



УДК 621.4:535.2

ПОЛИФАЗНОСТЬ И ПОЛИДИСПЕРСНОСТЬ ЧАСТИЦ ПРИ РАСЧЕТАХ РАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Кузьмин Владимир Алексеевич

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник,
кафедра инженерной физики
Вятский государственный университет, г. Киров
e-mail: kuzmin@vyatsu.ru

Заграй Ираида Александровна

кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
кафедра инженерной физики
Вятский государственный университет, г. Киров
e-mail: zagrayia@yandex.ru

Шмакова Наталья Александровна

старший преподаватель,
кафедра систем автоматизации управления
Вятский государственный университет, г. Киров
e-mail: shmakova.natalya@mail.ru

Аннотация

В работе предложен метод расчета радиационных характеристик единичного объема (коэффициентов ослабления, поглощения и рассеяния) системы пылевых частиц на примере котла КС-450-ВТКУ. Данный подход применим при отсутствии исходных данных по оптическим константам n_1 и n_2 полифазных частиц, образующих дисперсную систему. В результате замены полидисперсной системы полифазных частиц совокупностью монодисперсных систем, состоящих из нескольких видов однофазных частиц, у радиационных характеристик появляются осцилляции. Метод дает наименьшую ошибку (в пределах одного порядка) при нахождении коэффициентов ослабления и рассеяния.

Ключевые слова: радиационные характеристики, оптические свойства, дисперсность частиц, полифазность, продукты сгорания, энергетическая установка.

**POLYPHASE AND POLYDISPERSITY OF PARTICLES
IN CALCULATING OF RADIATION CHARACTERISTICS OF
COMBUSTION PRODUCTS EMITTED BY ENERGY INSTALLATIONS**

Vladimir A. Kuzmin

ORCID: 0000-0001-9979-4610

Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher,

Department of Engineering Physics

Vyatka State University, Kirov, Russia

e-mail: kuzmin@vyatsu.ru

Iraida A. Zagrai

ORCID: 0000-0002-8886-8677

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,

Department of Engineering Physics

Vyatka State University, Kirov, Russia

e-mail: zagrayia@yandex.ru

Natalia A. Shmakova

ORCID: 0000-0002-7718-7681

Senior Lecturer

Department of automation and telecontrol

Vyatka State University, Kirov, Russia

e-mail: shmakova.natalya@mail.ru

ABSTRACT

The paper presents the method for calculating the radiation characteristics of a unit volume (attenuation, absorption and scattering coefficients) of a system of dust particles on the example of the boiler KS-450-VTKU. This approach is applicable in the absence of initial data on optical constants n_1 and n_2 of polyphase particles forming a disperse system. The replacement of a polydisperse system of polyphase particles with a set of monodisperse systems consisting of several types of single-phase particles leads to the appearance of oscillations in radiation characteristics. The method gives the smallest error (within one order) in finding the attenuation and scattering coefficients.

Keywords: radiation characteristics, optical properties, dispersivity of particles, polyphase, combustion products, energy installation.

Введение.

Одним из основных видов теплообмена в двигателях и энергетических установках различного назначения является теплообмен излучением [1]. В общем случае тепловое излучение продуктов сгорания (ПС) определяется радиационными характеристиками частиц конденсата и газовой фазы, характеристиками излучающего объема и ограничивающих поверхностей. В свою очередь радиационные характеристики конденсата определяются оптическими свойствами материала частиц, их размерами и дисперсностью [2].

В данной работе проведено исследование полифазности и полидисперсности частиц для расчета радиационных характеристик единичного объема (коэффициентов ослабления, поглощения и рассеяния) системы пылевых частиц на примере котла КС-450-ВТКУ.

Методика исследования

Оптические константы (показатель преломления n_1 и показатель поглощения n_2) зависят от природы вещества и его состояния, температуры и длины волны. В работе [3] для спектрального диапазона 2,5–14,3 мкм при температуре 290 К методом Шимона экспериментально определены оптические постоянные вещества пылевых частиц, имеющих состав: Fe = 42,7 %, SiO₂ = 23,3 %, S = 3,6 %, Al₂O₃ = 3,5 %, Zn = 0,8 %, Cu = 0,4 %. Частицы получены из газохода котла КС-450-ВТКУ (обжиг серного колчедана, Череповецкий комбинат «Аммофос»). Значения n_1 находятся в пределах от 1,001 до 1,134, а значения n_2 в пределах от 0,325 до 0,550 (рис. 1).

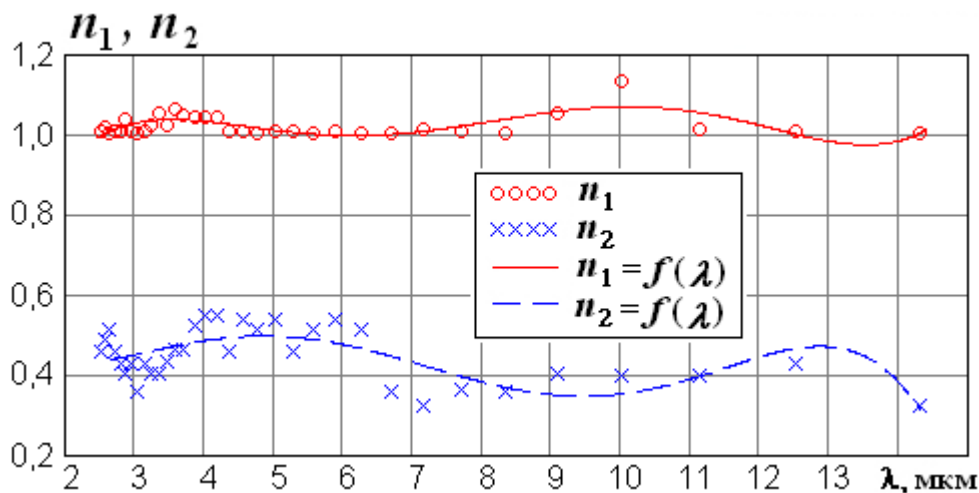


Рисунок 1. Оптические константы пылевых частиц котла КС-450-ВТКУ

Частицы конденсата ПС в общем случае представляют полидисперсную систему, которая описывается функцией распределения $f(r)$. По результатам дисперсного анализа [3] для указанной системы частиц функция представляет собой логарифмически-нормальное распределение:

$$f(r) = \frac{1}{r \ln \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln r - \ln r_n)^2}{2(\ln \sigma)^2}}, \quad (1)$$

где r_n – медианный радиус (8,5 мкм); σ – среднеквадратичное отклонение (1,541). Для исследования радиационных характеристик полидисперсной системы пылевых частиц в основу была положена теория рассеяния Г. Ми о дифракции электромагнитных волн на

частицах, имеющих сферическую форму. Радиационные характеристики единичного объема (коэффициенты ослабления κ , поглощения α и рассеяния β) для полидисперсной системы сферических частиц рассчитывались по формулам [2]:

$$\kappa = N \int_0^{\infty} \pi r^2 K_{\text{осл}} f(r) dr; \quad \alpha = N \int_0^{\infty} \pi r^2 K_{\text{погл}} f(r) dr; \quad \beta = N \int_0^{\infty} \pi r^2 K_{\text{рас}} f(r) dr \quad (2)$$

где $K_{\text{осл}}$, $K_{\text{погл}}$, $K_{\text{рас}}$ – безразмерные коэффициенты ослабления, поглощения и рассеяния, определяемые величинами n_1 , n_2 и $\rho = 2\pi r/\lambda$). Числовая концентрация частиц находится из соотношения:

$$N = \frac{3C_m}{4\pi\rho_{\text{ч}} \int_0^{\infty} r^3 f(r) dr}, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{ч}}$ – плотность вещества частиц ($\rho_{\text{ч}} = 3,8$ г/см³ [3]); C_m – массовая концентрация ($C_m = 300$ г/м³ [3]).

Результаты расчета радиационных характеристик для полидисперсной системы частиц подтверждают результаты работы [3]. В интервале длин волн от 2,5 до 14,3 мкм отклонение рассчитанных характеристик от данных работы [3] составляет: для κ не более 5 %, для α не более 3 %, для β не более 7,5 %.

В большинстве случаев из-за больших экспериментальных и расчетных трудностей установления функции распределения нередко приходится ограничиваться определением средних размеров частиц. Величина эквивалентного радиуса частиц находится из детального анализа исследуемого явления. Величина среднемассового радиуса определяется из формулы:

$$r_{43} = \frac{\int_0^{\infty} r^4 f(r) dr}{\int_0^{\infty} r^3 f(r) dr}. \quad (4)$$

Здесь r_{43} для указанной системы частиц составляет 16,355 мкм.

В настоящей работе предлагается метод замены исходной системы полифазных частиц (Fe-SiO₂-S-Al₂O₃-Zn-Cu) с эквивалентным радиусом r_{43} на совокупность монодисперсных систем, имеющих одинаковый состав (однофазные частицы) в пределах каждой системы. При этом радиус однофазной частицы находится из формулы:

$$r_i = r_{43} \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_i} X_i}, \quad (5)$$

где ρ_i – плотность вещества однофазной частицы; X_i – массовая доля; $\rho_{\text{ч}}$ – плотность вещества полифазной частицы ($\rho_{\text{ч}} = \sum_i^6 X_i \cdot \rho_i = 4,3$ г/см³). При этом массовая концентрация полученных однофазных частиц составляет:

$$C_{mi} = X_i \cdot C_m. \quad (6)$$

В этом случае, радиационные характеристики монодисперсных систем однофазных частиц рассчитываются по формулам:

$$\kappa_i = N \cdot \pi r_i^2 K_{\text{осл}}; \quad \alpha_i = N \cdot \pi r_i^2 K_{\text{погл}}; \quad \beta_i = N \cdot \pi r_i^2 K_{\text{рас}}. \quad (7)$$

В таблице приводятся исходные данные для расчета радиационных характеристик однофазных систем частиц. Дисперсия оптических констант для веществ, составляющих однофазные частицы, представлена на рисунке 2.

Таблица. Исходные данные для расчета радиационных характеристик

Вещество	Fe	SiO ₂	S	Al ₂ O ₃	Zn	Cu
Состояние вещества	Поликристаллическое	Аморфное (стекло)	Кристаллическое (α -S)	Поликристаллическое	Поликристаллическое	Поликристаллическое
Оптические свойства	[5, 7-9]	[4]	[6]	[2]	[10]	[4, 7-9]
Плотность ρ , г/см ³	7,87 [8]	2,2 [8]	2,07 [6]	3,93 [2]	7,14 [8]	8,96 [8]
Радиус частиц r , мкм	10,068	12,583	6,891	5,513	2,762	2,033
Массовая доля X	0,427	0,233	0,036	0,035	0,008	0,004
Массовая концентрация C_m , г/м ³	128,1	69,9	10,8	10,5	2,4	1,2

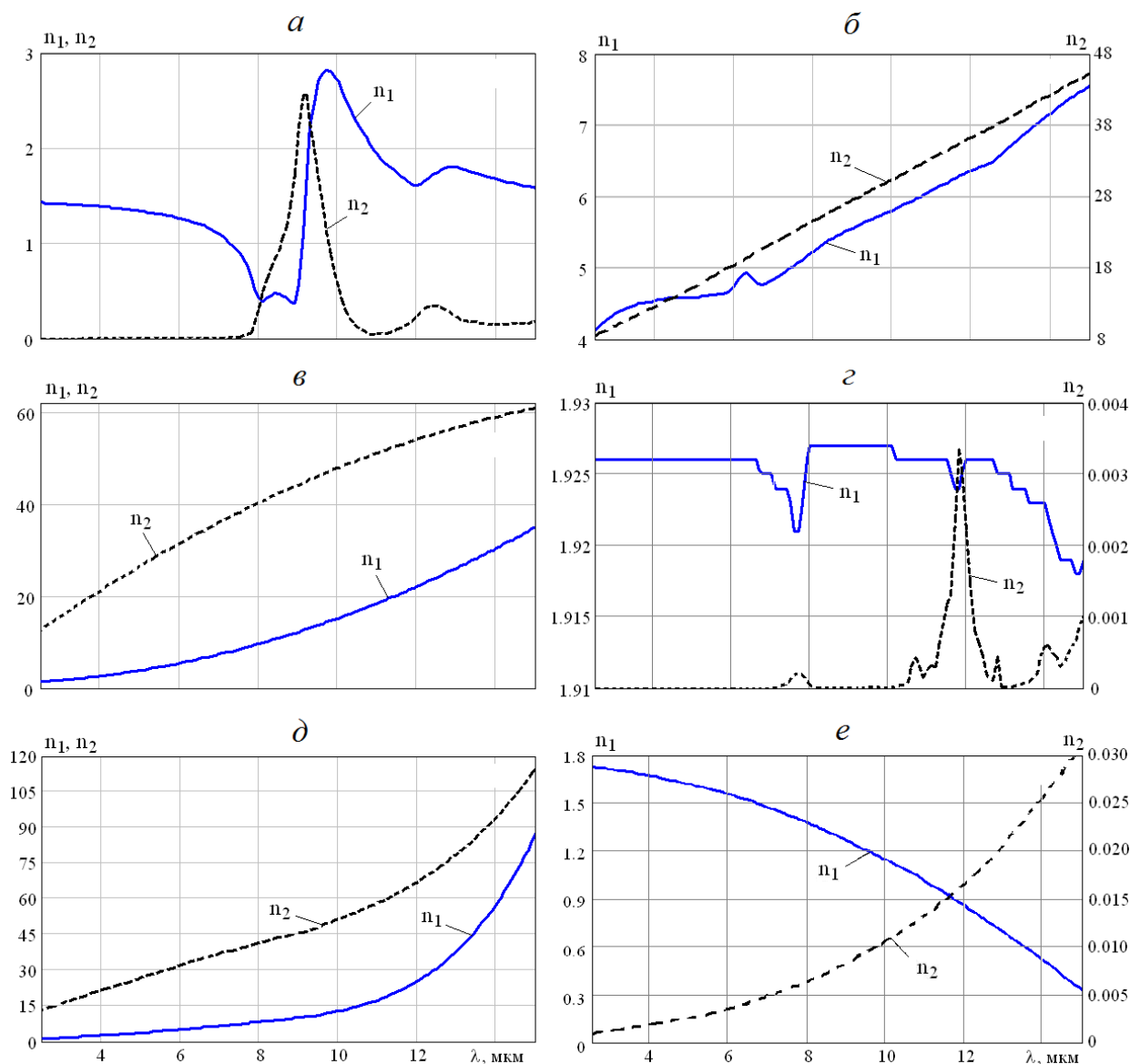


Рисунок 2. Оптические константы веществ:

a – SiO₂, б – Fe, в – Zn, г – S, д – Cu, е – Al₂O₃

Переход от радиационных характеристик единичного объема однофазных частиц к суммарным радиационным характеристикам, описывающим монодисперсную полифазную систему, осуществлялся по формулам:

$$\kappa_{\Sigma} = \sum_{i=1}^6 \kappa_i, \quad \alpha_{\Sigma} = \sum_{i=1}^6 \alpha_i, \quad \beta_{\Sigma} = \sum_{i=1}^6 \beta_i. \quad (8)$$

Результаты и их обсуждение

На рисунке 3 приводятся результаты расчета суммарных радиационных характеристик (коэффициентов κ_{Σ} , α_{Σ} , β_{Σ}), а также радиационных характеристик (коэффициентов κ , α , β), полученных для полидисперсных систем частиц.

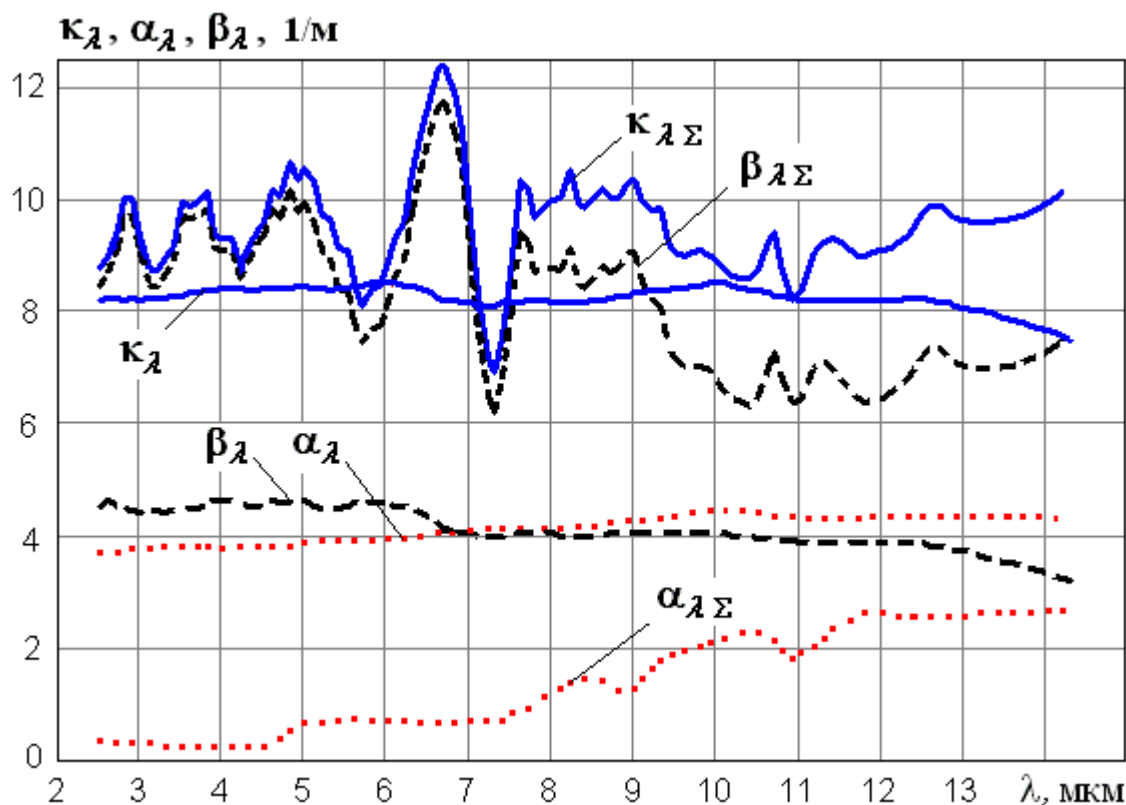


Рисунок 3. Радиационные характеристики частиц единичного объема

Замена полидисперсной системы полифазных частиц эквивалентной системой, состоящей из шести видов однофазных частиц приводит к появлению вторичных осцилляций у радиационных характеристик. Отклонение суммарного коэффициента ослабления κ_{Σ} от коэффициента κ для полидисперсной системы достигает: в интервале длин волн 2,5–6,3 мкм от 0,3 до 26,9 %; в интервале 6,4–6,9 мкм от 33,2 до 48,8 %; в интервале 7,0–13,9 мкм от 1,9 до 29,6 %; в интервале 14–14,3 мкм от 31,3 до 39%. Отличие коэффициента поглощения α_{Σ} от α составляет от 10 до 18 раз в интервале 2,5–4,7 мкм и от 1,6 до 7,9 раз в интервале 4,8–14,3 мкм. При этом отличие коэффициента рассеяния β_{Σ} от β в интервале длин волн от 2,5 до 14,3 мкм составляет 1,5–2,8 раза.

Предложенный метод определения радиационных характеристик может быть применен при отсутствии исходных данных по оптическим константам n_1 и n_2 полифазных частиц, образующих дисперсную систему. Метод дает наименьшую ошибку (в пределах одного порядка) при нахождении коэффициентов ослабления и рассеяния.

Заключение

Таким образом, было проведено исследование полифазности и полидисперсности частиц для расчета радиационных характеристик единичного объема продуктов сгорания. Представленный метод расчета радиационных характеристик полидисперсной системы полифазных частиц (путем замены на эквивалентную систему) дает удовлетворительные результаты при нахождении коэффициента ослабления. Для коэффициентов поглощения и рассеяния данный метод расчета может использоваться только качественно с учетом спектральных диапазонов.

Список литературы.

1. Howell J.R., Menguc M.P., Siegel R. Thermal Radiation Heat Transfer. 6th ed. USA, Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2016.
2. Кузьмин В.А., Заграй И.А. Радиационные характеристики дисперсных систем энергетических установок. Германия: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2013. 140 с.
3. Таймаров М.А., Ахметова Р.В., Лавирко Ю.В. Исследование излучательной способности конструкционных материалов и рабочих сред, применяемых в энергетике. Казань: Бриг, 2016. 180 с.
4. Palik E.D. Handbook of Optical Constants of Solids. Academic Press, New York. (ed.), 1985.
5. Palik E.D. Handbook of Optical Constants of Solids II. Academic Press, New York (ed.), 1991.
6. Palik E.D. Handbook of Optical Constants of Solids III. Academic Press, New York (ed.), 1998.
7. Ordal M.A., Bell R.J., Alexander R.W., Long L.L., Querry M.R. Optical properties of fourteen metals in the infrared and far infrared: Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Mo, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, V, and W. Appl. Optics. 1985. Vol. 24, No. 2. P. 4493–4499.
8. Weber M.J. Handbook of Optical Materials. Boca Raton: CRC Press, 2003.
9. Lide D.R. Handbook of Chemistry and Physics (86th ed.). Boca Raton (FL): CRC Press, 2004.
10. Мотулевич Г.П. Оптические свойства поливалентных непереходных металлов. Успехи физических наук. 1969. Т. 97, вып.2. С. 211–255.

References.

1. Howell J.R., Menguc M.P., Siegel R. Thermal Radiation Heat Transfer. 6th ed. USA, Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2016.
2. Kuzmin V.A., Zagray I.A. Radiation characteristics of disperse systems of energy installations, LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, Germany. 2013. 140 p. [in Russian].
3. Taimarov M.A., Akhmetova R.V., Lavirko Yu.V. Investigation of the emissivity of structural materials and working media used in energy industry. Brig, Kazan. 2016. 180 p. [in Russian].
4. Palik E.D. Handbook of Optical Constants of Solids. Academic Press, New York. (ed.), 1985.
5. Palik E.D. Handbook of Optical Constants of Solids II. Academic Press, New York (ed.), 1991.
6. Palik E.D. Handbook of Optical Constants of Solids III. Academic Press, New York (ed.), 1998.
7. Ordal M.A., Bell R.J., Alexander R.W., Long L.L., Querry M.R. Optical properties of fourteen metals in the infrared and far infrared: Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Mo, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, V, and W. Appl. Optics. 1985. Vol. 24, No. 2. P. 4493–4499.
8. Weber M.J. Handbook of Optical Materials. Boca Raton: CRC Press, 2003.
9. Lide D.R. Handbook of Chemistry and Physics (86th ed.). Boca Raton (FL): CRC Press, 2004.
10. Motulevich G.P. Optical properties of polyvalent non-transition metals. Sov. Phys. Usp. 1969. No.12. P. 80–104.