

БЕСКОНТАКТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ИСТИННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПОМОЩИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПИРОМЕТРИИ

А. А. Холин¹, Ю. Н. Пырков^{1,2}

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

² Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва

Любое нагретое тело излучает энергию. Такое излучение называется тепловым. Тепловое излучение – электромагнитное излучение, возникающие за счет внутренней энергии тела. Электромагнитная энергия в спектральном интервале $\lambda \div \lambda + d\lambda$ излучения абсолютно черного тела определяется формулой Планка [1].

$$b_0(\lambda, T)d\lambda = C_1\lambda^{-5} \left(\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1 \right)^{-1} d\lambda \quad (1)$$

Это выражение верно для излучения абсолютно черного тела. Абсолютно черное тело – тело, которое при любой температуре поглощает все падающее на него электромагнитное излучение во всем спектральном диапазоне. Но в жизни мы редко имеем дело с абсолютно черным телом. Именно поэтому вводится коэффициент излучения тела. Коэффициент излучения – это отношение излучения реального тела к излучению абсолютно черного тела при той же истинной температуре и на одной длине волны

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{b(\lambda, T)}{b_0(\lambda, T)} \quad (2)$$

Коэффициент излучения зависит от материала, из которого изготовлено тело, так же он зависит от формы и состояния поверхности тела.

В данной работе будет описан метод бесконтактного измерения истинной температуры объектов при помощи спектральной пирометрии.

Рассмотрим имеющиеся виды пирометров на данный момент.

Яркостные пирометры – прибор, который способен определять температуру тела, при помощи визуального сравнения излучения предмета с излучением эталонной нити [1]. В этом методе коэффициент излучения тела принимается равным коэффициенту излучения абсолютно черного тела. Таким образом измеряется яркостная температура тела. Это не истинная температура объекта. Яркостная температура – температура черного тела, имеющего при выбранном значении длины волны ту же величину спектральной яркости.

$$b(\lambda_i, T)d\lambda = b_0(\lambda_i, T)\varepsilon(\lambda_i, T)d\lambda = b_0(\lambda_i, T_\lambda)d\lambda \quad (3)$$

Переход к приближению Вина:

$$T_\lambda^{-1} = T^{-1} - \frac{\lambda}{C_2} \ln \varepsilon(\lambda, T) \quad (4)$$

Цветовые пирометры измеряют цветовую температуру объекта по отношению интенсивностей излучения в двух определенных участках спектра, каждый из которых характеризуется своей длиной волны [1]. В этом методе коэффициент излучения предполагается постоянным (одинаковым для выбранных длин волн). Таким образом измеряется цветовая температура тела. Цветовая температура – температура черного тела, которое имеет то же распределение спектральной плотности энергии, т. е. то же отношение интенсивностей излучений в используемом участке спектра.

$$R = \frac{b(\lambda_1, T_{\text{ц}})}{b(\lambda_2, T_{\text{ц}})} = \frac{b_0(\lambda_1, T) \times \varepsilon(\lambda_1, T)}{b_0(\lambda_2, T) \times \varepsilon(\lambda_2, T)} \quad (5)$$

Опять в приближении Вина:

$$T_{\text{ц}}^{-1} = T^{-1} - \frac{\Lambda}{C_2} \ln \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} \quad (6)$$

Радиационный пирометр определяет температуру тела исходя из полной энергии, излучаемой им, в единицу времени [1]. В этом методе коэффициент излучения тела принимается равным коэффициенту излучения абсолютно черного тела. Таким образом измеряется температура суммарного излучения (радиационная) тела. Температура суммарного излучения (радиационная) – температура черного тела при которой величина суммарной излучаемой им энергии равна суммарной энергии излучения нечерного тела.

$$E_{\Sigma} = \varepsilon(T) E_0 = \varepsilon(T) \sigma T^4 \quad (7)$$

$$E_{\Sigma} = \sigma T_{\Sigma}^4 \quad (8)$$

В данной работе все измерения производились при помощи спектрографа с ПЗС – матрицей. В результате работы было создано программное обеспечение для связи со спектрографом. Спектрограф был откалиброван по длинам волн, была проведена проверка на линейность по интенсивности сигнала и была проведена калибровка спектрографа по спектральной чувствительности.

При первых использованиях спектрографа было ясно, что данное в комплекте с прибором соответствие номера пикселя и длины неверное, в связи с этим была проведена калибровка по длинам волн.

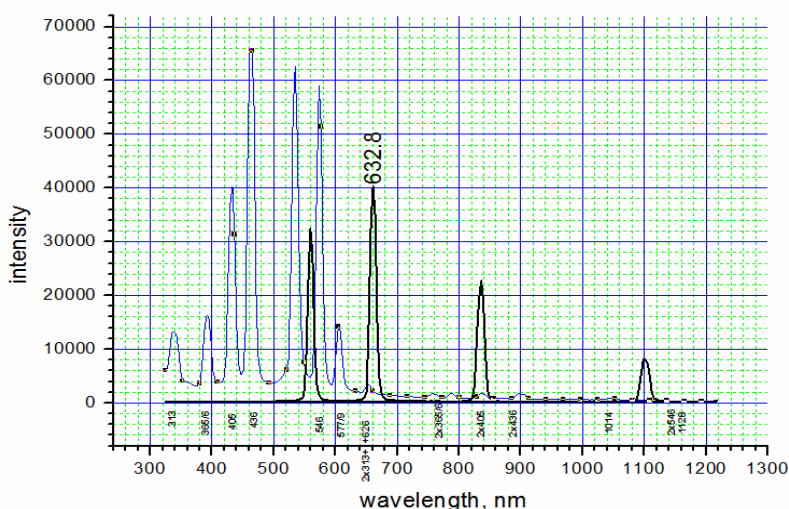
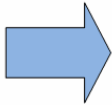


Рис. 1. Калибровка спектрографа по длинам волн

На графике показан спектр излучения ртутной лампы (синий график), красного лазера (HeNe) (второй черный пик) и зеленого лазера (первый, третий и четвертый черный пик). Т.к. все значения этих пиков являются табличными значениями, на основе этих данных была проведена калибровка, в результате калибровки было получено новое актуальное соответствие между номером пикселя и длиной волны.

№	λ , nm
1	324,547
2	328,049
3	331,551
4	335,053
5	338,555
6	342,057
7	345,559
8	349,061
9	352,563
10	356,066
11	359,568
12	363,07
...	...
256	1217,582



№	λ , nm
1	296,9451
2	300,4446
3	303,9441
4	307,4436
5	310,9431
6	314,4425
7	317,942
8	321,4415
9	324,941
10	328,4415
11	331,941
12	335,4405
...	...
256	1189,34

Рис. 2. Новая таблица соответствия

Так же была проведена проверка на линейность по интенсивности сигнала: был взят источник излучения (лампа накаливания), она помещалась на разных расстояниях от спектрографа, и в этих положениях был измерен спектр ее излучения, после чего было взято отношение этих спектров и проверялось на линейность.

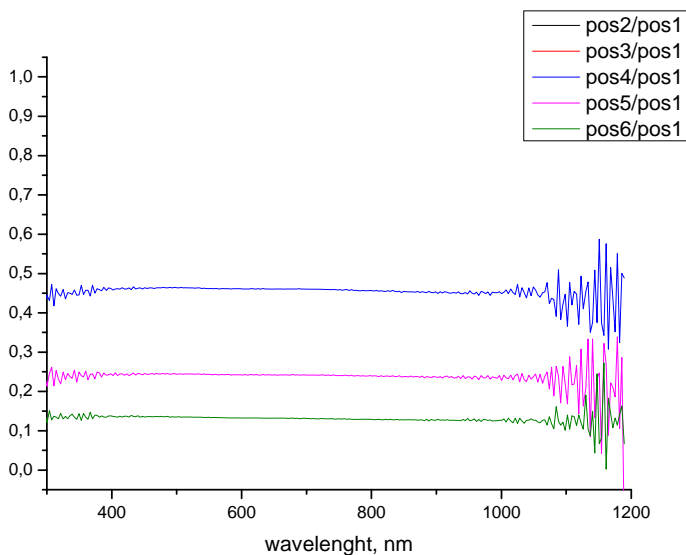


Рис. 3. Проверка спектрографа на линейность

Как видно из графика, эта зависимость линейна в определенном интервале длин волн.

Для снятия рабочих спектров, была проведена калибровка спектрографа по спектральной чувствительности. Для этого была взята температурная лампа ТРУ-1100-2350 № 25, откалиброванная в РОСТЕСТе, для которой известно соответствие яркостной температуры и силы тока, поданной на лампу. Пользуясь табличными значениями коэффициента излучения вольфрама, яркостная температура была пересчитана в истинную.

Схема установки для измерения излучения лампы.

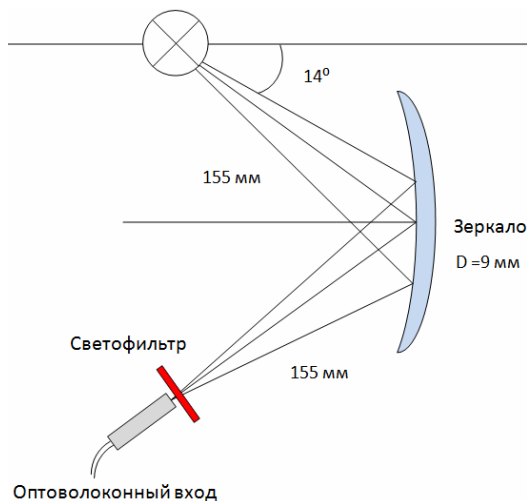


Рис. 4. Схема установки по снятию спектра излучения лампы

В схеме использовалось вогнутое сферическое зеркало с радиусом кривизны 155 мм, имеющее алюминиевое покрытие.

При измерении спектра использовался светофильтр КС10 для определения постоянной подставки спектра и удаления высших порядков (вторых порядков излучения 300–600 нм в спектре излучения, снятым спектрографом).

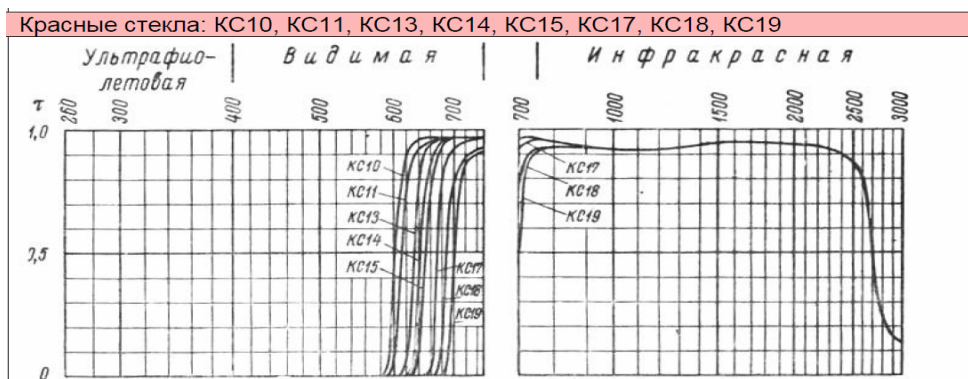


Рис. 5. Фильтры серии КС

Образец представляет собой кусок стали с просверленными в нем отверстиями, для уменьшения теплоотвода с выбранной поверхности.



Рис. 6. Образец

Был измерен спектр излучения лампы. Затем из спектра вычиталась постоянная составляющая подставки. По получившемуся спектру был рассчитан коэффициент пересчета данных спектрографа в системные единицы ($\text{Вт}/\text{м}^2$). (K – коэффициент спектральной чувствительности)

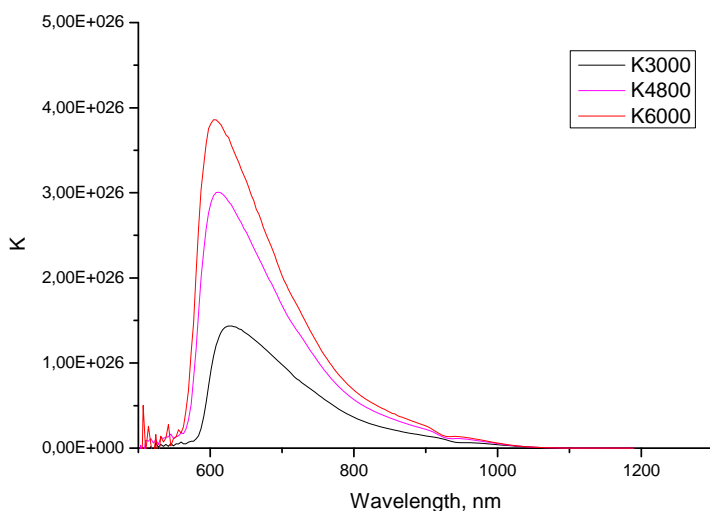


Рис. 7. Спектральная зависимость коэффициента спектральной чувствительности

Коэффициент K – это отношение измеренного сигнала эталонной лампы на определенной длине волны с заданным временем экспозиции к модельному излучению лампы (излучение абсолютно черного тела умноженное на коэффициент излучения и на пропускную способность стеклянной колбы лампы).

На графике представлены коэффициенты K для трех времен экспозиции (3000 мс, 4800 мс, 6000 мс) (рис. 7).

Размерность коэффициента K – $\text{ед.}/(\text{Вт}/\text{м}^2)$.

Затем был измерен спектр излучение образца, нагретого с помощью лазерного излучения. Зная коэффициент K при данном времени экспозиции (3000 мс) был построен спектр излучения тела в $\text{Вт}/\text{м}^2$. Схема установки по измерению спектра излучения образца.

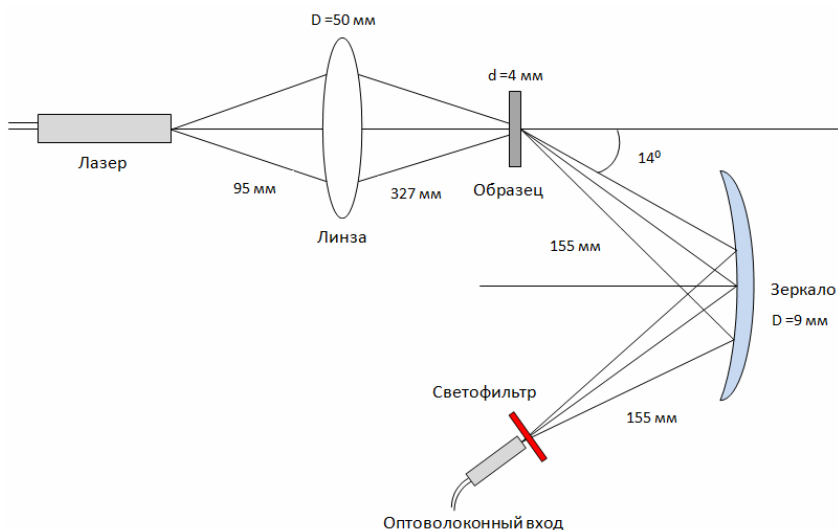


Рис. 8. Схема установки по измерению спектра излучения образца

В схеме использовался лазер JOLD-400-CAXF-6P2 с матрицей полупроводниковых лазеров, лазер использовался на мощности 100 Вт. Лазер имеет волоконный выход (многомодовое волокно 600 мкм, апертура 0,2). Линза имеет фокусное расстояние 75 мм.

Образец сам загораживал наш приемник от нагревающего лазерного излучения. Зеркало стояло не на оптической оси схемы, иначе бы прямое лазерное излучение попадало бы на приемник, в случае прожига образца.

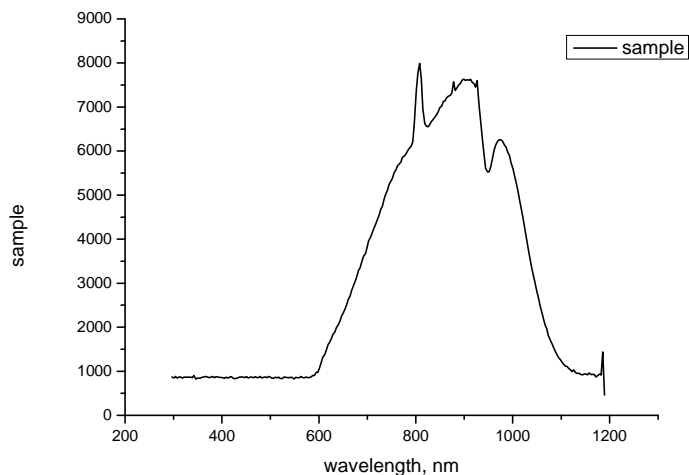


Рис. 9. Спектр излучения образца

Из спектра вычиталась постоянная составляющая подставки. Постоянная составляющая сигнала возникает из-за наличия темнового тока в матрице спектрографа.

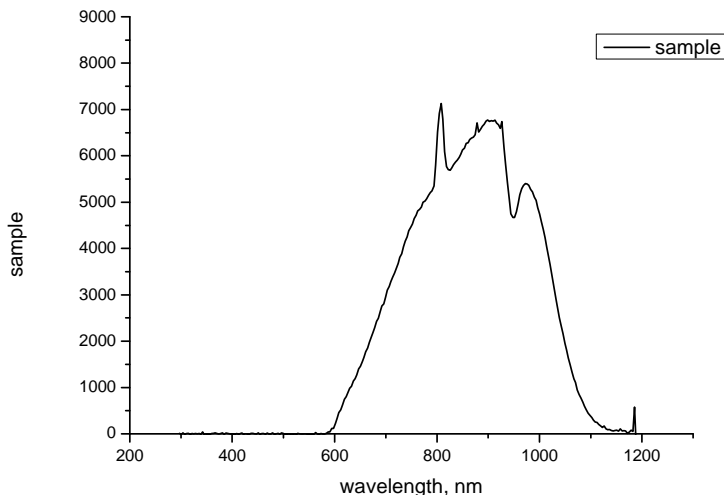


Рис. 10. Спектр излучения образца без постоянной составляющей

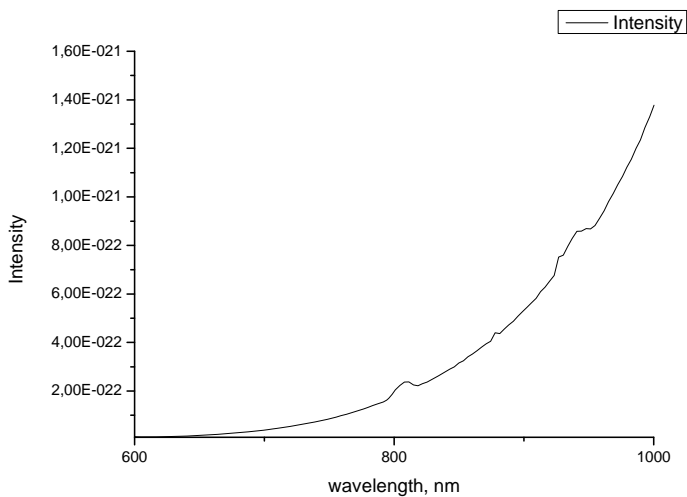


Рис. 11. Спектральная зависимость энергии излучения тела

Затем была посчитана истинная температура образца.

Пик в спектре образца на длине волны 807 нм объясняется тем, что на наш спектрограф все равно попала часть излучения лазера, который нагревает наш образец, т. к. это излучение было сильным (100 Вт). При дальнейшей обработке эту часть спектра можно не учитывать.

$$I(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) C_1 \lambda^{-5} \left(\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1 \right)^{-1} \quad (9)$$

Формула планка в приближении Вина имеет вид.

$$\frac{C_2}{\lambda T} \gg 1 \quad (10)$$

$$\ln(\lambda^5 I) - \ln(\varepsilon C_1) = -\frac{C_2}{\lambda T} \quad (11)$$

Если построить экспериментальный спектр в виновских координатах ($x = C_2/\lambda$, $y = \ln(\lambda^5 I)$) то получим прямую (в предположении $\varepsilon \approx \text{const}$). Из наклона прямой можно определить истинную температуру образца [2].

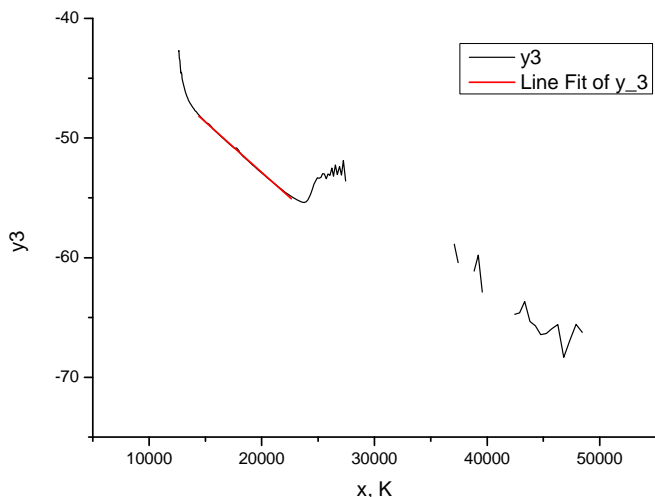


Рис. 12. Спектр излучения образца в виновских координатах

Данный прерывистый вид графика в области больших значений X легко объясняется, этот участок соответствует коротковолновой области спектра, где мы вычитали постоянную подставку (брались значения сигнала в области 300–500 нм и по ним считалось среднее значения подставки). На итоговом графике спектра, некоторые значения сигнала в коротковолновой области спектра получились отрицательные, что соответствует неопределенному значению y (логарифм от отрицательной величины). Виновская координата X обратно пропорциональна длине волны и для более наглядного согласования с длинами волн принято изображать подобные графики таким образом, что бы X убывал слева направо, а не возрастал. Как показано на графике ниже, коротковолновый участок нас и не интересует, т. к. значения сигнала там не значительное, а в области большого сигнала мы получаем непрерывную линию зависимости $y(x)$, которую можно аппроксимировать по линейному закону.

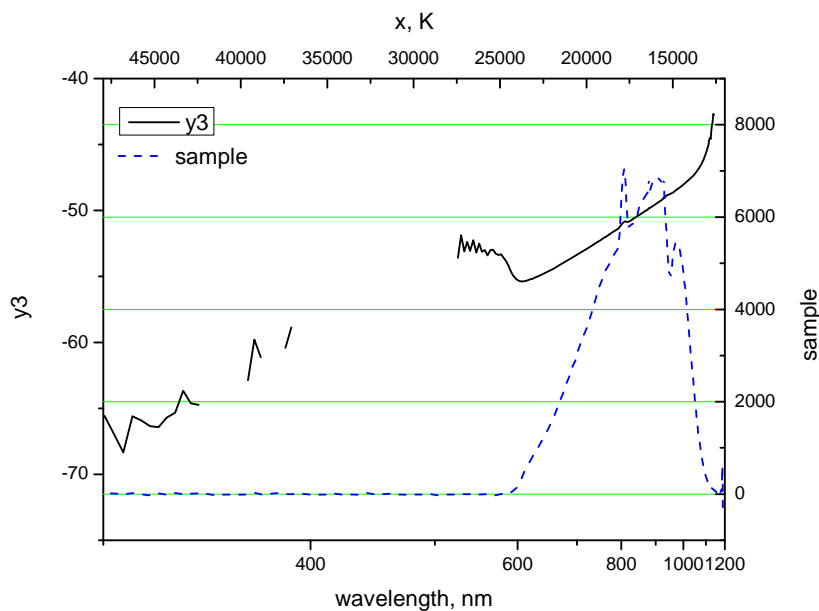


Рис. 13. Комбинированный график

Коэффициент наклона вычисляется по прямой, построенной по точкам, лежащим в области с достаточным количеством сигнала, где уровень сигнала больше уровня подставки.

По трем спектрам излучения образца была определена температура ($T_1 = 1194 \pm 30$ К, $T_2 = 1188 \pm 30$ К, $T_3 = 1180 \pm 30$ К) Температура образца: 1187 ± 30 К.

В результате работы была определена температура нагретого тела по спектру его излучения.

В дальнейших работах планируется разработать алгоритм определения температуры тела в предположение, что коэффициент излучения не постоянен по спектру.

Список литературы

1. Свет Д. Я. Объективные методы высокотемпературной пирометрии при непрерывном спектре излучения. М.: Наука, 1968 г. С. 240.
2. Магунов А. Н. Спектральная пирометрия (обзор) // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 4. С. 5.
3. Пырков Ю. Н., Плотниченко В. Г., Свет Д. Я. Измерение излучательной способности веществ в конденсированной фазе по спектру их собственного излучения // Неорганические материалы. 2000. Т. 36. № 9. С. 1–6.