

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

УДК: 536.3+536.42

**Аналитический метод оценки  
оптических коэффициентов  
полупрозрачной сферической частицы**

**С.Д. Слепцов, Н.А. Рубцов**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: sleptsov@itp.nsc.ru

Рассматривается анализ оптических свойств (поглощательная, пропускательная и отражательная способности) сферической частицы для случая, когда ее диаметр много больше длины волны монохроматического излучения. Для этого используется ранее полученное решение интегрального уравнения монохроматического излучения и показано согласование расчетов с экспериментальными данными, полученными для лейкосапфира.

**Ключевые слова:** сферическая частица, лейкосапфир, поглощательная способность, пропускательная способность, отражательная способность, коэффициент поглощения.

Оптические свойства (излучательная, пропускательная, отражательная способности) однородных по составу полупрозрачных сферических частиц определяются обычно с привлечением теории Ми [1–3]. В то же время существуют работы, в которых определение оптических свойств связано с привлечением теории переноса излучения, использующей приближение геометрической оптики [4, 5]. Ниже представлен анализ оптических свойств сферических частиц на основе исследований теплового излучения осесимметричных систем, выполненных в работах [5, 6], а также проведено оценочное сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными [7–9] применительно к монокристаллической модификации оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) — лейкосапфиру.

Так же, как и в работе [5], полагается, что диаметр сферической частицы много больше длины волны монохроматического излучения (параметр дифракции  $x > 200$ ), показатель поглощения материала частицы  $\chi$  много меньше показателя преломления  $n$  в комплексном показателе преломления  $m = n - i\chi$ . Предполагается, что внутренняя и внешняя поверхности полупрозрачной сферической частицы диффузно излучают и отражают.

В работах [5] и [6] из интегральных уравнений, записанных относительно плотности потока полусферического результирующего излучения ( $E_{res}$ ), в исходной и разрешающей (резольвентной) формах в отсутствие рассеяния были получены данные по поглощательной ( $A^*$ ), отражательной ( $R^*$ ) и пропускательной ( $D^*$ ) способностям осесимметричных систем, материал которых обладает коэффициентом поглощения  $\alpha$  и показателем преломления  $n$ :

$$A^* = (1 - R)n^2(1 - d)/(1 - Rd), \quad (1)$$

$$D^* = (1-R)^2 n^2 d / (1-R^2 d^2), \quad (2)$$

$$R^* = 1 - (1-R)n^2 + R(1-R)^2 n^2 d^2 / (1-R^2 d^2), \quad (3)$$

где  $d = d(\alpha \cdot L)$ ,  $L$  — характерный размер системы. Уравнения (1)–(3) отвечают балансовому соотношению  $A^* + D^* + R^* = 1$ . В случае сферы [5]

$$d = \frac{1}{2h_0^2} \left[ 1 - (1 + 2h_0) e^{-2h_0} \right], \quad (4)$$

где  $h_0 = \alpha \rho_s$  — оптическая толщина сферы.

В работе [7] были приведены зависимости спектральных коэффициентов поглощения расплавленной окиси алюминия от температуры с хорошей точностью аппроксимации четвертого порядка при двух значениях длин волн в диапазоне температур  $T \in [2300-2700]$  К:

$$\begin{aligned} \alpha|_{\lambda=0,63 \text{ мкм}} &= 1,3357 \cdot 10^5 - 1,92161 \cdot 10^2 \cdot T + 0,102913 \cdot T^2 - \\ &- 0,243572 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 0,216378 \cdot 10^{-8} \cdot T^4, \text{ см}^{-1}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \alpha|_{\lambda=1,15 \text{ мкм}} &= 1,09011 \cdot 10^4 - 16,3827 \cdot T + 0,893919 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 - \\ &- 0,211960 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 0,199224 \cdot 10^{-9} \cdot T^4, \text{ см}^{-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

График зависимости  $\alpha_\lambda(T)$  от температуры представлен на рис. 1.

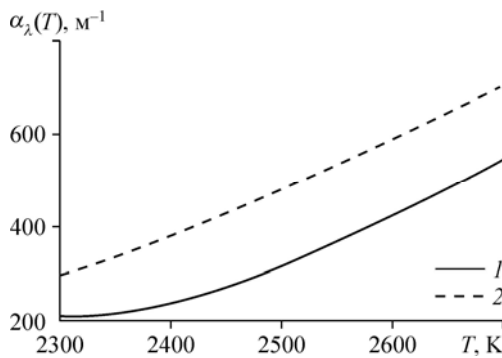
Формулы (1)–(3) справедливы в рамках применимости оптического инварианта  $n^2(1-R) = n_0^2(1-R_0)$  [4], где  $R$  — коэффициент отражения внутренней стороны,  $R_0$  — коэффициент отражения внешней стороны,  $n_0$  — показатель преломления среды, в которой находится сферическая частица. Для учета влияния вогнутости система уравнений (1)–(3) дополняется аналогичным обобщенным оптическим инвариантом, предложенным в работе [5], и записывается в виде

$$(1 - R_{\text{ef}}) n^2 = (1 - R^*) n_0^2, \quad (7)$$

здесь  $R_{\text{ef}}$  — эффективное значение полусферического коэффициента отражения на внутренней, вогнутой поверхности.

Таким образом, вычисление оптических свойств рассматриваемых осесимметричных систем осуществляется в следующем порядке ( $n_0 = 1$ ):

— для заданного значения  $n/n_0 = n$  по формуле Уолша–Данкла [2] вычисляется  $R_0$ :



$$\begin{aligned} R_0 &= \frac{1}{2} + \frac{(n-1)(3n+1)}{6(n+1)^2} - \frac{2n^3(n^2+2n-1)}{(n^2+1)(n^4-1)} + \\ &+ \frac{8n^4(n^4+1)}{(n^2+1)(n^4-1)^2} \ln(n) + \frac{n^2(n^2-1)^2}{(n^2+1)^3} \ln \frac{n-1}{n+1}; \end{aligned}$$

Рис. 1. Зависимость  $\alpha_\lambda(T)$  лейкосапфира от температуры.  
 $\lambda = 0,63$  (1), 1,15 (2) мкм.

- с помощью оптического инварианта  $n^2(1-R) = n_0^2(1-R_0)$  определяется значение коэффициентов отражения  $R$  на внутренней поверхности системы;
- по формулам (1)–(3) с учетом (4)–(6) для вычисленного  $d$  для рассматриваемой конфигурации рассчитываются значения  $A^*$ ,  $D^*$ ,  $R^*$  в первом приближении;
- по найденному значению  $R^*$  с помощью (7) вычисляется эффективное значение коэффициента отражения  $R_{\text{ef}}$  на внутренней поверхности системы;
- по формулам (1)–(3), в которых  $R$  заменяется на  $R_{\text{ef}}$ , вычисляются уточненные значения  $A^*$ ,  $D^*$ ,  $R^*$ ;
- полученный результат сравнивается с экспериментальными данными, полученными в работах [8, 9].

Ниже представлен анализ результатов численного расчета оптических свойств лейкосапфира при разных значениях температур и радиусов сфер частиц, выполненный с применением выражений (5), (6), приводится сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

На рис. 2 представлены графики зависимостей поглотительной, отражательной и пропускательной способностей  $\text{Al}_2\text{O}_3$  от температуры при фиксированном радиусе частицы —  $\rho_s = 1$  мкм и коэффициенте преломления  $n = 1,7$ . Поглотительная способность с повышением температуры растет монотонно, при длине волны  $\lambda = 0,63$  мкм рост носит нелинейный характер, при  $\lambda = 1,15$  мкм зависимость от температуры становится линейной. Отражательная и пропускательная способности лейкосапфира с повышением температуры падают. При  $\lambda = 0,63$  мкм коэффициент отражения снижается почти 2 раза, при  $\lambda = 1,15$  мкм темп его снижения не столь высокий. Пропускательная способность лейкосапфира меняется слабо.

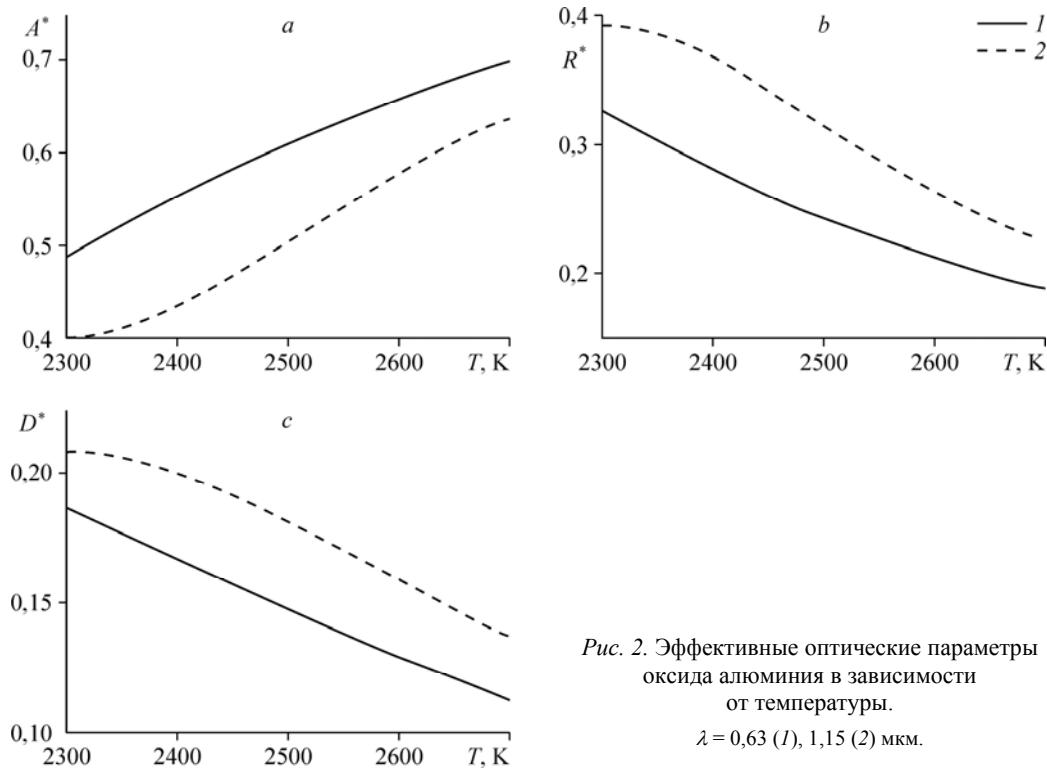


Рис. 2. Эффективные оптические параметры оксида алюминия в зависимости от температуры.  
 $\lambda = 0,63$  (1), 1,15 (2) мкм.

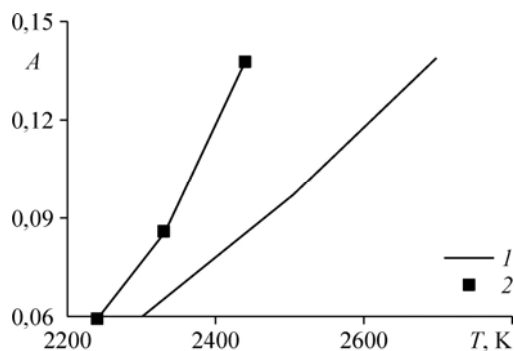


Рис. 3. Сравнение результатов расчетов и экспериментальных данных поглощательной способности оксида алюминия от температуры.

1 — расчет, 2 — данные работ [8, 9].

На рис. 3 представлено сравнение поглощательной способности лейкосапфира, рассчитанной по формуле (1) с учетом (6), и экспериментальных данных, полученных в работах [8, 9]. Эксперимент проводился в потоке частиц при длине

волны  $\lambda = 1,0$  мкм, радиусе частиц  $\rho_s = 55$  мкм, коэффициенте преломления  $n = 1,7$ , параметре дифракции  $x = 345$ ; температурный диапазон охватывает  $T \in [2240 - 2440]$  К и, в целом, совпадает с диапазоном температур численного расчета.

Сравнительный анализ показывает, что поглощательная способность лейкосапфира, полученная экспериментально, согласуется с расчетным диапазоном, но характер линий заметно отличается: экспериментальная линия имеет крутой вид, тогда как расчетная линия выглядит более пологой. Более или менее близкие значения получаются при малых значениях температуры и коэффициента поглощения, затем значения расходятся существенно. Это можно объяснить как несовпадением длин волн, а также пренебрежением рассеянием в расчетах, так и самим характером проведения эксперимента, где измерения проводились в потоке частиц  $Al_2O_3$ .

Полученные в работе формулы для вычисления оптических параметров частиц со сферической осевой симметрией дают качественное согласование с экспериментальными данными и могут быть рекомендованы для оценочных расчетов.

### Список литературы

1. Рубцов Н.А. Тепловое излучение в сплошных средах. Новосибирск: Наука, 1984. 277 с.
2. Описик М.Н. Сложный теплообмен М.: Мир, 1976. 616 с.
3. Русин С.П. Об использовании приближения больших частиц для определения радиационных характеристик дисперсных систем кокса и летучей золы // Изв. СО РАН. Сибир. физико-техн. журнал. 1993. № 1. С. 85–92.
4. Домбровский Л.А. Тепловое излучение сферической частицы из полупрозрачного материала // Теплофизика высоких температур. 1999. Т. 37, № 3. С. 284–293.
5. Рубцов Н.А. Тепловое излучение осесимметричных полупрозрачных систем // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 2. С. 313–323.
6. Рубцов Н.А., Слепцов С.Д. Анализ свойств теплового излучения осесимметричных полупрозрачных систем с проницаемыми границами // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 4. С. 711–715
7. Шигапов А.Б. Оптические свойства окиси алюминия при высоких температурах // Теплофизика высоких температур. 1998. Т. 36, № 1. С. 39–43
8. Рубцов Н.А., Емельянов А.А. Экспериментальное исследование оптических свойств потока частиц окиси алюминия при высоких температурах // Препринт 25-78. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 1978. 39 с.
9. Рубцов Н.А., Аверков Е.И., Емельянов А.А. Свойства теплового излучения материалов в конденсированном состоянии. Новосибирск: Изд-во ИТ СО РАН, 1988. 350 с.

Статья поступила в редакцию 26 июня 2017 г.,  
после доработки — 23 августа 2017 г.