

УДК 535.232.65

## Методика измерения мощности излучения исследуемого материала и модели абсолютно черного тела для определения нормальной излучательной способности материала

© 2020 г. **В. Я. Менделеев, канд. техн. наук; В. В. Качалов, канд. техн. наук**

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва

E-mail: v\_mendeleyev@list.ru

Поступила в редакцию 11.10.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-01-77-80

---

При измерениях нормальной излучательной способности материалов предполагают, что плотность потока излучения на поверхности исследуемого материала и модели абсолютно черного тела распределена равномерно. Однако из-за конструктивных особенностей нагревателей исследуемого материала и модели абсолютно черного тела это предположение не всегда выполняется. В настоящей статье предложена методика измерения мощности излучения поверхностей исследуемого материала и модели абсолютно черного тела, имеющих равномерную плотность потока излучения в центральной области поверхностей. Возможность измерения мощности излучения поверхности с равномерной плотностью потока излучения подтверждена экспериментально на образце оксида алюминия при температуре 1195 К.

**Ключевые слова:** излучательная способность, плотность потока излучения, мощность излучения, площадь излучающей поверхности.

**Коды OCIS:** 120.5630, 120.4640

---

Важной характеристикой материалов, участвующих в теплообмене излучением, является нормальная излучательная способность («нормальная» — в направлении, перпендикулярном излучающей поверхности) [1]. Эта характеристика определяется как отношение нормальной мощности теплового излучения (далее «мощность излучения») исследуемого материала к мощности излучения модели абсолютно черного тела (АЧТ), измеренных одним и тем же измерителем мощности при одинаковых температурах и размерах излучающих поверхностей. При этом полагается [2–7], что нормальные плотности потоков излучения (далее «плотность потока») исследуемого материала и модели АЧТ распределены равномерно по площади излучающей поверхности. Однако из-за конструктивных особенностей нагревателей исследуемого материала и модели АЧТ [8, 9] плотность потоков указанных излучающих поверхностей может быть распределена неравномерно.

Эти неравномерности могут приводить к дополнительной погрешности определения нормальной излучательной способности исследуемого материала. Возможным путем решения этой проблемы является измерение мощности излучения в центральной области поверхности, где исследуемый материал и модель АЧТ имеют равномерное распределение плотностей потоков теплового излучения, описываемое линейной зависимостью мощности излучения от площади излучающей поверхности [10].

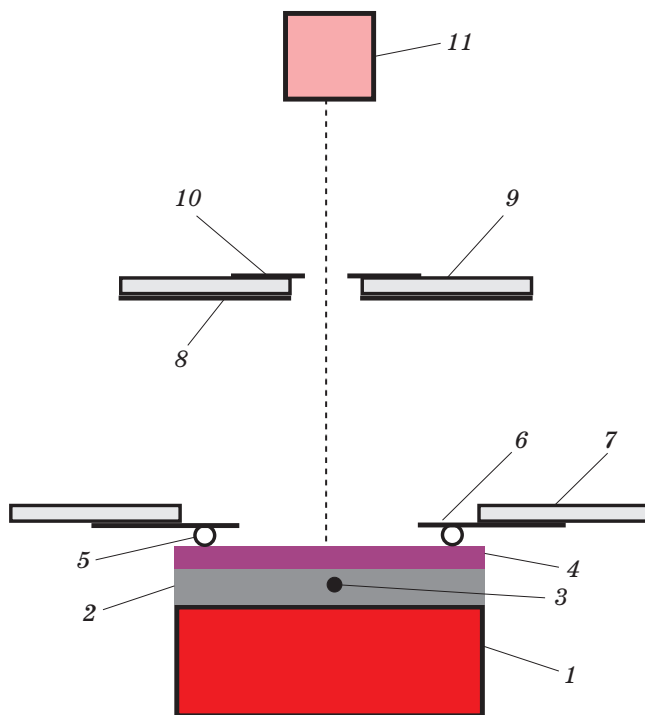
В настоящем исследовании полагается, что плотности потоков излучения распределены равномерно в центральной области поверхностей и неравномерно за пределами центральной области.

Возможность измерения мощности излучения поверхности с равномерным распределением потока теплового излучения в центральной области поверхности исследовалась экспериментально на образце оксида алюминия при температуре 1195 К.

Это исследование показало возможность измерения мощности излучения поверхности с равномерным распределением потока излучения по линейной зависимости мощности излучения от площади излучающей поверхности. На основании результатов этого исследования предложена методика измерения мощности излучения поверхности исследуемого материала и модели АЧТ.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Структурная схема экспериментальной установки для измерения мощности излучения образца из оксида алюминия представлена на рис. 1. В состав нагревателя установки входит нагревательный элемент, выполненный из проволоки Pt/Rh30, который установлен в обечайку из высокотемпературной керамики OXIDAL-1750 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 99,5% и  $\text{SiO}_2$  — 0,3%). Размер нагревательного элемента составляет  $30 \times 30$  мм. На нагреватель установлена подложка из двух никелевых пластин, между которыми вставлен королек хромель-алюмелевой термопары. На никелевую подложку помещается исследуемый образец квадратной формы со стороной 30 мм и толщиной 3 мм из оксида алюминия

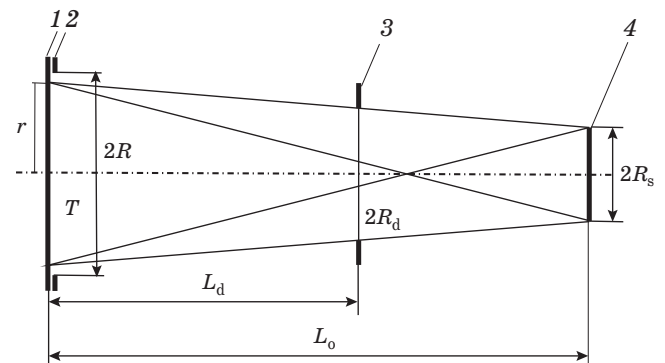


**Рис. 1.** Структурная схема экспериментальной установки для измерения мощности излучения. 1 — нагреватель, 2 — никелевая подложка, 3 — электроды хромель-алюмелевой термопары, 4 — исследуемый образец, 5 — соломка из оксида алюминия, 6 — экран, 7 — стальной фланец № 1 с водяным охлаждением, 8 — медная пластина с поглощающим покрытием, 9 — стальной фланец № 2, 10 — диафрагма, 11 — приемник теплового излучения.

( $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 99,8% и  $\text{MgO}$  — 0,2%). Размер излучающей поверхности образца ограничивается медным экраном со световым диаметром 30 мм. Экран размещен на стальном водоохлаждаемом фланце (№ 1). Между экраном и излучающей поверхностью исследуемого образца помещены соломки из оксида алюминия диаметром 1 мм. На расстоянии 115 мм от поверхности образца на стальном фланце (№ 2) с поглощающим покрытием установлена медная диафрагма. Чувствительная площадка приемника теплового излучения находится на расстоянии 320 мм от поверхности исследуемого образца. Приемник S302C теплового излучения с чувствительной площадкой диаметром 12 мм имеет спектральный интервал измерений 0,19–25 мкм и диапазон измерения мощности от  $10^2$  до  $2 \times 10^6$  мкВт.

На оптической схеме экспериментальной установки, приведенной на рис. 2, поверхность образца материала при температуре  $T$  ограничивается экраном радиусом  $R$ , кроме этого, она включает диафрагму с радиусом световой апертуры  $R_d$  и чувствительную площадку приемника теплового излучения радиусом  $R_s$ . В рассматриваемой схеме радиус  $R_s$ , расстояние  $L_d$  от поверхности образца до диафрагмы и расстояние  $L_o$  от поверхности образца до чувствительной площадки приемника являются фиксированными. При этом размер чувствительной площадки приемника существенно меньше расстояния до излучающей поверхности и виньетированием излучения можно пренебречь. Радиус световой апертуры диафрагмы может изменяться, при этом меняется и площадь поверхности, излучающей на чувствительную площадку приемника.

Из оптической схемы (рис. 2) следует, что радиус  $r$  поверхности, излучающей на чувствитель-



**Рис. 2.** Оптическая схема экспериментальной установки. 1 — образец материала при температуре  $T$ , 2 — экран, 3 — диафрагма, 4 — чувствительная площадка приемника теплового излучения,  $R$  — радиус световой апертуры экрана,  $r$  — радиус поверхности, излучающей на чувствительную площадку приемника 4,  $R_d$  — радиус световой апертуры диафрагмы 3,  $R_s$  — радиус чувствительной площадки 4,  $L_d$  и  $L_o$  — расстояния от поверхности образца до диафрагмы 3 и до чувствительной площадки 4 соответственно.

ную площадку приемника, описывается выражением

$$r = (R_d L_o - R_s L_d) / (L_o - L_d). \quad (1)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В экспериментах применялись сменные диафрагмы с диаметрами светового отверстия 7, 10, 12, 14,5, 17,5, 19,5, 22, 24,5 и 30 мм.

При исследовании образца оксида алюминия мощность излучения, падающего на чувствительную площадку приемника, измерялась с каждой сменной диафрагмой при температуре нагревателя 1195 К. При этом радиус излучающей поверхности рассчитывался по соотношению (1). На рис. 3 приведен график зависимости измеренной мощности  $P$  излучения от площади  $S$  излучающей поверхности  $S = \pi r^2$ .

В центральной области поверхности вплоть до значений, близких к  $S \approx 170 \text{ мм}^2$ , график, приведенный на рис. 3, хорошо аппроксимируется линейной зависимостью  $P = P_0 + aS$ , где  $P_0 = 492,31 \text{ мкВт}$  и  $a = 9,296 \text{ мкВт/мм}^2$ . При дальнейшем увеличении площади излучающей поверхности вплоть до  $707 \text{ мм}^2$  ( $2R \approx 30 \text{ мм}$ ) зависимость мощности излучения от площади излучающей поверхности становится существенно нелинейной, что связано с уменьшением температуры поверхности на периферии нагревателя. Некоторое увеличение мощности излучения при площади излучающей поверхности более  $707 \text{ мм}^2$  ( $2R > 30 \text{ мм}$ ) можно объяснить вкладом теплового излучения экрана в регистрируемую мощность излучения.

Таким образом, из графика, приведенного на рис. 3, следует, что экспериментальная зависимость мощности излучения оксида алюминия от площади излучающей поверхности хорошо аппроксимируется линейной зависимостью в цен-

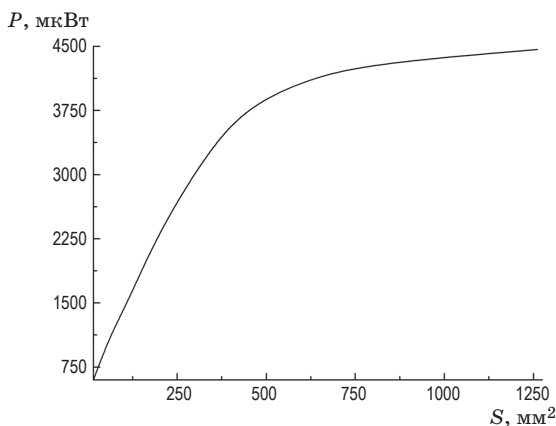


Рис. 3. Экспериментальная зависимость мощности  $P$  излучения от площади  $S$  поверхности, излучающей на чувствительную площадку приемника излучения.

тральной области поверхности вплоть до площади излучающей поверхности  $170 \text{ мм}^2$  ( $2r \approx 14,8 \text{ мм}$ ).

Этот результат позволяет полагать, что аналогичным образом может быть получена линейная зависимость мощности излучения модели АЧТ от площади излучающей поверхности при такой же температуре 1195 К. В этом случае мощности излучения, полученные при одинаковых площадях поверхностей исследуемого материала и модели АЧТ, можно использовать для определения излучательной способности исследуемого материала.

## МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ

На основании описанных выше результатов методики измерения мощности излучения поверхностей исследуемого материала и модели АЧТ для определения излучательной способности исследуемого материала при заданной температуре можно представить следующей последовательностью процедур:

1) экспериментальное определение зависимостей мощности излучения исследуемого материала и модели АЧТ от площади излучающих поверхностей,

2) выделение на экспериментальных зависимостях исследуемого материала и модели АЧТ участков линейной зависимости мощности излучения от площади излучающей поверхности,

3) определение значений мощности излучения, соответствующих одинаковым площадям поверхности исследуемого материала и модели АЧТ на выделенных линейных участках зависимостей мощности излучения от площади поверхности,

4) применение полученных значений для определения излучательной способности исследуемого материала при заданной температуре.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследована зависимость мощности излучения оксида алюминия от площади излучающей поверхности при температуре 1195 К. В центральной области поверхности площадью вплоть до  $170 \text{ мм}^2$  обнаружена линейная зависимость мощности излучения от площади излучающей поверхности, свидетельствующая о равномерной плотности потока излучения. Для определения излучательной способности исследуемого материала предложена методика измерения мощности излучения материала и модели абсолютно черного тела в области линейной зависимости мощности излучения от площади излучающих поверхностей.

Авторы благодарны В.В. Пилипенко и В.А. Моздыкову за помощь в подготовке экспериментальной установки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Спэрроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. Л.: Энергия, 1971. 294 с.
2. Hanssen L., Wilthan B., Monte C., et al. Report on the CCT supplementary comparison S1 of infrared spectral normal emittance/emissivity // Metrologia. 2016. V. 53 (Technical Suppl): 03001.
3. Campo L., Pérez-Sáez R.B., Esquisabel X., et al. New experimental device for infrared spectral directional emissivity measurements in a controlled environment // Rev. Sci. Instrum. 2006. V. 77. P. 113111.
4. Varaksin A.Yu., Romash M.E., Kopeitsev V.N. The possibility of generation of concentrated fire vortices without forced swirling // Doklady Physics. 2014. V. 59. № 5. P. 203–205.
5. Li L., Yu K., Zhang K., et al. Study of Ti-6Al-4V alloy spectral emissivity characteristics during thermal oxidation process // Int. J. Heat Mass Tran. 2016. V. 101. P. 699–706.
6. Liang H., Yang F., Wang G., et al. Study of the optical and absorption properties of micro–nanostructure on metal surfaces // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 2. С. 28–33.
7. Перцович Б.В., Живоносная А.С., Скворцов Д.М. Имитационное моделирование сигнатуры теплового объекта // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 4. С. 28–35.
8. Hanssen L., Mekhontsev S., Khromchenko V. Infrared spectral emissivity characterization facility at NIST // Proc. SPIE. 2004. V. 5405. P. 1–12.
9. Monte C., Hollandt J. The measurement of directional spectral emissivity in the temperature range from 80 °C to 500 °C at the Physikalisch-Technische Bundesanstalt // High Temperatures-High Pressures. 2010. V. 39. P. 151–164.
10. Излучательные свойства твердых материалов / Под ред. Шейндлина А.Е. М.: Энергия, 1974. 473 с.