

УДК 535.341

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
В ГАЗОДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЕ «УГОЛЬНАЯ ПЫЛЬ – ВОЗДУХ»****Лисаков С.А., Павлов А.Н., Сыпин Е.В., Леонов Г.В.***Бийский технологический институт (филиал), Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова, Бийск, e-mail: foxlsa@mail.ru, pan@bti.secna.ru, sev@bti.secna.ru, leonov@bti.secna.ru*

Проведено моделирование ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль – воздух». Определены основные аналитические зависимости, описывающие ослабление излучения в газодисперсной системе. Выполнена проверка адекватности компьютерной модели. Проведено исследование ослабления оптического излучения на базе компьютерного моделирования. Моделирование выполнялось на основе теории Ми и алгоритма ВММЕ. При проверке адекватности модели установлено, что результаты расчетов на базе теории Ми и экспериментальные данные, описывающие поглощательную способность, хорошо согласуются друг с другом. В результате исследования ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль – воздух» установлено, что ослабление оптического излучения может быть охарактеризовано через поглощающую способность среды. Промежуточная среда в виде газодисперсной системы «угольная пыль – воздух» существенно ограничивает применение оптико-электронных датчиков, что необходимо учитывать при их использовании для контроля возникновения очагов возгорания при различных технологических процессах. Результаты моделирования будут использоваться для повышения помехоустойчивости оптико-электронных датчиков.

**Ключевые слова:** оптическое излучение, газодисперсная система, ослабление

**COMPUTER SIMULATION OF OPTICAL RADIATION ATTENUATION  
IN DISPERSED SYSTEM «COAL DUST – AIR»****Lisakov S.A., Pavlov A.N., Sypin E.V., Leonov G.V.***Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Biysk, e-mail: foxlsa@mail.ru, pan@bti.secna.ru, sev@bti.secna.ru, leonov@bti.secna.ru*

Computer simulation of optical radiation attenuation in dispersed system «coal dust-air» is performed. Basic analytical relationships which describe the radiation attenuation in the gas-dispersed system are defined. Checking of the computer model adequacy is carried out. Research of optical radiation attenuation on the basis of computer simulations is carried out. Modeling is executed on the basis of Mie theory and ВММЕ algorithm. At check of adequacy of model it is defined, that results of calculations on the basis of Mie theory and the experimental data describing optical radiation attenuation are coordinated with each other. As a result of research of optical radiation attenuation in dispersed system «coal dust-air» it is defined, that optical radiation attenuation can be characterised through absorbing ability of medium. The intermediate medium, representing dispersed system «coal dust-air», essentially limits application of electro-optical gauges that it is necessary to consider at their use for the control of occurrence of the fires at various technological processes. Results of modeling will be used for increase of a noise stability of electro-optical gauges.

**Keywords:** optical radiation, dispersed system, attenuation

Для обеспечения пожарной безопасности взрывоопасных технологических процессов, связанных с образованием газодисперсных систем (в частности, при добыче угля в шахтах), используются автоматические системы противопожарной защиты и взрывоподавления. Такие системы, как правило, строятся на основе быстродействующих оптико-электронных датчиков (ОЭД) [8–10, 14].

Излучение от очага возгорания приходит на ОЭД ослабленным за счет влияния промежуточной среды, в которой оно распространяется. Промежуточная среда оказывает существенное влияние на работу ОЭД, приводя к значительным погрешностям или делая их работу невозможной. Поэтому учет влияния запыленной среды на работу оптико-электронных датчиков является актуальной задачей [13, 15] и одной

из основных при выполнении проекта «Разработка научных основ построения системы предотвращения и локализации взрывов на потенциально опасных промышленных объектах» (грант РФФИ № 15-08-06719 а). В рамках указанного проекта в работе [12] выполнена постановка задачи моделирования ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль – воздух» и сформулированы исходные данные для проведения моделирования, приведенные в табл. 1.

В результате моделирования ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль – воздух» необходимо:

- вычислить коэффициенты рассеяния и поглощения для полидисперсной системы в зависимости от длины волны падающего излучения;

Таблица 1

Исходные данные для проведения моделирования

Параметр	Значение
Диапазон длин волн излучения $\lambda$ , мкм	0,7–5
Диаметр частиц пыли $x$ , мкм	1–100
Плотность распределения $f_m(x)$ массы пыли по диаметрам частиц $x$	Распределение Розина – Рамллера $f_m(x) = bax^{a-1}\exp(-bx^a)$ с коэффициентами $a = 2$ и $b = 0,005$
Комплексный показатель преломления $m = n - i\chi$ частиц пыли каменного угля марки Г	$n(\lambda) = 1,6 + 0,08\lambda^{0,5}$ $\chi(\lambda) = 0,33 - 0,025\lambda^{0,5} - 0,003(\lambda - 1)^2$
Концентрация частиц угольной пыли, г/м <sup>3</sup>	0,06–30

– получить индикатрисы рассеяния оптического излучения для полидисперсной системы частиц;

– определить поглощательную способность дисперсной системы в зависимости от длины волны при различных концентрациях угольной пыли и толщинах поглощающего слоя.

В связи с вышеизложенным была сформулирована цель: выполнить моделирование ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль – воздух».

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– определить основные аналитические зависимости, описывающие ослабление излучения в газодисперсной системе «угольная пыль – воздух», и на их основе построить компьютерную модель;

– выполнить проверку адекватности компьютерной модели;

– провести исследование ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль – воздух» на базе компьютерного моделирования.

**Математическая модель ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль – воздух»**

В работе [12] сделан вывод о том, что для расчета коэффициента ослабления в газодисперсной системе «угольная пыль – воздух» может использоваться теория Ми.

К основным параметрам теории рассеяния Ми, характеризующим перенос оптического излучения в промежуточной среде, относятся: спектральные факторы эффективности: поглощения –  $K^a(\lambda)$ , рассеяния –

$K^s(\lambda)$  и ослабления  $K(\lambda) = K^a(\lambda) + K^s(\lambda)$ ; а также спектральные коэффициенты: поглощения  $\alpha(\lambda)$ , рассеяния  $\beta(\lambda)$  и ослабления  $k(\lambda) = \alpha(\lambda) + \beta(\lambda)$ .

Факторы эффективности характеризуют способности отдельной частицы поглощать, рассеивать и ослаблять излучение, а коэффициенты характеризуют способности системы частиц [5].

Факторы эффективности  $K^a(\lambda)$ ,  $K^s(\lambda)$  и  $K(\lambda)$  являются безразмерными величинами, а коэффициенты  $\alpha(\lambda)$ ,  $\beta(\lambda)$  и  $k(\lambda)$  имеют размерность м<sup>-1</sup>.

На основании электромагнитной теории Г. Максвелла Ми были теоретически установлены формулы, связывающие факторы эффективности рассеяния и ослабления с диаметром частицы  $x$ , длиной волны падающего излучения  $\lambda$  и комплексным показателем преломления частицы  $m(\lambda)$ . Дифракционные свойства частиц учитываются путем использования в расчетных формулах безразмерного параметра (дифракции)  $\rho = \pi x/\lambda$ .

Факторы эффективности рассеяния и ослабления излучения определяются в соответствии с формулами [5]:

$$K^s(m(\lambda), \rho) = \frac{2}{\rho^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2);$$

$$K(m(\lambda), \rho) = \frac{2}{\rho^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n),$$

где  $n$  – положительные целые числа.

Коэффициенты Ми  $a_n$ ,  $b_n$  рассчитываются в соответствии с рекуррентными выражениями, представленными в форме, удобной для вычисления на ЭВМ (алгоритм ВНМЕ [4]):

$$a_n(m(\lambda), \rho) = \frac{\left( \frac{A_n(\rho \cdot m(\lambda))}{m(\lambda)} + \frac{n}{\rho} \right) \cdot \text{Re}(\xi_n(\rho)) - \text{Re}(\xi_{n-1}(\rho))}{\left( \frac{A_n(\rho \cdot m(\lambda))}{m(\lambda)} + \frac{n}{\rho} \right) \cdot \xi_n(\rho) - \xi_{n-1}(\rho)};$$

$$b_n(m(\lambda), \rho) = \frac{\left( m(\lambda) \cdot A_n(\rho \cdot m(\lambda)) + \frac{n}{\rho} \right) \cdot \operatorname{Re}(\xi_n(\rho)) - \operatorname{Re}(\xi_{n-1}(\rho))}{\left( m(\lambda) \cdot A_n(\rho \cdot m(\lambda)) + \frac{n}{\rho} \right) \cdot \xi_n(\rho) - \xi_{n-1}(\rho)},$$

где  $A_n(\rho \cdot m(\lambda))$  и  $\xi_n(\rho)$  являются комплексными рекуррентными соотношениями и рассчитываются по выражениям

$$\xi_n(\rho) = \frac{2n-1}{\rho} \cdot \xi_{n-1}(\rho) - \xi_{n-2}(\rho); \quad \xi_0(\rho) = \sin(\rho) + i \cdot \cos(\rho); \quad \xi_{-1}(\rho) = \cos(\rho) + i \cdot \sin(\rho);$$

$$A_n(\rho \cdot m(\lambda)) = -\frac{n}{\rho \cdot m(\lambda)} + \left[ \frac{n}{\rho \cdot m(\lambda)} - A_{n-1}(\rho \cdot m(\lambda)) \right]^{-1}; \quad A_0(\rho \cdot m(\lambda)) = \operatorname{ctg}(\rho \cdot m(\lambda)).$$

Содержание в дисперсной системе частиц различных размеров характеризуется числовой концентрацией частиц  $N_0$  и функцией их распределения по размерам  $f(x)$ .

Коэффициенты поглощения  $\alpha(\lambda)$ , рассеяния  $\beta(\lambda)$  и ослабления  $k(\lambda)$  для полидисперсной системы частиц определяются зависимостями вида

$$\alpha(\lambda) = \frac{3 \mu}{2 \gamma} \frac{\int_0^{\infty} K^a(m(\lambda), \rho) x^2 f(x) dx}{\int_0^{\infty} x^3 f(x) dx};$$

$$\beta(\lambda) = \frac{3 \mu}{2 \gamma} \frac{\int_0^{\infty} K^s(m(\lambda), \rho) x^2 f(x) dx}{\int_0^{\infty} x^3 f(x) dx};$$

$$k(\lambda) = \frac{3 \mu}{2 \gamma} \frac{\int_0^{\infty} K(m(\lambda), \rho) x^2 f(x) dx}{\int_0^{\infty} x^3 f(x) dx},$$

где  $\gamma$  – плотность угольной пыли ( $1,8 \cdot 10^6$  г/м<sup>3</sup>);  $\mu$  – массовая концентрация частиц, г/м<sup>3</sup>.

Массовая концентрация связана с числовой концентрацией следующей зависимостью:

$$\mu = \frac{\pi}{6} N_0 \gamma \int_0^{\infty} x^3 f(x) dx.$$

Из приведенных в табл. 1 исходных данных видно, что параметр дифракции  $\rho > 1$ , поэтому рассеяние в системе «угольная пыль – воздух» происходит на средних

и больших частицах. Рассеянная такими частицами энергия концентрируется в узком направленном вперед пучке и практически не вычитается из основного потока [1, 2, 3]. При этом ослабление при достаточно больших концентрациях или толщинах слоя происходит главным образом за счет многократного поглощения на частицах, расположенных на пути пучка.

Полная поглощательная способность среды характеризуется коэффициентом ослабления лучей в поглощающей среде. Таким образом, поглощательная способность  $a(\lambda)$  зависит как от коэффициента поглощения частиц  $\alpha(\lambda)$ , так и от их рассеивающей способности, которая характеризуется коэффициентом рассеяния  $\beta(\lambda)$  и индикатрисой рассеяния  $\gamma(\vartheta)$  [1].

Рассеянное частицей излучение, как правило, распределяется по различным направлениям  $\vartheta$  неравномерно, т.е. является анизотропным. Анизотропию рассеяния характеризуют индикатрисой рассеяния  $\gamma(\vartheta, \lambda)$ :

$$\gamma(\vartheta, \lambda) = \frac{2}{\rho^2} \frac{i_1 + i_2}{K^s(m(\lambda), \rho)},$$

в которой величина  $i_1$  характеризует интенсивность рассеяния излучения, поляризованного в направлении, перпендикулярном плоскости рассеяния, а величина  $i_2$  характеризует интенсивность рассеяния излучения, поляризованного в плоскости рассеяния [1].

При расчете поглощательной способности слоя для поглощающих и рассеивающих частиц необходимо учитывать влияние эффекта рассеяния на перенос энергии излучения.

Поглощательная способность слоя рассчитывается по формуле [1]:

$$a(\lambda) = 2 \frac{(1+q(\lambda))e^{p(\lambda)(\alpha(\lambda)+\beta(\lambda)l)} - (1-q(\lambda))e^{-p(\lambda)(\alpha(\lambda)+\beta(\lambda)l)} - 2q(\lambda)}{(1+q(\lambda))^2 e^{p(\lambda)(\alpha(\lambda)+\beta(\lambda)l)} - (1-q(\lambda))^2 e^{-p(\lambda)(\alpha(\lambda)+\beta(\lambda)l)}}; \quad (1)$$

$$p(\lambda) = \sqrt{3(1-Sc(\lambda)) [1-Sc(\lambda)(1-2\eta_{\text{нз}})]};$$

$$q(\lambda) = \sqrt{[1 - Sc(\lambda)(1 - 2\eta_{\text{нз}}) / (1 - Sc(\lambda))]}.$$

где  $Sc(\lambda) = K^s(\lambda)/(K^a(\lambda) + K^s(\lambda))$  – критерий Шустера;  $l$  – толщина поглощающего слоя, м;  $\eta_{\text{нз}}$  – параметр, характеризующий долю энергии, рассеянной частицей назад в полусферическом телесном угле [2].

Параметр  $\eta_{\text{нз}}$  рассчитывается согласно формуле

$$\eta_{\text{нз}} = \frac{\int_0^{\pi/2} \gamma(\vartheta, \lambda) \sin\vartheta d\vartheta}{\int_0^{\pi} \gamma(\vartheta, \lambda) \sin\vartheta d\vartheta}.$$

Направление  $\vartheta = 180^\circ$  соответствует направлению падающего излучения.

Зависимость (1) для поглощательной способности слоя учитывает, как соотносятся фактор эффективности рассеяния с фактором эффективности поглощения через критерий Шустера  $Sc$  (для больших частиц  $Sc \approx 0,5$ ) [1].

Для расчета ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль – воздух» по приведенным аналитическим зависимостям использовался программный пакет MiePlot v4.4, поскольку он позволяет рассчитывать коэффициенты поглощения и рассеяния для полидисперсных систем частиц [11]. В MiePlot реализован классический алгоритм ВММЕ, используемый для расчета характеристик рассеяния на однородном шаре, опубликованный в [4].

### Проверка адекватности компьютерной модели

Проверка адекватности компьютерной модели осуществляется путем сравнения зависимостей, полученных расчётным путём авторами данной статьи, с результатами экспериментов других исследователей для тех же условий.

В источниках [1, 2, 3] приведены экспериментальные данные о поглощающей способности газовой среды, содержащей зольную пыль с концентрацией от 10 до 220 г/м<sup>3</sup> и средней удельной поверхностью пыли от 0,1 до 0,4 м<sup>2</sup>/г, в диапазоне длин волн от 1 до 5 мкм. На основании этих данных приведена зависимость с использованием закона Бугера для расчета поглощающей способности частиц золы, содержащейся в газовом потоке:

$$a(\lambda) = 1 - e^{-k(\lambda)F\mu l},$$

где  $k(\lambda)$  – коэффициент ослабления излучения;  $F$  – средняя удельная поверхность пыли, м<sup>2</sup>/г;  $\mu$  – концентрация пыли, г/м<sup>3</sup>;  $l$  – толщина поглощающего слоя, м.

Для расчета величины  $k(\lambda)$  дается следующая эмпирическая формула [1]:

$$k(\lambda) = \frac{A'}{\sqrt[3]{\pi}} \rho^{1/3}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – параметр дифракции;  $A'$  – коэффициент, характеризующий влияние на коэффициент  $k(\lambda)$  электрооптических свойств вещества и формы пылевых частиц.

Эмпирическая зависимость (2) характерна для случая, когда ослабление происходит главным образом за счет поглощения  $K(\lambda) \approx K^a(\lambda)$  [1].

В табл. 2 приведены значения коэффициента  $A'$  в зависимости от рода пыли [1, 3].

Основные закономерности, описывающие ослабление излучения угольной пылью, справедливы и для золы. Таким образом, для оценки адекватности предложенной модели необходимо получить зависимости поглощательной способности от длины волны по эмпирической формуле (2) и на базе теории Ми.

Данные для проверки адекватности соответствуют параметрам дисперсной системы, для которой была получена зависимость (2) (табл. 3).

Таблица 2

Значения коэффициента  $A'$

Род пыли	$A'$
Зола печорского угля	0,25–0,20
Зола воркутинского и кузнецкого угля	0,23
Зола подмосковного бурого и донецкого газового углей; зола эстонского сланца, зола ирша-бородинского бурого угля	0,15–0,2
Зола экибастузского угля	0,12
Зола антрацитового штыба	0,08
Угольная пыль различных видов топлива	0,1–0,15

Таблица 3

Исходные данные для проверки адекватности

Параметр	Значение		
Диапазон длин волн излучения $\lambda$ , мкм	1–5		
Диаметр частиц пыли $x$ , мкм	1–50		
Плотность распределения $f(x)$ частиц золы ирша-бородинского бурого угля по диаметрам частиц $x$	$f(x) = \frac{1}{x_m^2} x e^{-x/x_m}$ с модальным диаметром частиц $x_m = 6,25$ мкм		
Комплексный показатель преломления $m = n - i\chi$ частиц пыли золы ирша-бородинского бурого угля	$\lambda$ , мкм	$n(\lambda)$	$\chi(\lambda)$
	0,7	1,674	0,038
	1,2	1,691	0,1
	1,7	1,65	0,194
	2,2	1,891	0,302
	2,7	1,993	0,27
	3,2	1,881	0,119
	3,7	1,889	0,169
	4,2	1,846	0,132
	4,7	1,839	0,215
5	1,913	0,225	
Концентрация частиц угольной пыли, г/м <sup>3</sup>	10		

Данные, приведенные в табл. 3, близки к данным, которые будут использованы при моделировании (табл. 1), и могут быть использованы при проверке адекватности компьютерной модели.

На рис. 1 показаны зависимости поглощательных способностей от длины волны излучения, полученные на основе теоретических и эмпирических зависимостей для концентрации 10 г/м<sup>3</sup>, средней удельной поверхности пыли 0,13 м<sup>2</sup>/г и толщины поглощающего слоя 1 м.

Экспериментальные данные, описывающие поглощательную способность, и результаты расчетов на базе теории Ми хорошо согласуются друг с другом.

Расхождения зависимостей обусловлены, во-первых, тем, что при проведении эксперимента форма реальных частиц является неправильной, т.е. отличается от сферической, принятой в теории Ми; во-вторых, отклонениями значений комплексного показателя преломления частиц пыли, использованных при эксперименте, с табличными данными, принятыми в расчете.

Можно сделать вывод о том, что разработанная компьютерная модель на базе теории Ми применима для расчета ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль – воздух».

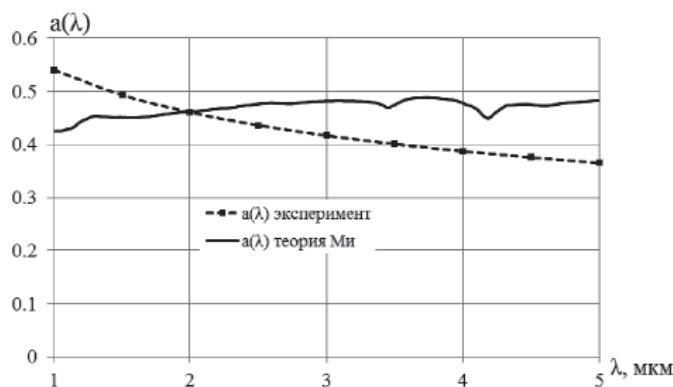


Рис. 1. Зависимости поглощательных способностей от длины волны излучения, полученные на основе теоретических и эмпирических зависимостей

Исследование ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль – воздух» на базе компьютерного моделирования

Исходные данные, использованные для проведения исследования ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль – воздух», приведены в табл. 1. Поскольку дисперсный состав пыли представлен функцией плотности распределения  $f_m(x)$  массы пыли по диаметрам частиц  $x$ , а в формулах для расчета коэффициентов поглощения  $\alpha(\lambda)$ , рассеяния  $\beta(\lambda)$  и ослабления  $k(\lambda)$  используется функция плотности распределения частиц по размерам  $f(x)$ , необходимо выполнить пересчет с помощью выражения [2]:

$$f(x) = \frac{6 \cdot f_m(x) \cdot \mu}{\pi \cdot N_0 \cdot \gamma \cdot x^3}.$$

Коэффициент поглощения  $\alpha(\lambda)$  рассчитывается согласно формуле [2]:

$$\alpha(\lambda) = \frac{3}{2} \frac{\mu}{\gamma} \int_0^{\infty} K^a(m(\lambda), \rho) f_m(x) \frac{dx}{x}.$$

Коэффициенты рассеяния  $\beta(\lambda)$  и ослабления  $k(\lambda)$  рассчитываются аналогично.

С учетом приведенных зависимостей проведено компьютерное моделирование ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль – воздух».

Коэффициенты рассеяния и поглощения для полидисперсной системы в зависимости от длины волны падающего излучения при различных концентрациях угольной пыли приведены на рис. 2.

Из данных, представленных на рис. 2, видно, что коэффициент рассеяния  $\beta(\lambda)$  излучения газодисперсной системой по по-

рядку величины соизмерим с коэффициентом поглощения  $\alpha(\lambda)$  и немного превышает  $\alpha(\lambda)$  во всем рассматриваемом диапазоне длин волн.

Индикатрисы рассеяния оптического излучения полидисперсной системой частиц для длин волн 1, 2, 3, 4 и 5 мкм представлены на рис. 3. Функция  $\gamma(\vartheta, \lambda)$  является безразмерной (интенсивности  $i_1$  и  $i_2$  в относительных единицах), а ее значения определяются в зависимости от фактора эффективности ослабления  $K^s(m(\lambda), \rho)$  и параметра дифракции  $\rho$ .

С уменьшением длины волны падающего излучения (увеличивается  $\rho$ ) происходит существенная деформация индикатрис рассеяния. Рассеяние вперед значительно возрастает по ходу распространения падающего излучения.

Следовательно, параметр  $\eta_{\text{нз}}$ , характеризующий долю энергии, рассеянной частицей назад в полусферическом телесном угле, возрастает с увеличением длины волны падающего излучения. Зависимость параметра  $\eta_{\text{нз}}$  от длины волны падающего излучения представлена на рис. 4.

Исходя из того, что значения коэффициента рассеяния соизмеримы со значениями коэффициента поглощения (рис. 2), индикатриса рассеяния вытянута вперед и параметр  $\eta_{\text{нз}}$  имеет малые значения, ослабление определяется поглощательной способностью полидисперсной системы, рассчитываемой по формуле (1).

Зависимость поглощательной способности газодисперсной системы «угольная пыль – воздух» от длины волны при различных концентрациях угольной пыли (толщина поглощающего слоя 1 м) представлена на рис. 5, а.

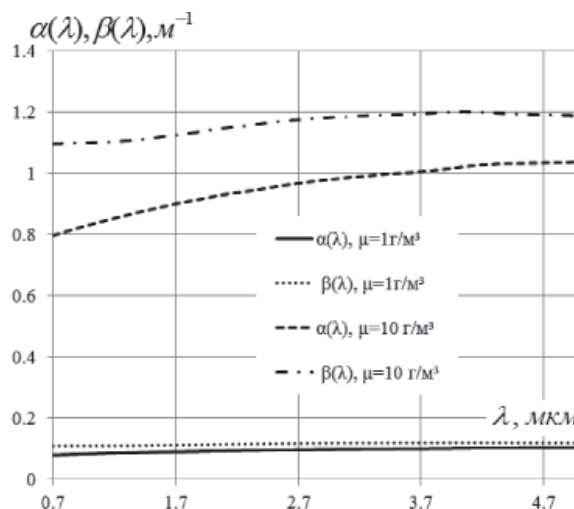


Рис. 2. Коэффициенты рассеяния и поглощения для полидисперсной системы в зависимости от длины волны падающего излучения при различных концентрациях угольной пыли

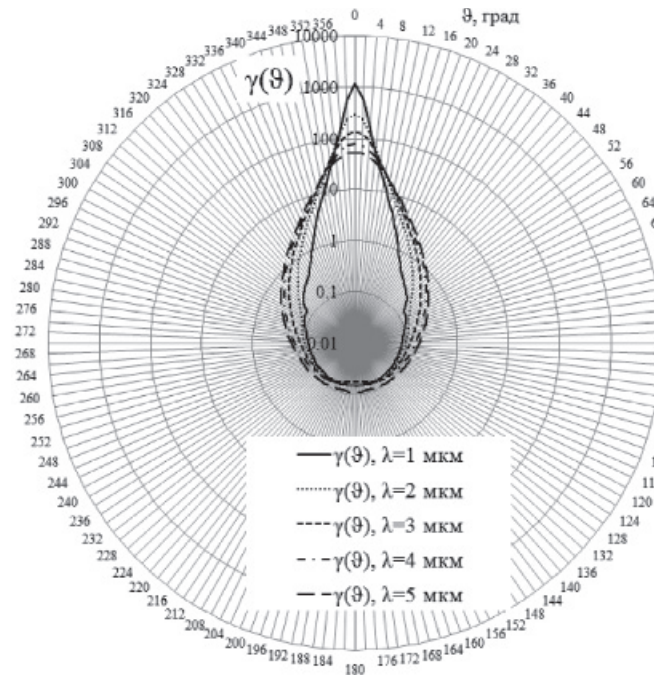


Рис. 3. Индикатрисы рассеяния оптического излучения полидисперсной системой частиц для длин волн 1, 2, 3, 4 и 5 мкм

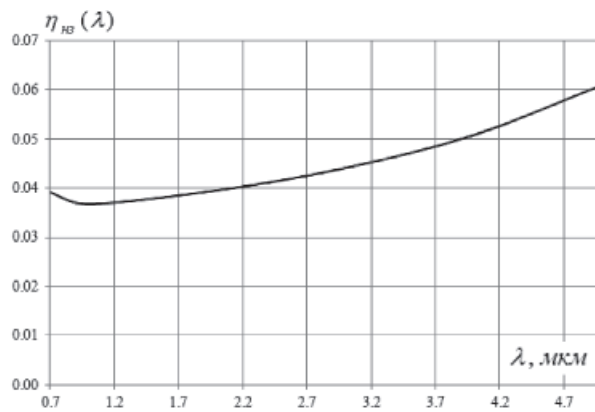


Рис. 4. Зависимость параметра  $\eta_{nz}$  от длины волны падающего излучения

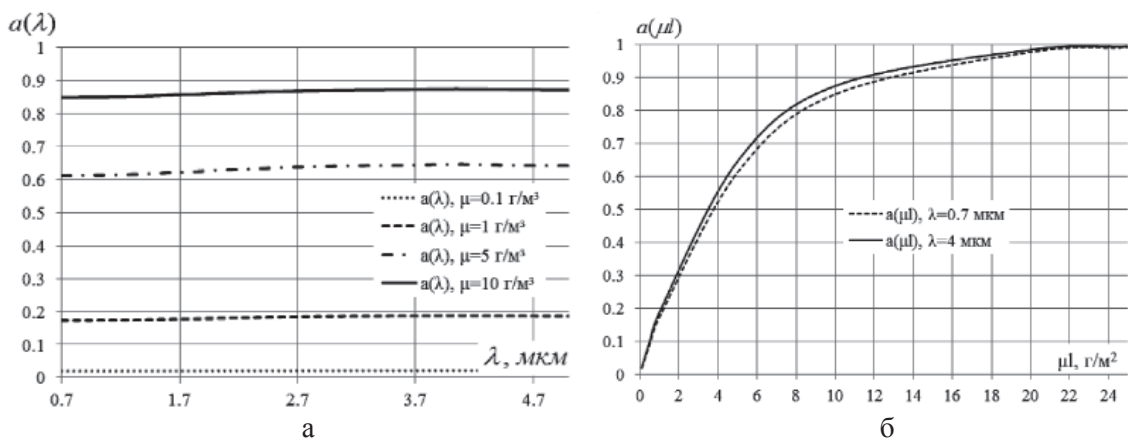


Рис. 5. Зависимость поглощательной способности газодисперсной системы «угольная пыль – воздух»:  
 а – от длины волны при различных концентрациях угольной пыли;  
 б – от произведения толщины поглощающего слоя и концентрации угольной пыли

Из данных представленных на рис. 5, а, видно, что поглощательная способность газодисперсной системы  $a(\lambda)$  слабо зависит от длины волны падающего излучения. Например, при концентрации пыли  $5 \text{ г/м}^3$  в диапазоне длин волн от 0,7 до 4 мкм происходит увеличение поглощательной способности с ростом длины волны –  $a(0,7) = 0,612$  и  $a(4) = 0,646$ . При этом в диапазоне от 4 до 5 мкм поглощательная способность уменьшается с ростом длины волны –  $a(4) = 0,64$ . Для различных концентраций характер зависимости поглощательной способности от длины волны сохраняется.

Поглощательная способность рассматриваемой газодисперсной системы в значительной мере зависит от концентрации угольной пыли и толщины поглощающего слоя (рис. 5, б). Например, при толщине поглощающего слоя 10 м и концентрации  $1,4 \text{ г/м}^3$  поглощательная способность превышает 0,9.

Можно сделать вывод о том, что промежуточная среда в виде газодисперсной системы «угольная пыль – воздух» существенно ограничивает применение оптико-электронных датчиков, что необходимо учитывать при их использовании для контроля возникновения очагов возгорания.

#### Выводы и заключение

В результате выполнения работ проведено моделирование ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль – воздух».

Решены следующие задачи:

- определены основные аналитические зависимости, описывающие ослабление излучения в газодисперсной системе «угольная пыль – воздух»;

- выполнена проверка адекватности компьютерной модели;

- проведено исследование ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль – воздух» на базе компьютерного моделирования.

Моделирование ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль – воздух» выполнялось на основе теории Ми и алгоритма ВНМЕ.

При проверке адекватности модели установлено, что результаты расчетов на базе теории Ми и экспериментальные данные, описывающие поглощательную способность, хорошо согласуются друг с другом.

В результате исследования ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль – воздух» установлено, что ослабление оптического излучения может быть охарактеризовано через поглощающую способность среды.

Промежуточная среда в виде газодисперсной системы «угольная пыль – воздух» существенно ограничивает применение оптико-электронных датчиков, что необходимо учитывать при их использовании для контроля возникновения очагов возгорания при различных технологических процессах.

Дальнейшая работа направлена на проведение экспериментального исследования ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль – воздух».

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-08-06719 а.*

#### Список литературы

1. Блох А.Г. Теплообмен в топках паровых котлов. – Л.: Энергоатом-издат. Ленингр. отд-ние, 1984. – 240 с., ил.
2. Блох А.Г. Тепловое излучение в котельных установках. – Л.: Энергия, 1967. – 328 с.
3. Блох А.Г. Основы теплообмена излучением. – Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 332 с.
4. Борен Г.Ф. Поглощение и рассеяние света малыми частицами: пер. с англ. / Г.Ф. Борен, Д.Р. Хафмен. – М.: Мир, 1986. – 664 с.: ил
5. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами: пер. с англ. – М.: Мир, 1971. – 164 с.
6. Патент РФ № 2459269: МПК7 G 08 В 17/12. Пирометрический датчик координат очага возгорания с цилиндрическими линзами / Е.В. Сыпин и др.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО АлтГТУ им. И.И. Ползунова // Бюл. – 2012.
7. Патент РФ № 2536355: МПК: G08B17/00. Пирометрический датчик координат очага возгорания с полевой диафрагмой / Е.В. Сыпин и др.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО АлтГТУ им. И.И. Ползунова // Бюл. – 2014.
8. Повернов Е.С. Оптико-электронный датчик координат очага возгорания на базе одноэлементного позиционночувствительного детектора / Е.С. Повернов, А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин // Южно-Сибирский научный вестник. – 2012. – № 2. – С. 157–160. – Режим доступа: [http://s-sibsb.ru/images/articles/2012/2/39\\_157-160.pdf](http://s-sibsb.ru/images/articles/2012/2/39_157-160.pdf).
9. Повернов Е.С. Лабораторный образец быстродействующего многопорогового прибора контроля аварийных и предаварийных ситуаций во взрывоопасной атмосфере // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – С. 172–178.
10. Тупкина Н.Ю. Оптическая система трёхканального оптико-электронного прибора двух спектральных отношений с отдельными объективами каналов / Н.Ю. Тупкина, Е.В. Сыпин // Южно-Сибирский научный вестник. – 2013. – № 1 (3). – С. 25–30. – Режим доступа: [http://s-sibsb.ru/images/articles/2013/1/6\\_25-30.pdf](http://s-sibsb.ru/images/articles/2013/1/6_25-30.pdf).
11. Laven, P. MiePlot. A computer program for scattering of light from a sphere using Mie theory & the Debye series [электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: <http://www.philiplaven.com>.
12. Lisakov S.A. Determination of Optical Radiation Attenuation in Dispersed System «Coal Dust-Air» // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2015. – P. 353–358.
13. Mikhanoshina J.L. The study of influence of gas-dispersed medium like coal dust-air on the optical radiation attenuation / Mikhanoshina, A.N. Pavlov, E.V. Sypin // International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2012: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2012. – P. 226–229.



14. Pavlov A.N. Optoelectronic system for determination of ignition center three-dimensional coordinates at initial stage // International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM'2010: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P. 417–419.

15. Yakusheva O.Y. Experimental research backscattering in the disperse system / O.Y. Yakusheva, A.N. Pavlov, E.V. Sypin // 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2013: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2013. – P. 246–248.

### References

1. Bloch A.G. Teploobmen v topkakh parovykh kotlov [Heat transfer in furnaces of steam boilers], Leningrad, Energoatomizdat, 1984, 240 p.

2. Bloch A.G. Teplovoe izluchenie v kotel'nykh ustanovkakh [Thermal radiation in boilers], Leningrad, Energy, 1967, 328 p.

3. Bloch A.G. Osnovy teploobmena izlucheniem [Fundamentals of radiation heat transfer], Leningrad, Energy, 1962, 332 p.

4. Boren G.F. Pogloshhenie i rassejanie sveta malymi chasticami [Absorption and scattering of light by small particles], Moscow, Mir, 1986, 664 p.

5. Deirmendjian D. Rassejanie jelektromagnitnogo izlucheniya sfericheskimi polidispersnymi chasticami (Electromagnetic scattering on spherical polydispersions), Moscow, Mir, 1971, 164 p.

6. Patent 2459269 Russian Federation. Pirometricheskij datchik koordinat ochaga vozgoraniya s cilindricheskimi linzami [Pyrometric fire hazard coordinate sensor with cylindrical lenses]: MPK7 G 08 B 17/12 / E.V. Sypin [and other]; applicant and patent holder – Polzunov Altai State Technical University. 2012.

7. Patent 2536355 Russian Federation. Pirometricheskij datchik koordinat ochaga vozgoraniya s polevoj diafragmoj [Pyrometric sensor coordinates center of ignition with field diaphragm]: MPK: G08B17/00. / E.V. Sypin [and other]; applicant and patent holder – Polzunov Altai State Technical University. 2014.

8. Povernov E.S. Optiko-ehlektronnyj datchik koordinat ochaga vozgoraniya na baze odnoelementnogo pozicionno-chuvstvitel'nogo detektora [The electro-optical system based on the one-element position sensing detector for determina-

tion of ignition coordinates] / E.S. Povernov, A.N. Pavlov, E.V. Sypin // South-Siberian scientific bulletin. 2012. no. 2. pp. 157–160. The access mode: [http://s-sibsb.ru/images/articles/2012/2/39\\_157-160.pdf](http://s-sibsb.ru/images/articles/2012/2/39_157-160.pdf).

9. Povernov E.S. Laboratornyj obrazec bystrodejstvuyushchego mnogoporogovogo pribora kontrolya avariynykh i predavariynykh situacij vo vzryvoopasnoj atmosfere [Laboratory sample of high-speed multithreshold control gauge of the emergency and preemergencies in an explosive atmosphere] // Polzunovskiy bulletin. 2013. no. 2. pp. 172–178.

10. Tupikina N.Y. Opticheskaya sistema tryohkanalnogo optiko-ehlektronnogo pribora dvuh spektral'nykh otnoshenij s razdelnymi obektivami kanalov [The optical system of the three-channel optical-electronic device of two spectral ratios with separate lenses] / N.Y. Tupikina, E.V. Sypin // South-Siberian scientific bulletin. 2013. no. 1 (3). pp. 25–30. The access mode: [http://s-sibsb.ru/images/articles/2013/1/6\\_25-30.pdf](http://s-sibsb.ru/images/articles/2013/1/6_25-30.pdf).

11. Laven, P. MiePlot. A computer program for scattering of light from a sphere using Mie theory & the Debye series, 2013, available at: <http://www.philiplaven.com>.

12. Lisakov S.A. Determination of Optical Radiation Attenuation in Dispersed System «Coal Dust-Air» // 16th International Conference of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015: Conference proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2015. pp. 353–358.

13. Mikhanoshina J.L. The study of influence of gas-dispersed medium like coal dust-air on the optical radiation attenuation / Mikhanoshina, A.N. Pavlov, E.V. Sypin // International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2012: Conference proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2012, pp. 226–229.

14. Pavlov A.N. Optoelectronic system for determination of ignition center three-dimensional coordinates at initial stage // International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM'2010: Conference proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2010, pp. 417–419.

15. Yakusheva O.Y. Experimental research backscattering in the disperse system / O.Y. Yakusheva, A.N. Pavlov, E.V. Sypin // 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2013: Conference proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2013, pp. 246–248.