

МЕТОД ФЛЮКТУАЦИЙ ПРОЗРАЧНОСТИ И ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ И РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ В ВОДНЫХ СИСТЕМАХ

В.И. Букатый, П.И. Нестерюк

В работе рассмотрен метод флюктуаций прозрачности для определения среднего размера и концентрации частиц в водной среде и описан разработанный авторами на его основе лабораторный комплекс, проведена апробация на оптических неоднородностях в дважды дистиллированной воде.

Ключевые слова: вода, флюктуации, полупроводниковый лазер, прозрачность, гидро-золь.

Известно, что одним из важных параметров, характеризующих качество воды, является её оптическая прозрачность. Прозрачность водных систем во многих случаях позволяет определить наличие в них загрязняющих веществ, обладающих как истинным поглощением (например, фенол), так и присутствующих в воде частиц различного происхождения, так называемых гидрозолей, ослабление света на которых обусловлено процессами рассеяния и поглощения. На практике в водоемах прозрачность жидкой воды в большей степени обусловлена именно наличием гидрозолей, прежде всего, их концентрацией и размерами, поэтому определение вышеуказанных характеристик дисперсности частиц является актуальной задачей.

Опыты по измерению оптической прозрачности показывают, что если частиц в световом пучке сравнительно немного, то она испытывает заметные флюктуации. Данные флюктуации вызваны случайными перемещениями частиц. Часто в подобных экспериментах эти флюктуации усредняются и считаются помехой. В действительности, дисперсия прозрачности, кроме величины оптической толщины τ , зависит непосредственно от числа частиц и их размеров в изучаемом объеме, так что одновременные измерения прозрачности и её дисперсии позволяют определить средний размер и концентрацию частиц. В этом заключается сущность теоретического метода флюктуаций прозрачности, рассмотренного в [1].

Для построения данного метода принимается, что частицы в водной среде расположены в пространстве случайно. Рассмотрим прохождение параллельного пучка света через слой частиц в данной дисперсной водной среде, следуя работе [2]. Примем для простоты, что наша дисперсная среда состо-

ит из одинаковых частиц сферической формы и что ослабление интенсивности прошедшего параллельного пучка света I обусловлено только наличием частиц в освещенном объеме (истинное поглощение водой считается пренебрежимо малым).

Для наглядности модели явления рассмотрим проекции поперечника ослабления всех частиц, находящихся в освещенном объеме, на поперечное сечение падающего светового пучка S . Обозначив через Y площадь пучка, свободной от проекций частиц, то интенсивность света, прошедшего сквозь дисперсную систему, можно выразить соотношением $I = I_0 Y / S$, где I_0 – интенсивность падающего пучка. Таким образом, по данным измерений среднего значения и дисперсии случайной величины Y , можно найти среднее значение интенсивности прошедшего света и её дисперсию.

Статистическая модель явления сводится, следовательно, к задаче о случайном бросании кругов на плоскость. Моменты этой случайной величины определяются при помощи известной теоремы Г. Робинса, вытекающей из общих свойств условных математических ожиданий, установленных А.Н. Колмогоровым [2].

Опуская промежуточные математические выкладки, можно записать окончательные формулы, позволяющие определить средний поперечник ослабления света частицей s_0 и концентрацию частиц $\bar{n}$ через среднюю интенсивность $\bar{I}$ прошедшего через водную среду параллельного пучка света, дисперсию сигнала (интенсивности прошедшего пучка света I) D и площадь сечения пучка S

МЕТОД ФЛЮКТУАЦИЙ ПРОЗРАЧНОСТИ И ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ И РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ В ВОДНЫХ СИСТЕМАХ

$$s_0 = (D/I_0^2) [S\tau / \varphi(\tau)];$$

$$\bar{n} = \tau / (Is_0); \tau = -\ln(\bar{I} / I_0), \quad (1)$$

где τ – оптическая толщина дисперсной среды, $\varphi(\tau)$ – специальная функция, значения которой приведены в [1], l – длина пути в среде. Запишем выражение для дисперсии сигнала D

$$D = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{N=1}^N (I_i - \bar{I})^2, \quad (2)$$

где N – число измерений.

Данный метод многими авторами проверялся на модельных взвешях в водных системах со сферическими и несферическими частицами. Например, в работе [2] описаны опыты с шариками полистирола диаметром 50-54 мкм, взвешенными в воде.

Погрешность в определении размера частиц полистирола по результатам измерений авторов составила около 20 %.

В [1] рассмотрены примеры использования данного метода для определения размеров частиц в диапазоне (5-50) мкм. Проведенный нами анализ применимости данного метода показал, что его можно использовать для определения гидрозолей с размерами ~ 1 мкм и выше, т.е. для так называемых оптически активных частиц.

Принципиальная схема разработанного нами лабораторного комплекса для реализации метода флуктуаций прозрачности приведена на рисунке 1. В качестве источника излучения 1 использовался полупроводниковый лазер с длиной волны $\lambda_0 = 0,64$ мкм и мощностью ~ 1 мВт, с питанием от аккумуляторов для обеспечения стабильности излучения и угловой расходимостью лазерного пучка $\alpha \approx 10^{-3}$ рад. Диаметр выходного лазерного пучка составлял 3 мм. Цифрами 2 и 3 на рисунке 1 отмечены диафрагмы, которые отсекали паразитное излучение от элементов оптической системы. После прохождения диафрагм лазерный пучок направлялся на спектрофотометрическую кювету 4 с исследуемой жидкостью с размерами $2 \times 3 \times 5$ см, оптический путь луча составлял 3 см. Рассеянный водой свет попадал на приемную длиннофокусную линзу 5 с фокусным расстоянием $F = 32$ см. Измерения рассеянного света производились в фокальной плоскости приемной линзы 5 с помощью фотодиодной линейки 7, сигнал с которой поступал на ЭВМ и обрабатывался с помощью специальной программы, разработанной в среде Lab View

7.1. Под цифрой 6 обозначена приемная диафрагма диаметром $R=1,5$ мм. На данном рисунке L – расстояние от кюветы до приемной линзы, которое в опытах составляло более 33 см, а β – максимальный угол рассеянного излучения, попадающего в приемную систему ($\beta \sim 17^\circ$).

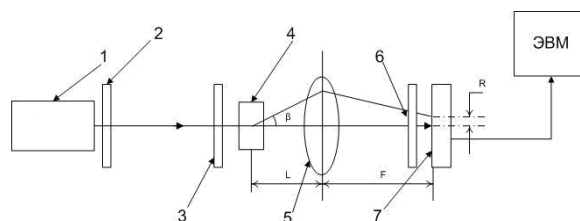


Рисунок 1. Принципиальная схема лабораторного комплекса.

В качестве приемника излучения, нами была выбрана фотодиодная линейка ФУК1Л1, созданная по технологии приборов с зарядовой связью (ПЗС). Она представляет собой линейное многоэлементное фотоприемное устройство для преобразования оптических изображений в видеосигнал, имеет 1024 фоточувствительных элементов с шагом 25 мкм. Размеры фоточувствительных элементов составляют 20×20 мкм. Зазор между фоточувствительными элементами равен 5 мкм. Область спектральной чувствительности по уровню 0,1 находится в интервале от 0,25 до 1,0 мкм.

Сигнал с фотодиодной линейки поступал на два каскада операционных усилителей типа AD823. После усиления сигнал попадал на аналогово-цифровой преобразователь и подвергался дискретизации. Оцифрованные данные поступали на управляющий контроллер, который сохранял их в оперативной памяти устройства (ОЗУ). По запросу программного обеспечения, сохраненные в ОЗУ данные, по интерфейсному кабелю через USB-порт поступали в ЭВМ, где осуществлялась их окончательная обработка в среде Lab View 7.1. Используемое в нашей работе фотоприемное устройство и программное обеспечение к нему разработаны В.Ю. Бортниковым [3].

С помощью данного комплекса измерялась интенсивность излучения, прошедшего через кювету с объектом лазерного пучка, падающего под прямым углом. Первоначальная обработка сигнала с приемного устройства осуществлялась в среде Lab View 7.1. Для автоматизации расчетов концентрации среднего размера частиц, согласно формулам (1) и (2), было разработано приложение на осно-

ве программного продукта Microsoft Office Excel 2003.

Объектом исследования для апробации метода служила дважды дистиллированная вода. Основанием для выбора объекта исследования послужили работы [4, 5], в которых исследовались частицы (оптических неоднородностей) в дважды дистиллированной воде.

Было проведено 4 серии измерений прозрачности, в каждой серии регистрировались 10 значений прозрачности с интервалом в 5 с. Приведем расчет среднего значения s_0 в соответствии с (1). Используя вычисленные средние значения величин, входящих в (1), а именно $D/I_0^2 = 2,5 \cdot 10^{-6}$, $\tau = 0,9$,

$\phi(\tau) = 0,16$, $S = 1,8 \text{ мм}^2$, получаем

$s_0 = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^2$. Так как в нашем случае $\rho \gg 1$ ($\rho = 2\pi r / \lambda$, r – радиус частиц, λ – длина волны света в воде, $\lambda = \lambda_0 / n$, λ_0 – длина волны света в вакууме, n – показатель преломления воды), можно записать

$s_0 = 2\pi r^2$, откуда $r = \sqrt{\frac{s_0}{2\pi}} = 2,0 \text{ мкм}$.

Средняя концентрация при вышеуказанных

средних значениях τ , s_0 , и $l = 30 \text{ мм}$ оказалась равной $\bar{n} = 1,2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$.

Полученный методом флюктуаций средний радиус частиц хорошо согласуется с нашими данными, определенными независимым методом малых углов рассеяния.

Используемый в экспериментах лабораторный комплекс может быть легко преобразован в портативный прибор для работы в натурных условиях, путем использования обычного ноутбука и герметичной камеры для расположения оптической части устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 278 с.
2. Шифрин К.С., Мороз Б.З., Сахаров А.Н. // ДАН СССР. – 1971. – Т. 199. – №3. – С. 581-598.
3. Бортников В.Ю. Программно-аппаратный комплекс и методы исследования микрофизических параметров и элементного состава городского аэрозоля (на примере г. Барнаула). Дис. к. техн. наук. – Барнаул, 2008. – 111 с.
4. Бункин Н.Ф., Лобеев А.В. // Письма в ЖЭТФ. – 1993. – Т. 58. – Вып. 2. – С. 91-97.
5. Бункин Н.Ф., Суязов Н.В., Ципенюк Д.Ю. // Квантовая электроника – 2005. – Т. 35. – № 2. – С. 180-184.

МОНИТОРИНГ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА АЭРОЗОЛЬНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ СНЕГОВОГО ПОКРОВА Г. БАРНАУЛА ЗА ПЕРИОД 2002-2011 ГГ.

Т.В. Андрухова, В.И. Букатый, И.А. Суторихин

Изучена динамика загрязнения приземной атмосферы г. Барнаула за период с 2002 по 2011 гг. с использованием природных планшетов. Отбирались и анализировались образцы снега, в опорных пунктах г. Барнаула. Проводился количественный спектральный анализ твердого аэрозольного остатка, полученного путем вытаивания снеговых пробы, а также измерялись следующие характеристики: pH снеговой воды, электропроводность, приток пыли. Изучена микроструктура аэрозоля и проанализирована динамика концентрации химических элементов в пробах.

Ключевые слова: приземный атмосферный аэрозоль, микрофизические характеристики, природные планшеты, снеговой покров, атомно-эмиссионный спектральный анализ, рентгенофлуоресцентный анализ.

Исследования микрофизических характеристик приземного атмосферного аэрозоля, в т.ч. его элементного состава, являются важной составляющей системы мониторинга загрязнения окружающей среды. В условиях крупных промышленных городов, к числу ко-

торых можно отнести г. Барнаул, наиболее опасными источниками загрязнения атмосферы являются выбросы промышленных предприятий, топливно-энергетических комплексов, автотранспорта, топок печного отопления (на угле) частного сектора. Подроб-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4-2 2011