных в ходе измерения соответствующей зависимости. Все это приводит к тому, что расчеты согласно (2) возможно провести лишь численными методами.

Использование для этой цели таких мощных пакетов для математической обработки, как MatLab и ему подобных возможно, но неудобно. Пользователь должен иметь легальную версию пакета, и уметь им пользоваться, что опять же приемлемо для научных работников, но не для заводских специалистов-практиков. Поэтому возникает потребность в простых программах для расчетов согласно (2), которые были бы свободно распространяемы и предельно просты в ис-

пользовании. В соответствии с этим и была разработана программа specotn.exe, описание и примеры использования которой даны ниже.

Программа SPECOTN.EXE

Программа specotn.exe предназначена для проведения расчетов в соответствии с соотношением (2). Для запуска программы необходимы три файла с исходными данными – файл с характеристикой спектральной чувствительности приемника излучения s_λ , файл с данными о спектральной излучательной способности измеряемого объекта ε_λ , а также файл спектральной излучательной способности МЧТ (с единичными значениями для каждой длины волны).

Формат каждого из файлов – два столбца с числами. В левом столбце (через 1-2 пробела от левого края) – длины волн излучения в нанометрах. В правом столбце (в 3-4 пробелах от левого) – относительные значения спектральной чувствительности и спектральной излучательной способности, диапазон изменения чисел правого столбца – от 0 до 1. Данные могут быть набраны в Windows-программе Блокнот. Формат представляемых данных – либо с фиксированной точкой (напр., 743.0 или 0.02315), либо с плавающей точкой (напр., 2.2920E-03 или 0.0000E+00), см. рис. 4.

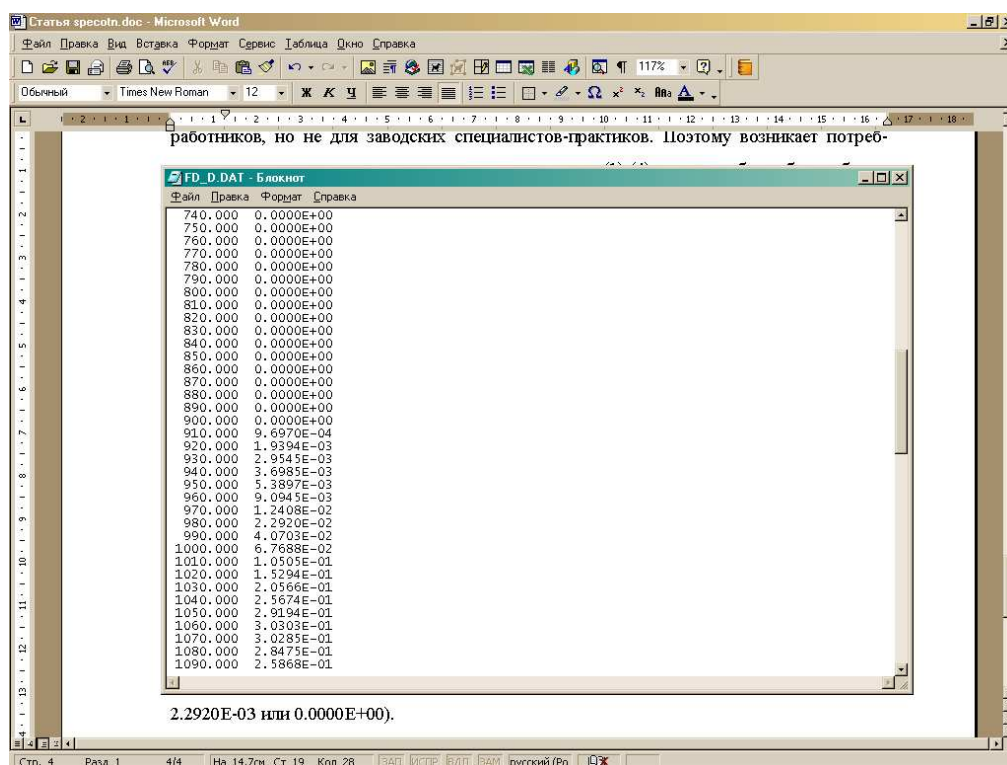


Рис. 4. Пример представления данных в файле для программы specotn.exe

Программа запускается из командной строки, удобнее всего это делать в программах Windows Commander или Total Commander, либо им аналогичных. Формат запуска программы:

$$\text{specotn.exe eps_fe.dat bb.dat ingaas.dat} \quad (3)$$

Файл eps.dat (первый после specotn.exe, через 1 пробел, название может быть любым, имя – не более 8 латинских символов, расширение – не более 3 латинских символов) должен содержать спектральную излучательную способность объекта, файл bb.dat (через пробел после eps.dat, требования к названию файла – те же) должен содержать спектральную излучательную способность МЧТ, файл ingaas.dat (через пробел после bb.dat, требования к названию файла – те же) должен содержать спектральную характеристику чувствительности приемника пирометра.

В директории, где расположена программа specotn.exe, должен быть также расположен файл specotn.inf (рис. 5) и файл specotn.res (последний – с любым содержанием).

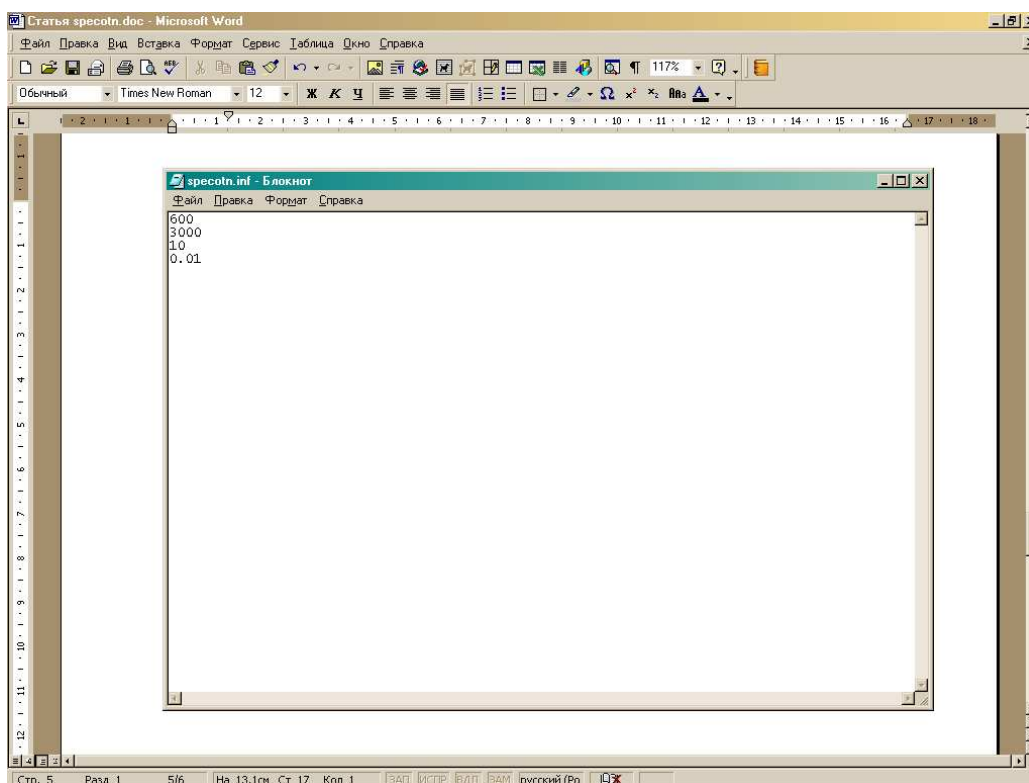


Рис. 5. Пример представления данных в файле specotn.inf

Первое число в файле specotn.inf – нижний предел изменения температуры в градусах Цельсия, второе – верхний предел, третье – шаг расчета, четвертое – задаваемая погрешность вычислений (значения менее 0.001 заметно увеличивают время вычислений, поэтому их использовать не рекомендуется).

Пример содержимого файла eps_fe.dat приведен на рис. 6. Содержимое файла bb.dat аналогично eps_fe.dat, но правый столбец должен содержать единицы для всех длин волн (рис. 7).

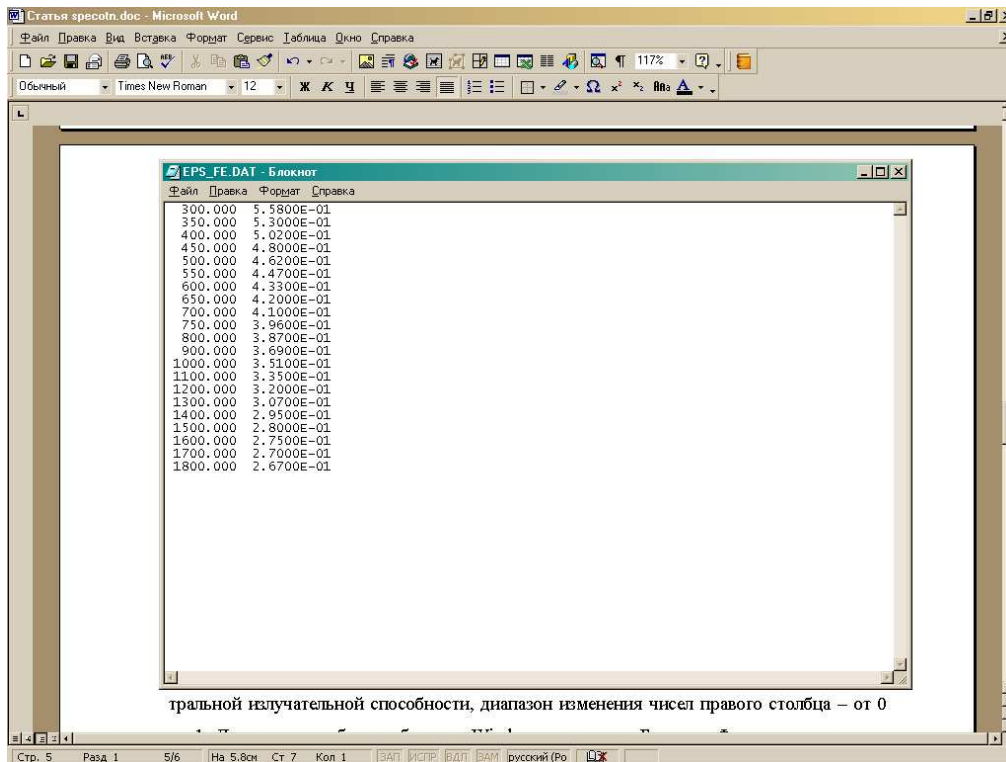


Рис. 6. Пример представления данных в файле eps_fe.dat

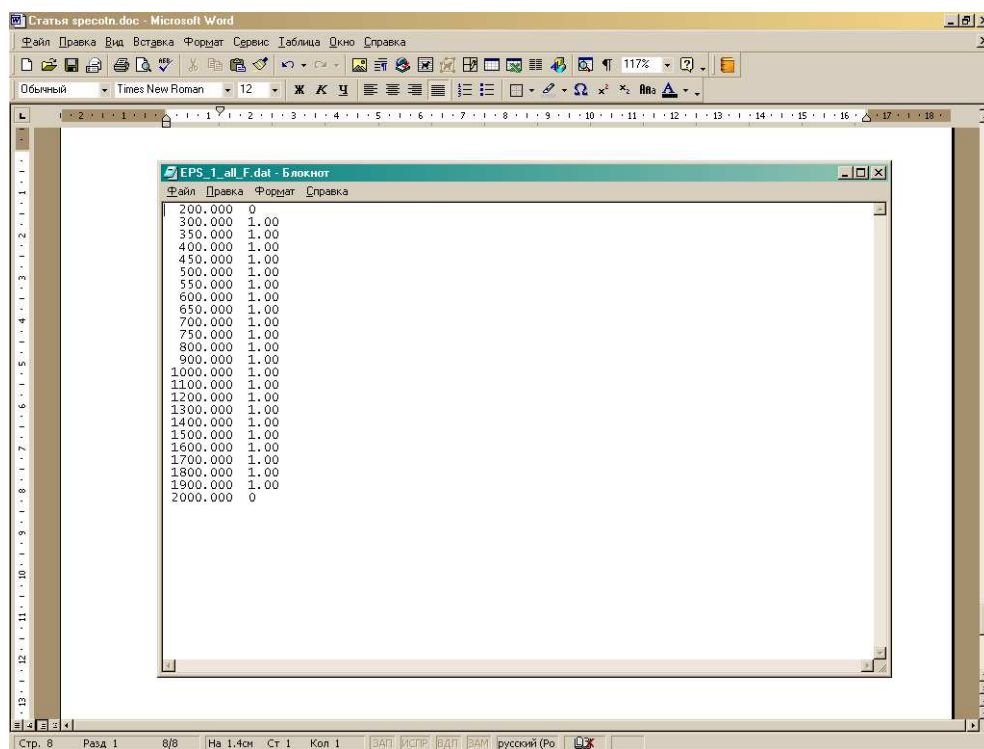


Рис. 7. Пример представления данных в файле bb.dat

Для того, чтобы осуществить расчет согласно (2), необходимо в качестве третьего параметра запускаемого файла в (3) указать имя файла со спектральной чувствительностью соответствующего приемника пирометра. Для упомянутых выше $s_a(\lambda)$, $s_b(\lambda)$ и $s_c(\lambda)$ из рис. 2 это файлы с названиями si.dat, ingaas.dat и td505.dat.

Результат счета при запуске программы согласно (3) приведен на рис. 8. Это расчет для $s_b(\lambda)$. Расчет для $s_a(\lambda)$ осуществляется аналогично, но третьим параметром вместо ingaas.dat надо взять si.dat. Соответственно, в случае с $s_c(\lambda)$ третьим параметром вместо ingaas.dat надо взять td505.dat.

Temperature (K)	Value
600	0.624606
700	0.627196
800	0.629555
900	0.631693
1000	0.633627
1100	0.635372
1200	0.636947
1300	0.638371
1400	0.639659
1500	0.640826
1600	0.641886
1700	0.642851
1800	0.643731
1900	0.644535

Рис. 8 Результат счета при запуске программы согласно (3)

Расчет, проведенный в соответствии с (2) для температуры 1000°C, а также для $\varepsilon(\lambda)$, приведенной на рис. 1, и $s_a(\lambda)$, $s_b(\lambda)$ и $s_c(\lambda)$ (рис. 2) дает следующие результаты:

$$\varepsilon_a = 0,695;$$

$$\varepsilon_b = 0,634;$$

$$\varepsilon_c = 0,251;$$

где ε_a определялся с использованием $s_a(\lambda)$, ε_b - с использованием $s_b(\lambda)$, ε_c - с использованием $s_c(\lambda)$.

Отметим, что значения ε_a , ε_b , и ε_c соответствуют средним значениям $\varepsilon(\lambda)$ в диапазонах спектральной чувствительности соответствующих приемников – это очевидно сравнением

результатов расчета с рис. 3, где спектральные чувствительности приемников наложены на $\varepsilon(\lambda)$.

Выводы

Приведенные выше результаты расчета коэффициента излучения согласно (2) подтверждают, что одному и тому же материалу приходится ставить в соответствие различные значения коэффициента излучения ε . Но теперь очевидна причина этой множественности – она является следствием “несерости” измеряемого объекта и различия спектральной чувствительности используемых пирометров.

Мы видим, что определенный в соответствии с (2) коэффициент излучения зависит не только от свойств измеряемого материала, но и является приборно-зависимой величиной. Именно поэтому и происходит вышеописанная путаница, когда для получения правильного результата в один пирометр нужно ввести одно значение коэффициента излучения, в другой – другое, в третий – третье, и т.д. На этот очевидный вывод внимание метрологов и пользователей пирометров в литературе не акцентируется.

Таким образом, описанное во введении кажущееся неразумным многообразие значений коэффициента излучения для одного и того же материала является следствием “несерости” измеряемого объекта и различия в спектральной чувствительности используемых пирометров. В свете этого многочисленные литературные и справочные данные о значении коэффициента излучения, если в них отсутствует информация о том, в каком температурном и спектральном диапазонах были проведены измерения, не могут быть рекомендованы для метрологически корректных методик измерения температуры с использованием энергетических пирометров и тепловизоров.

Метрологически корректно значения коэффициента излучения вычислять в соответствии с (2). Однако для этого необходимо располагать зависимостями $\varepsilon(\lambda)$ для измеряемых объектов, спектральными характеристиками пирометров и программами, позволяющими осуществлять расчеты по (2). Поскольку попытки найти аналитическую связь $\varepsilon(\lambda)$ с электропроводностью и другими измеряемыми характеристиками объектов до сих пор не дали удовлетворительных результатов, очевидно, что эта информация должна получаться с использованием специализированных средств измерений спектральной излучательной способности, для которых необходимо создать эталонную базу и поверочные схемы. Спектральные характеристики пирометров должны быть доступны пользователям на сайтах производителей пирометров. Как отмечалось, спектральные характеристики пирометров ДИЭЛТЕСТ и ТЕРМОКОНТ можно будет найти на сайте www.pyrometer.ru. Там же будет доступна и описанная в настоящей статье программа `spresotn.exe`, с помощью которой можно осуществлять расчеты согласно (2).

Также необходимо отметить, что входящие в (2) $\mathcal{E}(\lambda)$ и $s(\lambda)$ являются результатами измерений и характеризуются теми или иными погрешностями измерений. Соответственно, эти погрешности определяют по законам теории вероятности и математической статистики погрешность рассчитанного в соответствии с (2) коэффициента излучения ε . Таким образом, описанный подход к определению коэффициента излучения ε снимает обе упомянутые выше метрологические проблемы.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Линеверг Ф. Измерение температур в технике. Справочник. Пер. с нем. – М.: «Металлургия», 1980. – 544 с.
- 2 Беленький А.М., Дубинский М.Ю., Ладыгичев М.Г., Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М. Измерение температуры: теория, практика, эксперимент. Справочное издание: В 3-х томах. Т.2 – М.: Теплотехник, 2007 – 736 с.
- 3 Брамсон М.А. Инфракрасное излучение нагретых тел. В 2 томах. Т.1. – М.: «Наука», 1965. – 224 с.
- 4 Излучательные свойства твердых материалов. Под ред. Шейндлина А.Е. – М.: «Энергия», 1974. – 471 с.