

УДК 535:621.373.826; 536.5

## ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА КАРТИНЫ РАССЕЙНИЯ МИКРОЧАСТИЦАМИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЕ ИХ РАЗМЕРОВ

Н.Г. Кокодий, С.В. Лизогубенко

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Украина, 61077, Харьков, пл. Свободы, 4  
Поступила в редакцию 20 мая 2011 г.

Рассматривается метод определения размеров микрочастиц, используя оцифрованное изображение индикатрисы рассеяния. Для исследования используется оптический метод. Он заключается в том, что исследуемое вещество, состоящее из микрочастиц, освещают пучком оптического излучения и регистрируют индикатрису рассеяния света. После проводится цифровая обработка полученной картины рассеяния и измерение размера частиц двумя различными способами.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** картина рассеяния, диаметр частиц, индикатриса рассеяния, яркость светового пятна, интенсивность луча

Розглядається метод визначення розмірів мікрочастинок, за допомогою використання оцифрованого зображення індикатрисы розсіювання. Для дослідження використовується оптичний метод. Він полягає в тому, що досліджувану речовину, що складається з мікрочастинок, освітлюють пучком оптичного випромінювання і реєструють індикатрису розсіювання світла, яке пройшло. Після проводиться цифрова обробка отриманої картини розсіювання і вимір розміру часток двома різними способами.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** картина розсіювання, діаметр частинок, індикатриса розсіювання, яскравість світлової плями, інтенсивність променя

Considered the method of defining the size of microparticles, using a digitized image of the scattering. For research the optical method is used. It consists in that the researched substance, consisting of microparticles, is illuminated with the beam of optical radiation and then the scattering of the transmitted light is registered. After this, the digital processing of resulting scattering pattern is carried out and held the measurement of particle size in two different ways.

**KEY WORDS:** scattering pattern, diameter of the particles, scattering, brightness of the light spot, beam intensity

### ВВЕДЕНИЕ

При решении многих задач физики, техники, химии, биологии, экологии необходимо определять распределение по размерам и оптические свойства совокупностей твердых или жидких частиц, провести изучение их дисперсного состава. К числу таких задач относятся:

- определение фракционного состава промышленной пыли;
- измерение размеров капель влаги в газовых потоках, охлаждающих лопатки турбин;
- определение дисперсного состава аэрозолей из аэрозольных упаковок;
- определение размеров шлифовальных порошков;
- измерение размеров частиц эмульсий и суспензий и др.

При размерах частиц от 10 нм до 100 мкм для этого удобно использовать методы, основанные на измерении характеристик света, рассеянного частицами. Математическая задача, которую необходимо решить, относится к обратным задачам оптики - по результатам взаимодействия излучения и объекта нужно определить параметры объекта. Обычно такие задачи относятся к некорректным. В них малые ошибки в исходных данных приводят к большим ошибкам в результатах. Разработано много методов решения этих задач. Большинство их основано на статистической обработке данных, что требует проведения большого количества численных расчетов. Они интенсивно развиваются в настоящее время, когда появились хорошие математические программы для быстродействующих компьютеров. Использование компьютеров дает также возможность использовать при решении задач математическое моделирование.

В оптических методах измерения частиц используется тот факт, что картина рассеяния света частицами зависит от отношения  $d/\lambda$  ( $d$  – диаметр частицы,  $\lambda$  – длина волны излучения)[2]. Для детектирования картины рассеяния используются одиночные фотоприёмники и ПЗС-матрицы. В первом

случае осуществляется пространственное сканирование. Использование же ПЗС-матриц облегчает измерения. Но матрицы очень малы – 1..2 см, а картина рассеяния может довольно большой.

Под рассеянием света в оптике понимают круг явлений, связанных с отклонением от законов геометрической оптики, возникающих при прохождении света в среде, имеющей оптически неоднородные области, в частности, в среде с непрозрачными преградами. В данной статье рассматривается дифракция света на хаотически расположенных непрозрачных круглых частицах. На пути лучей света такие частицы представляют собой непрозрачные преграды в форме дисков. Согласно принципу Гюйгенса точки волнового фронта можно рассматривать как центры вторичных возмущений, которые вызывают элементарные сферические волны, а волновой фронт в любой более поздний момент времени является огибающей этих волн.- Френель смог объяснить явление дифракции света, дополнив принцип Гюйгенса утверждением, что вторичные волны интерферируют между собой. Это сочетание принципа Гюйгенса с идеей интерференции получило название принципа Гюйгенса-Френеля [3].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Метод компьютерной обработки картины рассеяния света, который производится при помощи цифровой камеры, предложен в этой статье.

Для того, чтобы испробовать этот метод была выбрана пыльца растения. С хорошим приближением можно сказать что частички имеют сферическую форму, и их размеры приблизительно 15..20 мкм. Результаты измерений можно сравнить с результатом, полученным микроскопическим методом.

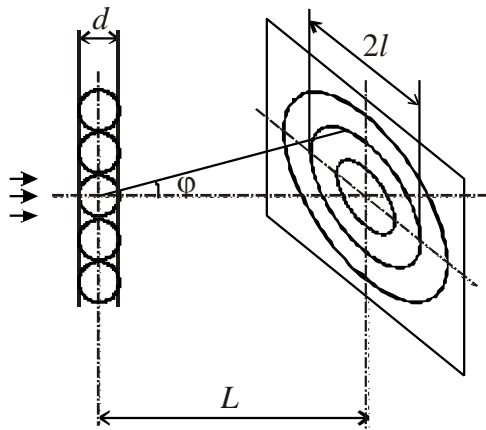


Рис. 1. Схема эксперимента.

Схема эксперимента показана на рис. 1. Камеру с круглыми частицами помещена на такое расстояние от экрана, чтобы выполнялось неравенство  $L \gg d$ , где  $d$  – диаметр частичек, а  $L = 307$  мм - расстояние от исследуемых частиц до экрана. Частицы расположены между двумя стеклянными пластинками. Лазерное излучение ( $\lambda = 0.65$  мкм) проходит сквозь пластинки кюветы и падает на экран. Поскольку лазерный пучок имеет ничтожно малый угол расхождения, то можно считать, что кювета освещается практически параллельным пучком лучей. Таким образом, условия  $L \gg d$  с достаточной степенью точности выполнены и в данном случае применимо приближение Фраунгофера, т.е. можно говорить о дифракции Фраунгофера от диска, что существенно упрощает задачу расчета дифракционной картины.

Попадание в область луча большого числа  $N$  мелких частиц усиливает по интенсивности дифракционную картину от каждой частицы в  $N$  раз. Поскольку область лазерного пучка очень маленькая, то все частицы, попавшие в эту область, дают очень близко расположенные на экране дифракционные картины. В результате получается достаточно резкая результирующая дифракционная картина, представляющая собой систему чередующихся широких темных и светлых концентрических колец. Угловые размеры колец могут быть найдены из рассмотрения дифракционной задачи плоской электромагнитной волны на сфере. Если диаметр частиц  $d$  намного больше чем длина волны излучения  $\lambda$ , то форма картины рассеяния света хорошо описывается приближенной формулой [1]:

$$F(\varphi) = \rho^4 * \left( \frac{J_1(\rho\varphi)}{\rho\varphi} \right)^2 \quad (1)$$

Где  $\rho = \pi d / \lambda$ ,  $\varphi$  – угол рассеяния,  $J_1(z)$  – функция Бесселя первого рода. Размеры дифракционных колец (позиции минимумов и максимумов интенсивности) определяются нулями функции Бесселя:

$$\varphi_k = p_k * \lambda / d \quad (2)$$

$$p_1 = 1.22 - \text{min}, p_2 = 1.64 - \text{max}, p_3 = 2.22 - \text{min}.$$

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

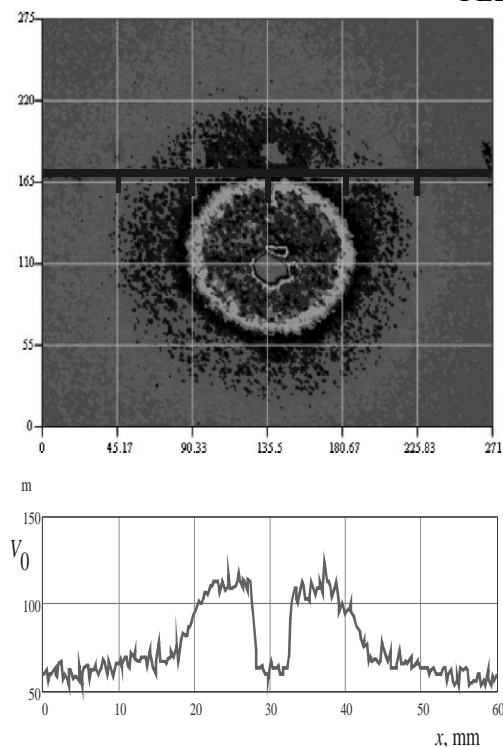


Рис.2. Изображение картины рассеяния.

Картина рассеяния и график распределения интенсивности по диаметру картины показан на рис. 2. Прямой луч лазера проходит через отверстие в экране, для того чтобы высокая интенсивность луча не влияла на камеру. На рисунке эта область соответствует провалу интенсивности в центре изображения картины рассеяния. Тёмное кольцо это область первого минимума функции  $F(\varphi)$ . Горизонтальная линии с делениями – это шкала, нанесённая на экран для определения масштаба изображения и диаметров дифракционных колец. Расстояние между двумя большими делениями равно 10 мм. Отсюда, зная количество пикселей цифровой фотографии на 1 см, можно найти масштаб полученного изображения.

Радиус тёмного кольца равен  $l_1 = 14$  мм. При этом угол  $\varphi_1 = 0.456$  рад. Отсюда получаем диаметр частиц  $d=18$ .

Основной источник погрешности – погрешность определения масштаба и измерения положения минимумов и максимумов интенсивности. Она составляет  $\approx 10\%$ . Поэтому при измерении диаметра частиц  $d$  абсолютная погрешность составляет 1.8 мкм. Так что  $d=18 \pm 1.8$  мкм.

Также существует возможность измерения размеров частиц иным способом. Для этого была измерена амплитудная характеристика цифрового фотоаппарата. Были сделаны фотографии световых пятен лазерного излучения различной интенсивности. Интенсивность менялась поляризатором. Также между поляризатором и экраном располагалась рассеивающая линза, которая служила для увеличения размера пятна на экране, с целью дальнейшего удобства обработки цифровых изображений. В оцифрованном виде пятно представляет собой изображение представленное на рис. 3. После получения изображения, была проведена процедура усреднения яркости по площади пятна.

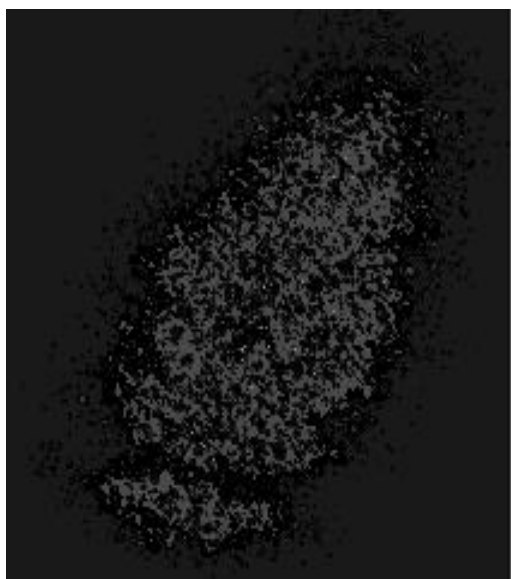


Рис. 3. Пятно, полученное при помощи рассеивающей линзы

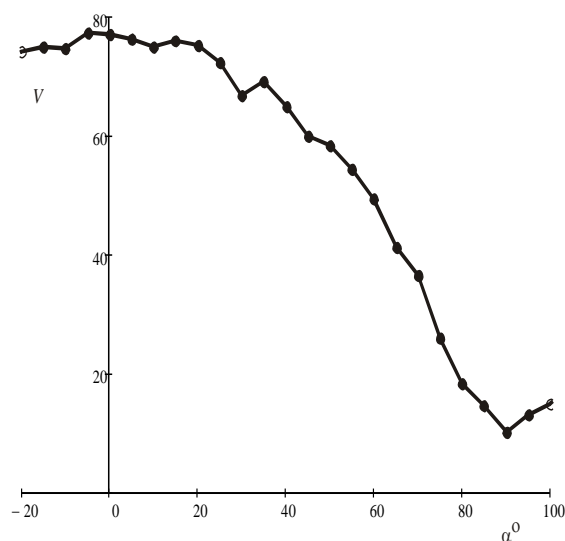


Рис. 4. Зависимость сигнала цифровой камеры от угла поворота поляризатора

Далее, чтобы получить амплитудную характеристику был использован закон Малюса:  $I = I_0 * \cos^2 \alpha$ , где  $\alpha$  – угол между осью поляризатора и направлением распространения вектора

поляризации излучения. Зависимость яркости светового пятна (сигнал от камеры  $V$ ) от угла  $\alpha$  показана на рис. 4. То, что график не опускается до нуля, объясняется неполной поляризацией лазерного излучения.

Был выбран интервал между углами от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  и построен график зависимости интенсивности лазерного излучения от сигнала цифровой камеры в относительных единицах (рис.5.). Эта зависимость была аппроксимирована степенной функцией:

$$I = 2.13 \cdot 10^{-4} V^2$$

Экспериментальная картина рассеяния, полученная с использованием этой функции, показана на рис. 6 точками, а аппроксимирующая функция  $F(a, \rho, \varphi) = a \cdot \left( \frac{J_1(\rho\varphi)}{\rho\varphi} \right)^2$ , с найденными при помощи

метода наименьших квадратов параметрами  $a$  и  $\rho$ , показана сплошной линией. Было получено:  $\rho = 68.8$ . Сравнивая аппроксимирующую функцию с теоретической функцией распределения (1) мы можем найти радиус исследуемых частиц. При длине волны лазерного излучения  $\lambda = 0.65$  мкм диаметр частицы равен:  $d = \rho \cdot \lambda / \pi = 14.2$  мкм

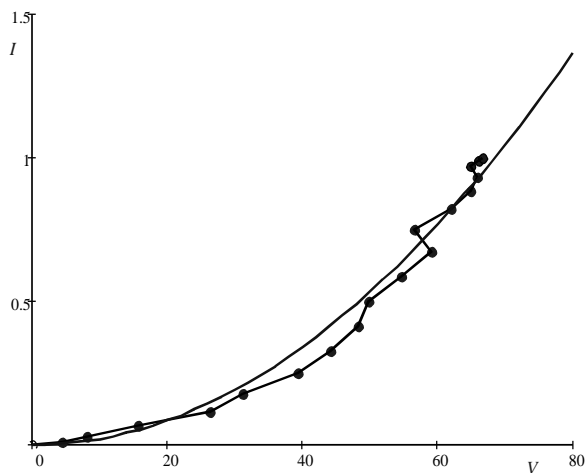


Рис. 5. Калибровочная кривая.

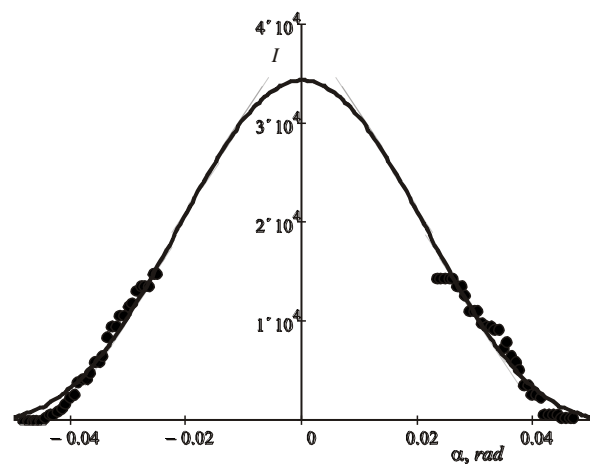


Рис. 6. Функция рассеяния света

## ВЫВОДЫ

В этой статье была исследована возможность анализа индикатрисы рассеяния света малыми частицами методом анализа цифрового изображения. Полученные значения близки к значению, полученному путём анализа положения первого минимума интенсивности и значению, найденному микроскопическим методом, что является довольно неплохим результатом, учитывая дешевизну и доступность такого метода цифровой обработки картины рассеяния.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hulst van de H.C. Light scattering by small particles.–DOVER PUBLICATION, 1981.– 478 P.
2. В.Н. Лопатин, А.В. Приезжев, А.Д. Апонасенко, Н.В. Шепелевич. Методы светорассеяния в анализе дисперсных биологических сред. – М.: ФИЗМАТЛИТ – 2004. – 384 с.
3. Т. И. Трофимова, А. В. Фирсов. Курс физики. Колебания и волны. Теория, задачи и решения:— М.: Академия, 2003 г.- 256 с.
4. С.П. Беляев, Н.К. Никифорова, В.В. Смирнов, Г.И. Щелчков. Оптико-электронные методы изучения аэрозолей. – М.: Энергоиздат – 1981. – 232 с.