

ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ ВЫСОКОСЕЛЕКТИВНОГО ТУРБИДИМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА

А.А. Жирнов, Э.А. Мецлер, С.С. Титов, А.А. Павленко, О.Б. Кудряшова

В задачах дистанционного бесконтактного определения дисперсных характеристик аэрозолей важно знать границы применимости закона Бугера-Ламберта-Бера в приложениях, где в качестве приёмника излучения используется спектрометр. Такие данные в паспортных характеристиках отсутствуют. Для получения этих характеристик проведена серия экспериментов. В результате получена область параметров, в которой приёмная матрица спектрометра имеет линейную зависимость выходного сигнала для разных длин волн от оптической толщины исследуемой среды.

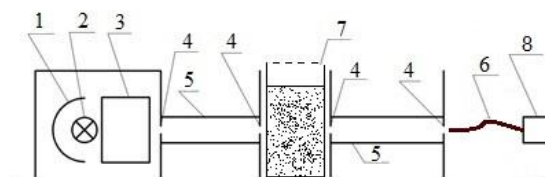
Ключевые слова: размер частиц, спектрометр, линейность, оптическая толщина, закон Бугера-Ламберта-Бера, концентрация частиц, светофильтр.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка бесконтактных методов определения дисперсных характеристик сред является актуальной темой. Такие методы позволяют определять концентрацию частиц, функцию распределения частиц по размерам, не внося искажения в исследуемую среду. С помощью бесконтактных методов можно изучать эволюцию дисперсных потоков, в том числе, в агрессивных средах, потому что при проведении измерений не требуется присутствия оператора. Бесконтактные оптические методы измерений работают с высоким временным разрешением, что позволяет регистрировать характеристики дисперсных сред в быстропротекающих процессах их генерации и эволюции [1].

В настоящее время разработан турбидиметрический высокоселективный метод (ТИПАС) и установка на его основе для определения дисперсных характеристик аэрозолей и суспензий [2] в диапазоне от 30 нм до 6 мкм. Источником оптического излучения с широким спектральным диапазоном служит галогенная лампа накаливания КГМ 9-70. Излучение коллимируется оптической системой, проходит через дисперсную среду и направляется в приёмник излучения, рисунок 1.

Исследуемой дисперсной средой может быть, как аэрозоль, так и эмульсия или суспензия в кювете, причём кювета обычно используется из кварца, чтобы была возможность регистрации ультрафиолетовой области спектра источника. В качестве приёмника излучения используется спектрометр S125-2048/14 производства фирмы «Solar TII», который позволяет регистрировать спектр оптического излучения в диапазоне длин волн от 352,7 нм до 1105,5 нм.



1 – сферическое зеркало; 2 – галогенная лампа; 3 – система линз; 4 – диафрагмы; 5 – светозащитный тубус; 6 – световод; 7 – исследуемая среда; 8 – приёмник излучения
Рисунок 1 – Принципиальная схема установки ТИПАС-1

Для уменьшения погрешности расчёта дисперсных характеристик сред, требуется определить границу применимости закона ослабления интенсивности излучения в дисперсной среде, которая соответствует выполнимости закона Бугера-Ламберта-Бера при различных условиях проведения эксперимента, т.е. изменение концентрации частиц дисперсной среды, и длины волны зондирующего излучения.

Цель данной работы заключается в определении длин волн спектрометра, при которых оптическая толщина имеет линейную зависимость от концентрации частиц дисперсной среды. Это позволит в дальнейшем проводить расчёты дисперсных характеристик на измерительной установке для исследуемых веществ в рамках установленных длин волн.

Проверка осуществляется двумя методами:

1. с использованием двух светофильтров [3];
2. последовательным уменьшением оптической толщины (разбавление исследуемого образца) со снятием спектров [4].

В данной работе методы исследования, предназначенные для проверки фотоприемников распространены на проверку матрицы спектрометра, которая состоит из 2048x14 фотоприёмников.

Коэффициент спектральной чувствительности матрицы спектрометра принимает различные значения в спектральном рабочем диапазоне. Он достигает минимального значения в начале и конце этого рабочего спектрального диапазона, что приводит к большому значению отношения шум/полезный сигнал, то есть к большой погрешности измерения в этих областях. Работа позволит произвести выбор оптимального диапазона длин волн для определения ослабления оптического излучения, прошедшего через дисперсную среду.

Определение оптимального диапазона длин волны проводится с использованием двух нейтральных светофильтров, которые были выбраны таким образом, чтобы при прохождении излучения через оба фильтра регистрировался полезный сигнал.

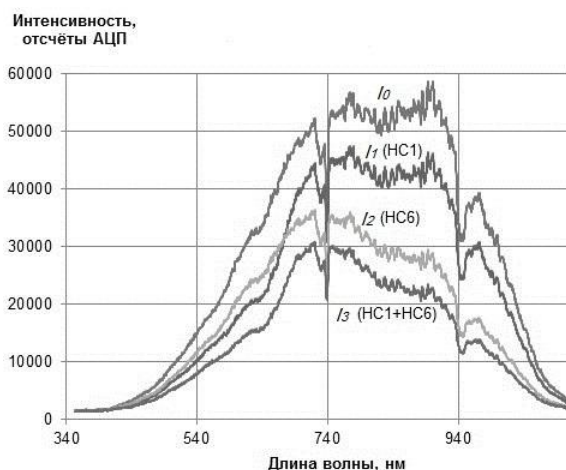
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Первым методом осуществлялось определение оптимального диапазона длин волн, в котором отношение шум/полезный сигнал удовлетворяет заданным требованиям эксперимента проводилась для спектрального диапазона чувствительности матрицы спектрометр с использованием следующей методики. В соответствии с методикой проведения измерения со светофильтрами требуется измерить спектр без светофильтров: $I_0(\lambda)$, затем спектр $I_1(\lambda)$, – с первым светофильтром, $I_2(\lambda)$, – со вторым светофильтром, $I_3(\lambda)$, – с двумя светофильтрами (первым и вторым совместно). В качестве светофильтров были выбраны фильтры марок НС-1 и НС-6 [5], так как они обеспечивают достаточное ослабление интенсивности оптического излучения. На рисунке 2 представлены результаты регистрации спектров оптического излучения с использованием светофильтров и без них.

На следующем этапе рассчитывается

коэффициент $\alpha = \frac{I_0 * I_3}{I_1 * I_2}$ для всех длин волн

спектрального диапазона. Стремление коэффициента α к 1 обеспечивает допустимое значение сигнал/ шум. Для проведения экспериментов допустимый уровень шумов составляет менее 5%. В результате расчёта получилась зависимость коэффициента $\alpha(\lambda_i)$, представленная на рисунке 3.



- $I_0(\lambda)$ – спектр без светофильтров;
- $I_1(\lambda)$ – спектр со светофильтром НС-1;
- $I_2(\lambda)$ – спектр со светофильтром НС-6;
- $I_3(\lambda)$ – спектр с двумя светофильтрами НС-1 и НС-6

Рисунок 2 – Зависимости интенсивности от длины волны спектрометра

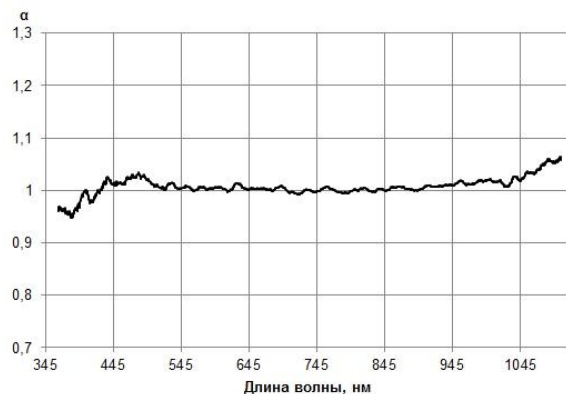


Рисунок 3 – Зависимость α от длины волны

Из анализа зависимости $\alpha(\lambda_i)$ (рисунок 3) видно, что, для матрицы спектрометра коэффициент $|\alpha(\lambda_i)| < 0,05$ в диапазоне длин волн 500,0–1030,0 нм. Таким образом, проверка матрицы спектрометра с использованием светофильтров НС-1, НС-6 позволила определить рабочий диапазон длин волн, в котором отношение сигнал/шум удовлетворяют заданному значению 5%.

Вторым методом осуществляется проверка выполнения закона Бугера-Ламберта-Бера. Для этого были получены экспериментальные зависимости для выбранного диапазона длин волн 500,0–1030,0 нм где ослабления излучения дисперсной средой соответствует закону ослабления Бугера-Ламберта-Бера. Это позволит в дальнейшем определять минимальную и максимальную оптическую толщину среды, при которых возможно

определение дисперсных характеристик среды турбидиметрическим методом.

Преимуществом данной оценки является то, что при использовании этой измерительной системы нет необходимости знать исходную концентрацию частиц в исследуемом образце, важно лишь, чтобы оптическая толщина, создаваемая исследуемым образцом, удовлетворяла допустимому диапазону.

Экспериментальные исследования проводилось в соответствии с методикой, изложенной в работе [4]. Излучение лампы обратной волны с использованием оптической системы коллимируется и направляется в кювету с рассеивающей средой. Ослабленное дисперсной средой оптическое излучение регистрируется спектрометром. Суть эксперимента заключается в регистрации ослабления оптического излучения в зависимости от концентрации частиц раствора. Пропускание рассеивающей среды определяется, как отношение интенсивности прошедшего излучения I к падающему I_0 , тогда спектральный коэффициент пропускания будет определяться отношением (1).

$$T(\lambda_i) = \frac{I(\lambda_i)}{I_0(\lambda_i)}. \quad (1)$$

Ослабление света рассеивающей средой определяет закон Бугера-Ламберта-Бера:

$$T = e^{-\tau}, \quad (2)$$

где $\tau = k \cdot l$ – оптическая толщина рассеивающей среды, k – показатель поглощения, l – оптическая длина пути.

Для удобства представим выражение (2) в логарифмическом виде:

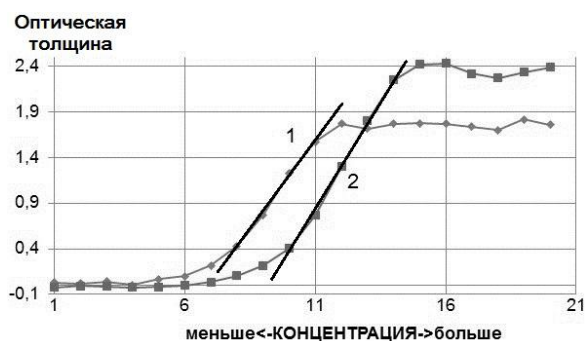
$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \tau, \quad (3)$$

в соответствии, с которым будем проводить вычисления.

В качестве рассеивающей среды будем использовать водный раствор молока, который можно рассматривать как взвесь сферических частиц. Для того чтобы построить более информативную зависимость оптической толщины от концентрации частиц в выбранном диапазоне длин волн было проведено измерение ослабления оптического излучения для разных концентраций раствора молока (концентрации раствора молока в образцах приведены в таблице 1). На рисунке 4 представлены зависимости для двух длин волн. Эти длины волн соответствуют начальной и конечной длинам волн оптимального диапазона.

Таблица 1 – Концентрации использованных растворов молока

Номер образца	Концентрация, отн.ед.
1	1
2	0,5
3	0,25
4	0,125
5	0,0625
6	0,03125
7	0,015625
8	0,007812
9	0,003906
10	0,001953
11	0,000976
12	0,000488
13	0,000244
14	0,000122
15	0,000061
16	0,000030
17	0,000015
18	0,000007
19	0,000003
20	0,000001



1 – длина волны 500,0 нм;
2 – длина волны 1030,0 нм.

Рисунок 4 – Зависимости оптической толщины от концентрации частиц раствора молока

Зависимость 1 на рисунке 4 (длина волны 500,0 нм) показывает, что линейная зависимость измеряемой оптической толщины от концентрации эмульсии находится в диапазоне оптических толщин от 0,4 до 1,6. Для зависимости 2 (длина волны 1030,0 нм) от 0,4 до 2,2. Исходя из этого, можно сделать вывод

об общей области оптической толщины для указанных длин волн, которая располагается от 0,4 до 1,6.

ВЫВОДЫ

В результате экспериментальных исследований установлено, что в диапазоне оптических толщин исследуемой дисперсной среды от 0,4 до 1,6 осуществляется выполнимость закона Бугера-Ламберта-Бера, при этом в диапазоне длин волн регистрируемых спектрометром от 500,0 нм до 1030,0 нм отношение сигнал/шум не превышает 5 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. Титов, С. С. Турбидиметрический высоко-селективный метод и быстродействующий измерительный комплекс определения параметров нестационарных многофазных сред : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.01 : защищена 08.12.2011 / Титов Сергей Сергеевич. – Бийск, 2011. – 153 с.

3. Загоруйко, А. С. Проверка линейности и построение характеристик фотодетекторов при помощи светофильтров с неизвестным пропусканием / А. С. Загоруйко, Ю. В. Троицкий // Автометрия. – 1982. – № 2. – С. 93–95.

4. Зуев, В. Е. Оптика атмосферного аэрозоля / В. Е. Зуев, М. В. Кабанов. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1987. – 255 с.

5. ГОСТ 9411-91 Стекло оптическое цветное. Технические условия. – Взамен ГОСТ 9411-81 ; введ. 01.01.93. – М. : Изд-во стандартов, 1992. – 49 с.

Жирнов Анатолий Алексеевич, младший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской

ской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), Россия, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, тел.: 8 (3854) 30-58-47, e-mail: toluol_88@mail.ru.

Мецлер Эдуард Андреевич, младший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), Россия, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, тел.: 8 (3854) 30-58-47, e-mail: mezlered@mail.ru.

Титов Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), Россия, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, тел.: 8 (3854) 30-17-25, e-mail: titov@ipcet.ru.

Павленко Анатолий Александрович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), Россия, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, тел.: 8 (3854) 30-14-43, e-mail: pavlenko@ipcet.ru.

Кудряшова Ольга Борисовна, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), e-mail: olgakudr@inbox.ru.