

УДК 535.3

## ИЗМЕРЕНИЕ РАЗМЕРОВ МИКРОЧАСТИЦ ПО УГЛОВОМУ РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ИНТЕНСИВНОСТИ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Бобученко Д. С.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Рассмотрены различные методы определения размеров микрочастиц, показана возможность использовать для этих целей измерение углового распределения интенсивности рассеянного излучения.

**Ключевые слова:** индикатриса излучения, ситовый анализ, седиментационный анализ, метрический метод, статический анализ рассеяния излучения.

## MEASURING THE SIZE OF MICROPARTICLES BY THE ANGULAR DISTRIBUTION OF THE SCATTERED RADIATION INTENSITY

Babuchenka D.

*Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** Various methods for determining the size of microparticles are considered, and the possibility of using the measurement of the angular distribution of the intensity of scattered radiation for these purposes is shown.

**Key words:** radiation indicatrix, sieve analysis, sedimentation analysis, metric method, static analysis of radiation scattering.

*Адрес для переписки: Бобученко Д. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: dbobuchenko@gmail.com*

В повседневной жизни мы постоянно окружены различными микрочастицами. Они представляют собой взвешенные в газообразной среде (в воздухе) твердые (дым), жидкие частицы (туман), также кровь представляет собой суспензию в плазме и др. Они играют важную роль в различных сферах жизнедеятельности человека. Размеры частиц изменяются в широком диапазоне от нескольких нанометров до сотен микрон. В настоящее время существует большое число разнообразных методов определения размеров частиц. Рассмотрим основные из них.

**Ситовый метод.** В этом методе распределение частиц по размерам осуществляется просеиванием порошка через набор стандартных сит, в которых размер отверстий последовательно уменьшается сверху вниз, в результате чего просеянный материал разделяется на фракции по размерам [1]. Этот метод имеет ряд ограничений: 1. для проведения данного анализа требуется большое количество исследуемого материала; 2. данный метод не эффективен к нес्यпучим материалам, забивающим отверстия сита; 3. при проведении анализа следует контролировать температуру окружающей среды и влажность, если исследуемые образцы легко теряют влагу или наоборот гигроскопичны; 4. если используются материалы которые электризуются, то следует к образцу добавлять антистатик, который меняет состав и массу материала.

**Седиментационный анализ и центрифугирование.** Этот метод основан на зависимости скорости осаждения однородных частиц от их размеров. Грубодисперсные системы изучают методом

седиментации в гравитационном поле, а тонкодисперсные и коллоидно-дисперсные – методом седиментации в центрифуге. В вязкой и плотной среде при седиментации частица движется под действием силы тяжести в гравитационном поле. Сила сопротивления среды, действующая на сферическую частицу, зависит от ее размера, скорости движения, вязкости среды [1]. В центрифуге разделение веществ основано на разном поведении частиц в центробежном поле. Суспензию частиц, помещенную в пробирку, загружают в ротор, установленный на валу привода центрифуги. В центробежном поле частицы, имеющие разную плотность, форму и размеры, осаждаются с разной скоростью. Скорость седиментации зависит от центробежного ускорения, прямо пропорционального угловой скорости ротора и расстоянию между осью вращения и частицей.

**Метрический метод с помощью электронной микроскопии.** В этом методе размер частиц устанавливается по их изображениям, полученным с электронного микроскопа. На микроскопе можно определить размер частиц с разрешающей способностью при использовании детектора вторичных электронов от 0,003 мкм. Электронная микроскопия с анализом изображения позволяет определить не только мелкодисперсную фракцию менее 0,1 мкм, но и исследовать форму частиц порошкообразной смеси, что невозможно определить рассмотренными выше методами. Однако этот метод требует высокой квалификации персонала, подготовки материала для работы с микроскопом и последующей обработки результатов [1].

**Кондуктометрический анализ.** Это ряд методов основанных на измерении электропроводности материала [2]. Кондуктометрические методы подразделяются на прямые методы анализа (используемые, например, в солемерах) и косвенные методы (используемые в газовом анализе). Прямая кондуктометрия - это метод, непосредственного определения концентрации электролита путем измерения электропроводности раствора с известным качественным составом. Косвенные методы заключаются в определении содержания вещества по излому кривой титрования.

**Метод динамического рассеяния света.** Метод динамического рассеяния света используется для измерения размеров частиц порядка  $10^{-9}$  м. Основная идея метода заключается в измерении флуктуаций рассеянного света при прохождении светового пучка через среду. Возникающие локальные флуктуации концентрации частиц в среде вследствие броуновского движения дисперсных частиц или макромолекул приводит к локальным неоднородностям показателя преломления. Вследствие чего при прохождении светового пучка через такие локальные неоднородности показателя преломления возникают флуктуации интенсивности рассеянного света. Измеряя время затухания экспоненциальной временной корреляционной функции рассеянного света с помощью цифрового коррелятора можно оценить коэффициент диффузии частиц, который обратно пропорционален времени релаксации флуктуаций интенсивности рассеянного света. Далее по формуле Стокса-Эйнштейна  $D = \frac{kT}{6\pi\eta r}$ , где  $D$  – коэффициент диффузии,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $\eta$  – вязкость среды, можно определить размер частиц  $r$  (гидродинамический радиус) [3].

**Метод статического анализа рассеяния света.** Электромагнитная волна при взаимодействии с частицей аэрозоля преломляется, отражается и поглощается частицей, испытывает дифракцию. Угловое распределение интенсивности рассеянного излучения, называемое индикатрисой рассеяния, зависит от размера, формы, относительного показателя преломления, и может быть рассчитана по теории Ми [4]:

$$i(\theta) = \frac{1}{2} (|S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2),$$

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \{a_n \pi_n + b_n \tau_n\},$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \{a_n \tau_n + b_n \pi_n\}.$$

В этих формулах  $a_n$ ,  $b_n$  – коэффициенты Ми, зависящие от функций Риккати – Бесселя и их производных. Аргументами этих функций являются: параметр дифракции  $x = \frac{2\pi}{\lambda} r$  и относительный показатель преломления материала частицы. Угловые функции  $\tau_n$  и  $\pi_n$  зависят от присоединных полиномов Лежандра и могут быть рассчитаны стандартными методами [4].

На рисунке представлены результаты расчетов индикатрисы рассеяния для водных сферических капель для различных параметров дифракции.

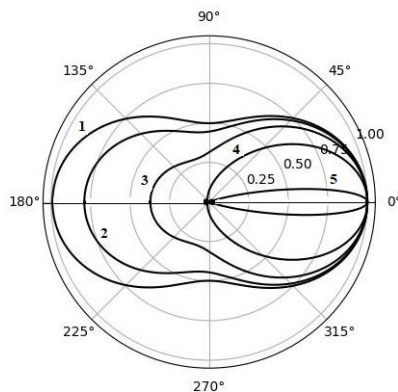


Рисунок 1 – Зависимость относительной интенсивности рассеянного излучения от угла рассеяния для параметра дифракции  $x = 0,1$  (1);  $0,5$  (2);  $1,0$  (3);  $2,0$  (4);  $10,0$  (5)

Как следует из вычислений угловое распределение рассеянного излучения существенно зависит от размера частиц, и может лежать в основе определения радиусов частиц. Если размер частицы меньше длины волны падающего излучения, то оно рассеивается примерно одинаково под разными углами, и определение размеров частиц должно детектироваться под большими углами. Если радиус частицы больше, чем длина волны, то рассеяние происходит вперед, измерение распределения интенсивности излучения должно проводиться в прямом направлении для малых углов рассеяния.

#### Литература

1. Волков, В. А. Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы: учебники для вузов. СПб.: Спец. литература, 2015. – 660 с.
2. Брайнина, Х. З. Инверсионные электроаналитические методы / Х. З. Брайнина, Е. Я. Нейман, В. В. Слепушкин. – М.: Химия, 1988. – 239 с.
3. Казаков А. Н. Динамический анализ микроструктурных ориентировок минералов. – СПб.: Наука, 1987. – 272 с.
4. Борен, К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / К. Борен, Д. Р. Хафман. – М.: Мир, 1986. – 664 с.