

УДК 621.4:535.2

**РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ
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 приведены данные по радиационным характеристикам частиц пылевых потоков для шести энергетических установок. Коэффициенты ослабления, поглощения и рассеяния были найдены при использовании теории Ми для полидисперсных систем частиц в диапазоне длин волн 2,5 – 11 мкм. Для расчетов использовались экспериментальные данные по оптическим константам веществ пылевых частиц, представленные в виде полиномов в зависимости от длины волны.

Ключевые слова: радиационные характеристики, оптические свойства, функция распределение частиц по размерам, энергетическая установка.

RADIATION CHARACTERISTICS OF DUST PARTICLES 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 data on radiation characteristics of dust flow particles for six energy installations. The coefficients of attenuation, absorption and scattering were found using the Mi theory for polydisperse particle systems in the wavelength range of 2.5 – 11 microns. Experimental data on optical constants of dust particle substances, presented as polynomials depending on the wavelength, were used for calculations.

Keywords: radiation characteristics, optical properties, particle size distribution function, energy installation.

Введение.

Основным направлением научно-технического прогресса в промышленности является рациональное использование энергоресурсов. Это приводит к необходимости более эффективного сжигания топлива, а также вовлечения в топливно-энергетический баланс вторичных энергоресурсов. В связи с этим возрастают требования к точности расчета теплообмена внутри действующих энергоустановок, в которых протекают различные технологические процессы.

Компьютерное моделирование радиационных характеристик гетерогенных продуктов сгорания представляет практический интерес для решения задач теплового излучения в различных энергоустановках, где доля лучистого теплообмена достаточно высока [1–3]. Потребность в создании новых программных средств возрастает в связи с необходимостью прогнозирования характеристик тепловых агрегатов, установления контроля за режимами их работы, планирования и оптимизации экспериментов.

В данной работе использовались данные [4, 5] о системах пылевых частиц для шести энергетических установок (ЭУ), работающих в различных отраслях промышленности. Информация об установках, химическом составе образцов, плотности частиц $\rho_{\text{ч}}$ и массовой концентрации C_m находится в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики энергетических установок и исследуемых образцов

ЭУ (место отбора пробы)	Процесс, место расположения ЭУ	Химический состав образца, % (по массе)	$\rho_{\text{ч}}$, г/см ³	C_m , г/м ³
ОКГ-100-3Б (конвективная часть)	Конверторное производство, Челябинский металлургический завод	Fe ₂ O ₃ = 73,2, CaO = 8,5, FeO = 7,2, SiO ₂ = 2,3, MnO = 0,9, ZnO = 1,5	3,9	150
БКЗ-210-140Ф (циклон)	Сжигание Кузнецкого угля, Казанская ТЭЦ-2	SiO ₂ = 58, Al ₂ O ₃ = 20, Fe ₂ O ₃ = 10, CaO = 4, FeO = 3, MgO = 2, K ₂ O = 1, Na ₂ O = 1	3,6	20
РКЖ 25-40 (бункер)	Медеплавильное производство, Балхашский горнометаллургический комбинат	Fe = 30, Cu = 20, S = 15, SiO ₂ = 10, Pb = 5, Zn = 5, As = 4, C = 2	3,6	150
КС-450-ВТКУ (газоход)	Обжиг серного колчедана, Череповецкий комбинат «Аммофос»	Fe = 42,7, SiO ₂ = 23,3, S = 3,6, Al ₂ O ₃ = 3,5, Zn = 0,8, Cu = 0,4	3,8	300
КУ-125 (экономайзер)	Мартеновское производство, Нижне-Тагильский металлургический комбинат	Fe ₂ O ₃ = 75,3, MgO = 6,3, CaO = 6,0, FeO = 1,8, SiO ₂ = 1,3, MnO = 0,9, ZnO = 3,8	3,6	50
УККС-6/40 (ширмы)	Обжиг цинкового концентрата, Лениногорский полиметаллический комбинат	ZnO = 30,4, CuO = 11,9, Fe ₂ O ₃ = 4,2, FeO = 2,3, PbO = 2,3, SiO ₂ = 1,9	4,96	300

1. Оптические константы

Все радиационные характеристики частиц могут быть определены в зависимости от двух основных параметров: параметра дифракции $\rho = 2\pi r / \lambda$ и комплексного показателя преломления $m = n_1 - n_2 i$, определяющего оптические свойства вещества частиц конденсата. Действительная часть n_1 (показатель преломления) определяет скорость распространения излучения в среде. Мнимая часть n_2 (показатель поглощения) характеризует затухание

амплитуды электромагнитных колебаний в веществе, обусловленное поглощением [3]. В работе использованы данные по оптическим свойствам веществ конденсированной фазы при температуре 290 К, полученные в результате исследований [4, 5]. Для определения оптических констант применен метод Шимона, основанный на измерении коэффициентов зеркального отражения поляризованного излучения при двух углах падения луча на поверхность исследуемого образца. Дисперсия n_1 и n_2 была представлена аналитически в виде полиномов пятой степени в зависимости от длины волны. Результаты аппроксимации для n_1 и n_2 находятся в таблицах 2, 3. На рисунке 1 представлены экспериментальные зависимости коэффициентов n_1 и n_2 в области длин волн $\lambda = 2,5\text{--}11$ мкм и их описание полиномами.

Таблица 2. Аналитическое представление n_1

ЭУ	$n_1(\lambda) = A_0 + A_1 \cdot \lambda + A_2 \cdot \lambda^2 + A_3 \cdot \lambda^3 + A_4 \cdot \lambda^4 + A_5 \cdot \lambda^5$					
	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
ОКГ-100-3Б	- 2,0789	2,8860	- 1,0046	0,16253	- 0,012178	3,4196E-4
БКЗ-210-140Ф	1,2746	- 0,067583	0,043844	- 9,6658E-3	8,2836E-4	- 2,4344E-5
РКЖ 25-40	4,4910E-3	0,93217	- 0,28369	0,039722	- 2,5544E-3	6,1183E-5
КС-450 ВТКУ	- 1,7941E-3	0,87267	- 0,26997	0,037968	- 2,4523E-3	5,8949E-5
КУ-125	-5,0838	5,5618	- 1,8373	0,28286	- 0,020211	5,4121E-4
УККС-6/40	- 4,6024	4,5079	- 1,2792	0,17159	- 0,010878	2,6118E-4

Таблица 3. Аналитическое представление n_2

ЭУ	$n_2(\lambda) = A_0 + A_1 \cdot \lambda + A_2 \cdot \lambda^2 + A_3 \cdot \lambda^3 + A_4 \cdot \lambda^4 + A_5 \cdot \lambda^5$					
	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
ОКГ-100-3Б	4,2880	- 3,0850	0,95883	- 0,13883	9,3701E-3	- 2,3773E-4
БКЗ-210-140Ф	0,14147	0,090245	- 0,021931	3,0828E-3	- 2,1675E-4	5,7211E-6
РКЖ 25-40	0,9645	- 0,42834	0,1657	- 0,028005	2,0655E-3	- 5,4790E-5
КС-450 ВТКУ	0,71756	- 0,38073	0,16959	- 0,030649	2,3613E-3	- 6,4813E-5
КУ-125	- 2,9851	3,2638	- 1,0386	0,16214	- 0,01239	3,6828E-4
УККС-6/40	6,0938	- 4,7865	1,4922	- 0,21735	0,014818	- 3,7886E-4

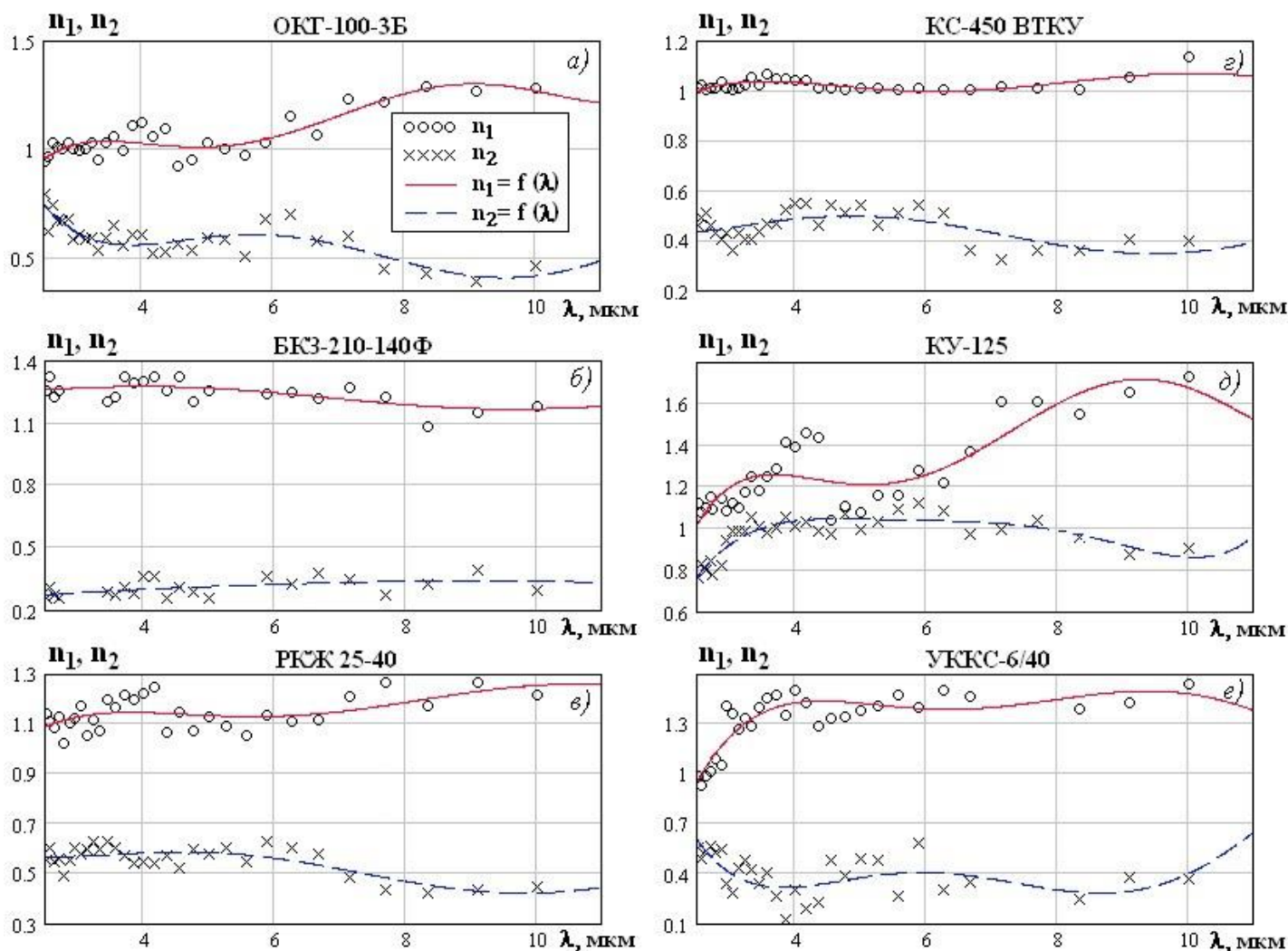


Рисунок 1. Оптические константы веществ пылевых частиц энергетических установок

2. Методика расчета радиационных характеристик

Радиационные характеристики полидисперсных систем сферических частиц конденсированной фазы рассчитывались по теории Ми. Форма частиц принималась сферической. Рассматривались одиночные не взаимодействующие между собой частицы из однородного изотропного материала. Функция распределения частиц $f(r)$ и характерный размер для системы частиц устанавливаются в работе [4] путем дисперсного анализа. Размеры частиц конденсированной фазы представляются логарифмически-нормальным распределением:

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

где r_n – медианный радиус; σ – среднеквадратичное отклонение. Значение σ находится из формулы [1]:

$$\lg(\sigma)^2 = \frac{\ln r_n - \ln r_m}{2.303}, \quad (2)$$

где r_m – модальный радиус частиц.

Графики функций распределения частиц по размерам исследуемых установок приведены на рисунке 2. Численные значения параметров для каждой из функций распределения представлены в таблице 4.

Таблица 4. Параметры функции распределения частиц по размерам для энергетических установок

ЭУ	r_n , МКМ	r_m , МКМ	σ , МКМ
ОКГ-100-3Б	2	1,225	2,014
БКЗ-210-140Ф	3,5	3,05	1,449
РКЖ 25-40	10	7,75	1,657
КС-450 ВТКУ	8,5	7,05	1,541
КУ-125	0,75	0,0675	4,719
УККС-6/40	1	0,282	3,08

Радиационные характеристики единичного объема (коэффициенты ослабления κ , поглощения α и рассеяния β) для полидисперсной системы сферических частиц могут быть найдены [6–8]:

$$\begin{aligned}\kappa &= N \int_0^{\infty} \pi r^2 K_{\text{осл}} f(r) dr, \\ \alpha &= N \int_0^{\infty} \pi r^2 K_{\text{погл}} f(r) dr, \\ \beta &= N \int_0^{\infty} \pi r^2 K_{\text{рас}} f(r) dr,\end{aligned}\quad (3)$$

где $K_{\text{осл}}$, $K_{\text{погл}}$, $K_{\text{рас}}$ – безразмерные коэффициенты ослабления, поглощения и рассеяния (зависят от параметров m и ρ), N – числовая концентрация частиц. Она может быть найдена из соотношения [7, 8]:

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

где $\rho_{\text{ч}}$ – плотность вещества частиц, C_m – массовая концентрация частиц.

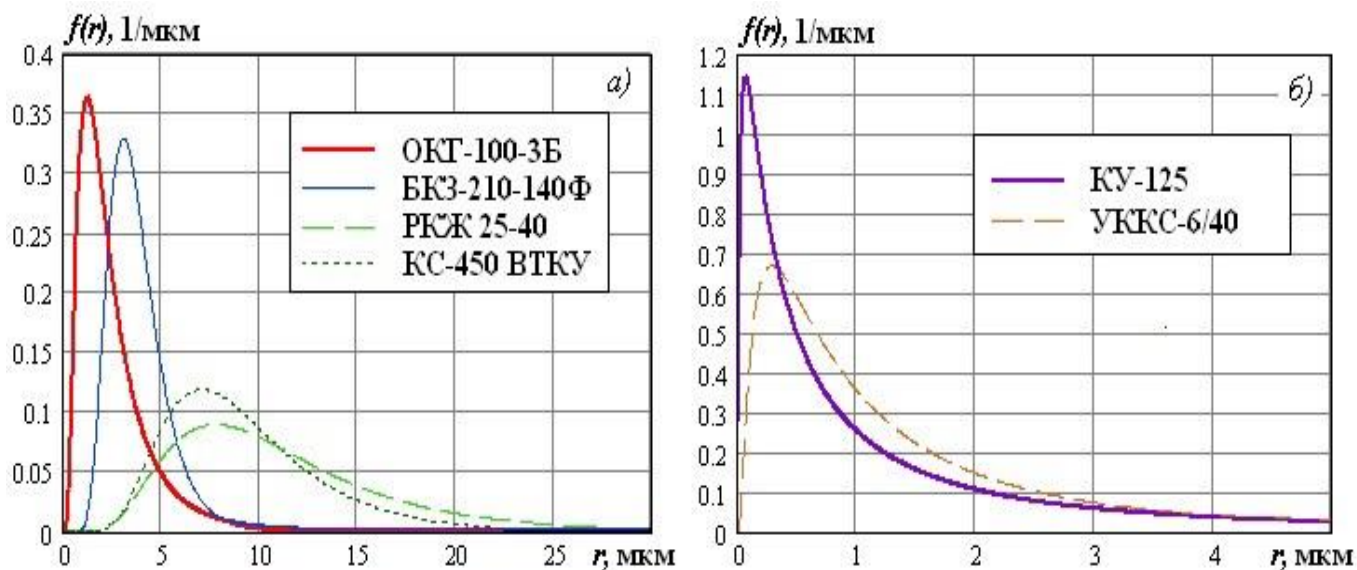


Рисунок 2. Функция распределение частиц по размерам энергетических установок

При этом формулы (3) примут вид:

$$\kappa = \frac{3C_m}{4\rho_{\text{ч}}} \frac{\int_0^{\infty} r^2 K_{\text{осл}} f(r) dr}{\int_0^{\infty} r^3 f(r) dr}, \alpha = \frac{3C_m}{4\rho_{\text{ч}}} \frac{\int_0^{\infty} r^2 K_{\text{погл}} f(r) dr}{\int_0^{\infty} r^3 f(r) dr}, \beta = \frac{3C_m}{4\rho_{\text{ч}}} \frac{\int_0^{\infty} r^2 K_{\text{рас}} f(r) dr}{\int_0^{\infty} r^3 f(r) dr}. \quad (5)$$

3. Результаты расчетов

На рисунке 3 представлены графики радиационных характеристик единичного объема (κ , α и β) в зависимости от длины волны для шести энергетических установок. Результаты показывают, что с ростом длины волны для котлов ОКТ-100-3Б, БКЗ-210-140Ф роль рассеяния в суммарном ослаблении увеличивается от 45 до 65% и от 50 до 70% соответственно. Для остальных установок соотношение рассеяния и поглощения практически не изменяется.

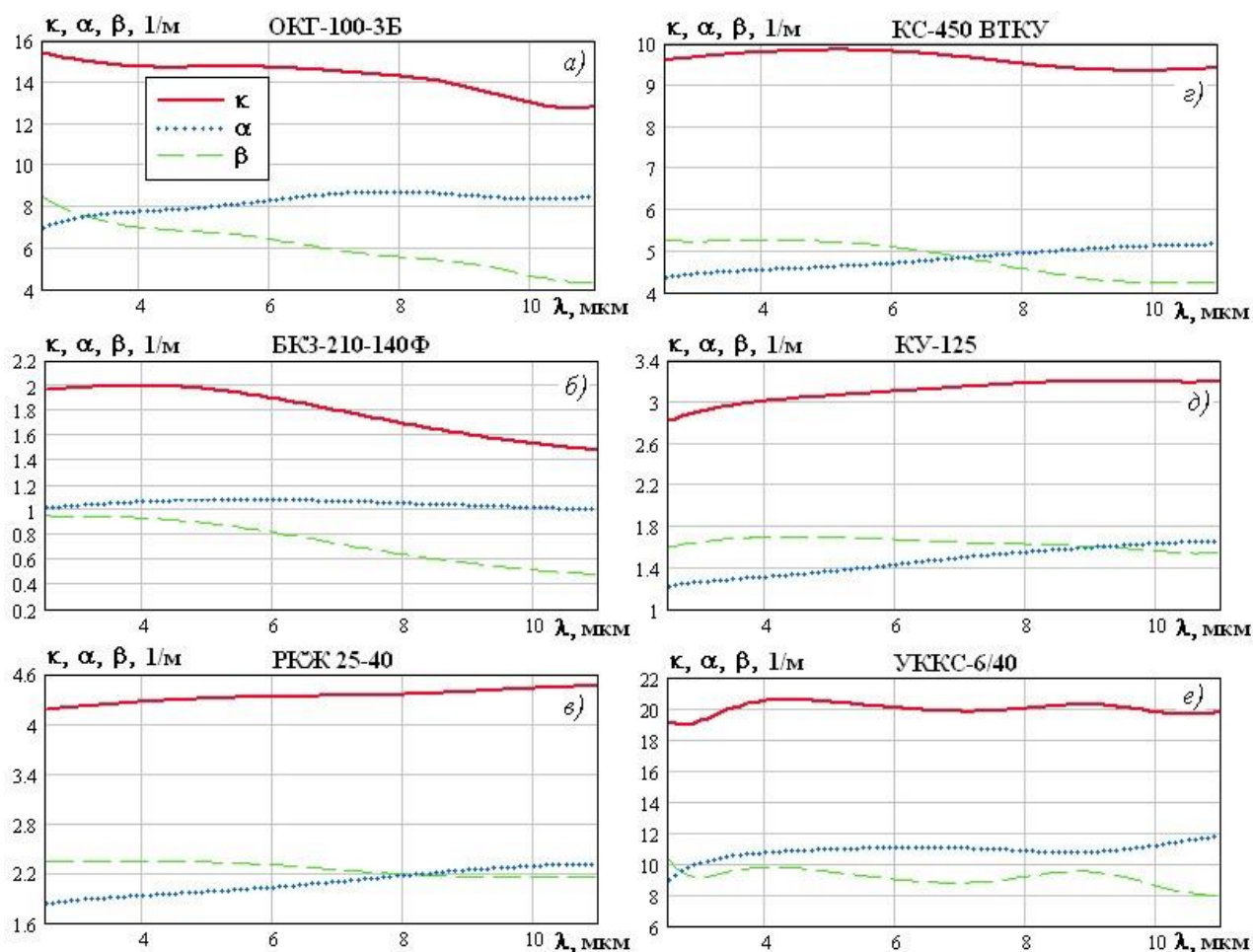


Рисунок 3. Радиационные характеристики частиц энергетических установок

Заключение

Таким образом, с помощью созданной компьютерной программы и данных о системах пылевых потоков частиц, был произведен расчет радиационных характеристик частиц для шести энергетических установок. Разработанные методика и программа могут быть в дальнейшем использованы в качестве модуля в программах сложного теплообмена для исследования процессов, происходящих в энергоустановках различных отраслей промышленности.

Список литературы.

1. Таймаров М.А., Ахметова Р.В., Маргулис С.М., Салтанаева Е.А. Тепловое излучение в топках котлов. Казань: Бриг, 2017. 124 с.
2. Кузьмин В.А. Тепловое излучение в двигателях и энергетических установках. Киров: ООО «Фирма «Полекс», 2004. 231 с.
3. Howell J.R., Menguc M.P., Siegel R. Thermal radiation heat transfer. 6th ed. USA, Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2016. 1006 p.
4. 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.

5. Таймаров М.А. Исследование оптических констант веществ пылевых частиц из газоходов котлов-утилизаторов черной металлургии. Труды РНКТ-2. М.: Изд-во МЭИ, 1998. Т.6. С. 379–381.

6. Блох А.Г., Клабуков В.Я., Кузьмин В.А. Радиационные характеристики полидисперсных систем сферических частиц. Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1976. 112 с.

7. Кузьмин В.А., Заграй И.А. Радиационные характеристики дисперсных систем энергетических установок. Германия: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2013. 140 с.

8. Кузьмин В.А., Пяткова И.А. Радиационные характеристики частиц двигателей и энергетических установок // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 3, 4. С. 11–14.

References.

1. Taimarov M.A., Akhmetova R.V., Margulis S.M., Saltanaeva E.A. Thermal radiation in boiler furnaces. Brig, Kazan. 2017. 124 p. [in Russian].

2. Kuzmin V.A. Thermal radiation in engines and energy installations. Poleks, Kirov. 2004. 231 p. [in Russian].

3. Howell J.R., Menguc M.P., Siegel R. Thermal radiation heat transfer. 6th ed. USA, Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2016. 1006 p.

4. 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].

5. Taimarov M.A. Investigation of optical constants of dust particles substances from flues of waste boilers of ferrous metallurgy. Proceedings of RNKT-2. MEI, Moscow. 1998. Vol. 6. P. 379–381 [in Russian].

6. Blokh A.G., Klabukov V.Ya., Kuzmin V.A., Radiation characteristics of polydisperse systems of spherical particles. Volga-vyatka publ. house, Gor'ky. 1976. 112 p. [in Russian].

7. 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].

8. Kuzmin V.A., Pyatkova I.A. Radiation characteristics of the particles of engines and energy installations. Izv. Vuzov. Problemy energetiki. 2010. Nos.3, 4. P. 11–14 [in Russian].