ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГАЗОДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЕ «УГОЛЬНАЯ ПЫЛЬ-ВОЗДУХ»

С.А. Лисаков, А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин, Г.В. Леонов

Приведены результаты экспериментального исследования ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль-воздух». Разработаны методики подготовки угольной пыли заданного дисперсного состава и методика проведения исследований. Предложена схема лабораторной установки. В результате проведения экспериментального исследования получены зависимости поглощательной способности газодисперсной системы «угольная пыль-воздух» от длины волны при различных концентрациях угольной пыли и экспериментальные зависимости поглощательной способности от концентрации угольной пыли. Данные о поглощательной способности, полученные при экспериментальном исследовании, и результаты теоретических расчетов хорошо согласуются друг с другом, что подтверждает адекватность компьютерной модели, построенной на базе теории Ми.

Ключевые слова: оптическое излучение, газодисперсная система, ослабление, экспериментальное исследование.

ВВЕДЕНИЕ

Автоматические системы противопожарной защиты и взрывоподавления, используемые для обеспечения безопасности угольных шахтах, как правило, строятся на основе быстродействующих оптико-электронных датчиков (ОЭД) [1].

Излучение от очага возгорания приходит на ОЭД ослабленным за счет влияния промежуточной среды, представляющей газодисперсную систему «угольная пыль-воздух». Влияние промежуточной среды приводит к несвоевременному обнаружению очага возгорания ОЭД или делает работу ОЭД невозможной. Следовательно, необходимо учитывать влияние запыленной среды на работу оптико-электронных датчиков [1–3].

В рамках выполнения проекта «Разработка научных основ построения системы предотвращения и локализации взрывов на потенциально опасных промышленных объектах» (грант РФФИ № 15-08-06719 а) одной из основных задач является оценка ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль-воздух».

В работе [4] выполнена постановка задачи моделирования ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль-воздух». В работе [5] приведены зависимости поглощательной способности газодисперсной системы «угольная пыльвоздух» от длины волны при различных концентрациях угольной пыли и толщинах поглощающего слоя, полученные на базе компьютерного моделирования.

Дальнейшая работа направлена на проведение экспериментального исследования ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль-воздух», что позволит проверить адекватность результатов моделирования для известной газодисперсной системы.

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

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– разработать методику подготовки угольной пыли заданного дисперсного состава;

 – разработать конструкцию лабораторной установки и методику проведения исследования;

 провести экспериментальное исследование и проанализировать полученные результаты.

ПОДГОТОВКА УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ ЗАДАННОГО ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА

В ходе проведения исследования ослабления оптического излучения в газодисперсной системе необходимо использовать угольную пыль с дисперсным составом близким к угольным шахтам [4].

Предварительная подготовка угольной пыли заданного дисперсного состава заключается в перемалывании угля в ступке и кон-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2016

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГАЗОДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЕ «УГОЛЬНАЯ ПЫЛЬ-ВОЗДУХ»

троле дисперсного состава перемолотой пыли с помощью микроскопического анализа.

Микроскопический анализ заключается в выполнении следующих операций:

 нанесение угольной пыли на предметное стекло микроскопа и ее фиксация путем накладывания аналогичного предметного стекла;

– калибровка микроскопа на заданное увеличение 300×;

– получение цифрового изображения исследуемой пыли;

 программная обработка микроскопного изображения, позволяющая выделить частицы пыли (подстройка контрастности изображения, удаление фона);

 программный анализ размеров частиц, заключающийся в подсчете числа частиц соответствующего диаметра, и получение счетной функции распределения частиц по размерам на основе аппроксимации.

Для проведения микроскопического анализа используется цифровой микроскоп Levenhuk DTX 500 LCD [6]. Программная обработка микроскопного изображения и анализ размеров частиц выполняется с помощью программного обеспечения ImageJ [7].

При проведении экспериментов используется уголь марки Т (тощий уголь).

Обработанное микроскопное изображение частиц подготовленной угольной пыли представлено на рисунке 1 (увеличение 300×).



Рисунок 1 – Обработанное микроскопное изображение частиц угольной пыли (увеличение 300×)

Счетная функция распределения частиц по размерам, полученная на основе аппроксимации, показана на рисунке 2.

Дифференциальная функция счетного распределения частиц по размерам описывается гамма распределением [8]:

$$f(x) = \frac{a}{x} \cdot e^{-bx},$$
 (1)

где х – диаметр частиц угольной пыли, мкм; ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2016 а = 0.377 и b = 0.144 – параметры распределения. Значения параметров распределения а и b получены в результате аппроксимации функцией (1) по методу наименьших квадратов данных о количестве частиц в зависимости от их размера, полученных в результате микроскопного анализа. Дифференциальная функция распределения f(x) имеет смысл плотности распределения вероятности, т.е. нормирована на единицу:



Рисунок 2 – Дифференциальная функция счетного распределения частиц по размерам

Полученная в результате предварительной подготовки угольная пыль близка по дисперсному составу к угольной пыли, витающей в шахтах – основная доля частиц в распределении соответствует частицам с размерами от 1.5 до 10 мкм [4]. Доля частиц с размерами более 10 мкм в полученном распределении, превышает аналогичное значение в распределении, характерном для угольных шахт. Это необходимо учитывать при сопоставлении экспериментальных данных с теоретическими данными.

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСЛАБЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГАЗОДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЕ «УГОЛЬНАЯ ПЫЛЬ-ВОЗДУХ»

Структурная схема лабораторной установки для проведения исследования приведена на рисунке 3.

Поток излучения от источника (абсолютночерного тела) поступает в пылевую камеру и ослабляется запыленной средой. Ослабленное излучение через монохроматор, выделяющий монохроматическое излучение на заданной длине волны, поступает на фотоприемное устройство. Фотоприемное устройство состоит из приемника излучения (фотодиода) и преобразователя ток-напряжение. Далее выходной сигнал с усилителя поступает на аналогоцифровой преобразователь, данные с которого передаются на персональный компьютер.



Рисунок 3 – Структурная схема лабораторной установки для проведения исследования ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль-воздух»

Управление монохроматором (настройка длины волны монохроматического излучения) осуществляется с персонального компьютера посредством специального программного обеспечения [9].

В качестве модели абсолютно-черного тела используется образцовый излучатель АЧТ-45/100/1000 [10].

Пылевая камера представляет закрытый объем с размерами 0.3×0.3×0.3 м. Стенки пылевой камеры выполнены из оптического стекла с полосой пропускания в спектральном диапазоне от 0.33 до 4.5 мкм. В нижней части пылевой камеры установлен вентилятор, с помощью которого пыль взвешивается в воздухе для создания запыленной среды. Экспериментальное исследование проводится при нормальных условиях.

Взятие требуемой навески угольной пыли для создания в пылевой камере заданной концентрации пыли выполняется с помощью лабораторных весов ВК-300.

Монохроматор МДР-206 предназначен для выделения монохроматического излучения в спектральном диапазоне от 190 до 5000 нм. Эксплуатация МДР-206 в соответствии с требованиями, изложенными в технической документации [9].

Для приема излучения в спектральном диапазоне от 0,7 до 5 мкм используются фотоприемные устройства на основе инфракрасных фотодиодов[11–13].

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСЛАБЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГАЗОДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЕ «УГОЛЬНАЯ ПЫЛЬ-ВОЗДУХ»

Методика проведения исследования ослабления оптического излучения в газодис-

персной системе «угольная пыль-воздух» заключается в выполнении следующих операций:

а) собирается лабораторная установка в соответствии со схемой на рисунке 3;

б) образцовый излучатель АЧТ выводится на значение температуры 1050 °С. Данная температура излучателя обеспечивает оптимальный поток зондирующего излучения в исследуемом диапазоне длин волн;

в) монохроматор последовательно настраивается на длины волн λ : 1, 2, 3, 4 мкм. На каждой длине волны в пылевую камеру помещается угольная пыль, концентрация, которой устанавливается последовательно μ : 1, 5, 10 г/м³. Для соответствующих длины волны и концентрации выполняется серия из 20 измерений интенсивности зондирующего излучения I₀(λ) и интенсивности прошедшего через запыленную среду излучения I(λ) [14, 15]. Рассчитывается коэффициент пропускания запыленной среды:

$$\tau_{ik}(\lambda) = I_{ik}(\lambda) / I_{0ik}(\lambda), \qquad (2)$$

где і – номер измерения; k – серия измерения.

Обработка результатов экспериментальных измерений должна учитывать особенности методики исследования.

Измерение коэффициента пропускания относится к косвенным многократным измерениям. Искомое значение коэффициента пропускания запыленной среды рассчитывается как отношение аргументов I_{ik}(λ)/I_{Oik}(λ). Наблюдения непосредственно измеряемых величин $I_0(\lambda)$ и $I(\lambda)$ при их повторении невоспроизводимы. Результаты наблюдений этих величин при повторении опыта различны, что не связано с наличием случайной погрешности, а происходит из-за изменившихся условий опыта (при каждом опыте в пылевую камеру загружается новая проба с пылью, пыль частично оседает на стенках камеры). В данном случае для определения результатов измерений и оценивания их погрешностей применяется метод приближения [14-16]. Метод основан на приведении ряда отдельных значений косвенно измеряемой величины к ряду прямых измерений. При этом коэффициент пропускания т_{ік}(λ) является воспроизводимой величиной. Получаемые сочетания отдельных результатов измерений аргументов подставляют в формулу (2) и вычисляют отдельные значения измеряемой величины т_{ік}(λ) [16].

Дальнейшая обработка вычисленных значений т_{ік}(λ) выполняется, как обработка прямых измерений с многократными наблюдениями по ГОСТ 8.207-76 [14, 16]. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГАЗОДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЕ «УГОЛЬНАЯ ПЫЛЬ-ВОЗДУХ»

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОСЛАБЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГАЗОДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЕ «УГОЛЬНАЯ ПЫЛЬ-ВОЗДУХ»

В результате экспериментального исследования получены данные о коэффициенте пропускания оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль-воздух» (доверительная вероятность Р = 0.95). На основе данных о коэффициенте пропускания рассчитана поглощательная способность (таблица 1):

$a(\lambda) = 1 - \tau(\lambda)$.

Толщина поглощающего слоя равна 0.3 м и определяется длиной пылевой камеры.

Таблица 1 – Результаты экспериментального исследования ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль-воздух»

λ, мкм	µ, г/м ³	т(λ), отн. ед.	а(λ), отн. ед.
1	1	0.97±0.002	0.03±0.002
1	5	0.86±0.003	0.14±0.003
1	10	0.758±0.004	0.242±0.003
2	1	0.962±0.003	0.038±0.003
2	5	0.852±0.004	0.148±0.004
2	10	0.761±0.003	0.239±0.003
3	1	0.945±0.005	0.055±0.005
3	5	0.87±0.007	0.13±0.007
3	10	0.736±0.007	0.264±0.007
4	1	0.932±0.003	0.068±0.003
4	5	0.823±0.006	0.177±0.006
4	10	0.681±0.007	0.319±0.007

Данные, полученные при экспериментальном исследовании, были сопоставлены с данными моделирования на базе теории Ми (алгоритм BHMIE) [5].

Моделирование выполнено с использованием исходных данных, соответствующих параметрам экспериментально исследуемой газодисперсной системы (таблица 2).

Зависимости поглощательной способности газодисперсной системы «угольная пыльвоздух» от длины волны и концентрации угольной пыли, полученные в результате моделирования (в виде линий) и в результате экспериментальных исследований (в виде маркерных точек), приведены на рисунках 4 и 5 соответственно.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2016

Таблица 2 – Исході	ные данные д	ля про-		
ведения моделирования				

Параметр	Значение
Диапазон длин волн излучения	1–4
λ, ΜΚΜ	
Диаметр частиц	1 5–20
пыли х, мкм	1.0 20
Плотность	Гамма распределение
распределения	(a) $(-hr)$
f(x) частиц угля	$f(x) = \begin{bmatrix} - \\ -x \end{bmatrix} \cdot e^{(-bx)},$
марки Т (тощий	
уголь) по диа-	с коэффициентами
метрам частиц х	а = 0.377 и b = 0.144
Спектральный	
комплексный	
показатель	
преломления	$n(\lambda) = 1.84 + 0.045\lambda^{0.5}$
$m(\lambda) = n(\lambda) - i\chi(\lambda)$	$\chi(\lambda) = 0.44 - 0.047 \lambda^{0.5} -$
частиц пыли	$0.002(\lambda - 1)^2$
каменного угля	
марки Т (тощий	
уголь) [4]	
Концентрация	
частиц угольной	1–10
пыли, г/м ³	





Из данных, представленных на рисунке 4 видно, что поглощательная способность газодисперсной системы a(λ), полученная при экспериментальном исследовании, слабо зависит от длины волны падающего излучения. Для всех концентраций пыли в диапазоне длин волн от 1 до 4 мкм происходит увеличение поглощательной способности с ростом длины волны. Для различных концентраций характер зависимости поглощательной способности от длины волны сохраняется.

Значения теоретической поглощательной способности для концентраций 5 и 10 г/м³ превышают значения экспериментальной поглощательной способности по всему диапазону длин волн.



Поглощательная способность рассматриваемой газодисперсной системы в значительной мере зависит от концентрации угольной пыли (рисунок 5). Например, при концентрации 5 г/м³ пыли и толщине поглощающего слоя 0.3 м поглощательная способность в рассматриваемом диапазоне длин волн изменяется от 0.13 до 0.175. Значения теоретической поглощательной способности превышают значения экспериментальной поглощательной способности. Теоретическая и экспериментальная зависимости расходятся с увеличением концентрации угольной пыли.

Данные о поглощательной способности, полученные при экспериментальном исследовании, и результаты теоретических расчетов хорошо согласуются друг с другом, что подтверждает адекватность компьютерной модели, построенной на базе теории Ми [5].

Расхождения зависимостей обусловлены следующими факторами:

наличие небольшой доли крупных частиц пыли (с размерами более 20 мкм), которая не учитывается при задании счетной функции распределения частиц по размерам в исследуемой газодисперсной системе. Зна-

чения экспериментальной поглощательной способности вследствие этого ниже значений расчетной поглощающей способности.

 – форма частиц, используемых при проведении эксперимента, является неправильной. При теоретических расчетах (теория Ми) принимается сферическая форма частиц;

– значения спектрального комплексного показателя преломления частиц пыли, использованных при эксперименте, отличаются от табличных данных, принятых 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».

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисаков, С. А. Определение координат очага взрыва многоточечной оптико-электронной системой на основе метода центра тяжести / С. А. Лисаков, А. Н. Павлов, Е. В. Сыпин // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – С. 73–77.

2. Лисаков, С. А. Программно-аппаратный комплекс для управления многоточечной системой определения координат очага возгорания / С. А. Лисаков, А. В. Кураев, А. Н. Павлов, Е. В. Сыпин // Ползуновский вестник. – 2014. – № 2. – С. 179–182.

3. 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. – 2013. – P. 246–248.

4. Lisakov, S. A. Determination of Optical Radiation Attenuation in Dispersed System «Coal Dust-Air» / S. A. Lisakov, E. V. Sypin, A. N. Pavlov, J. L. Mikhanoshina, G. V. Leonov // 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015: Conference proceedings, Novosibirsk: NSTU. – 2015. – P. 353–358.

5. Лисаков, С. А. Моделирование ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль-воздух» / С. А. Лисаков, А. Н. Павлов, Е. В. Сыпин, Г. В. Леонов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12 –С. 288–296.

6. Цифровой микроскоп Levenhuk DTX 500 LCD. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.levenhuk.ru/ products/materials/0/LVH-DTX-500LCD-UM-ml-2015.pdf.

7. Rasband WS. ImageJ, U.S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, imagej.nih.gov/ij/, 1997–2012.

8. Архипов, В. А. Движение частиц дисперсной фазы в несущей среде : учебное пособие / В. А. Архипов, А. С. Усанина. – Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. – 252 с.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2016

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГАЗОДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЕ «УГОЛЬНАЯ ПЫЛЬ-ВОЗДУХ»

9. Монохроматор МДР-206. Руководство по эксплуатации Ю- 30.67.105 РЭ. – 41 с.

10. Излучатель в виде модели абсолютно черного тела АЧТ-45/100/1100. Руководство по эксплуатации ДДШ 2.979.005 РЭ. – 26 с.

11. ООО «АИБИ». Оптоэлектронные приборы для ближней и средней ИК области спектра [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http:// www.ibsg.ru/catalogue_2014.pdf.

12. ИоффеЛЕД. Светить и видеть в темнокрасном [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ioffeled.com/.

13. ООО «Л КАРД». Индустриальные системы управления и сбора данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.lcard.ru (дата обращения 10.09.2013).

14. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. – М. : Изд-во стандартов, 1986.

15. МИ 2083-90 (ГСИ. Измерения косвенные). Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. – М. : Изд-во стандартов, 1991.

16. Пронкин, Н. С. Основы метрологии: практикум по метрологии и измерениям : учебное пособие для вузов / Н. С. Пронкин. – М. : Логос; Университетская книга, 2007. – 392 с.

Лисаков С.А., инженер кафедры методов средств измерений и автоматизации Бийского технологического института ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (БТИ АлтГТУ), тел.: (3854)432450, еmail: foxlsa @mail.ru.

Павлов А.Н., канд. техн. наук, доцент кафедры методов средств измерений и автоматизации Бийского технологического института ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (БТИ АлтГТУ), тел.: (3854)432450, e-mail: pan @bti.secna.ru.

Сыпин Е.В., канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры методов средств измерений и автоматизации Бийского технологического института ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (БТИ АлтГТУ), тел.: (3854)432450, e-mail: sev@bti.secna.ru.

Леонов Г.В., доктор техн. наук, профессор кафедры методов средств измерений и автоматизации Бийского технологического института ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (БТИ АлтГТУ), тел.: (3854)432450, e-mail: leonov@bti.secna.ru.