

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ ЧАСТИ
ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ
СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ ПО КОМПОНЕНТАМ
МАТРИЦЫ РАССЕЯНИЯ

Е. К. Науменко, Т. В. Олейник и А. Я. Хайруллина

Предложены методы измерения действительной части показателя преломления мягких сферических частиц, моделирующих элементы крови и хлоропласты. Они основаны на определении углов, при которых элементы матрицы рассеяния $f_{33}(n, \kappa, \rho_0, \gamma) = 0$ и $f_{34}(n, \kappa, \rho_0, \gamma) = 0$. Методы применимы в интервале значений $n = 1.02 \div 1.15$, относительная погрешность определения $(n-1)$ не превышает 15%.

Вопросу определения показателя преломления вещества в дисперсном состоянии посвящено значительное количество публикаций [1-5]. Однако рассмотренные в них методики применимы или к монодисперсной среде или предполагают знание распределения частиц по размерам с высокой степенью точности. В настоящей работе для случая сферических частиц на основе анализа угловой структуры компонент матрицы рассеяния получены корреляционные зависимости, позволяющие определить действительную часть относительного показателя преломления для сред, в которых параметры распределения и мнимая часть показателя преломления варьируют в довольно широких пределах.

Для полидисперсной среды с гамма-распределением «мягких» частиц по размерам $f(r) = A_1 r^\mu \exp\left(-\mu \frac{r}{r_0}\right)$ (r_0 — наиболее вероятный радиус частиц, μ — параметр, характеризующий полуширину функции распределения по размерам, A_1 — нормировочный множитель) были вычислены компоненты приведенной матрицы рассеяния $f_{ik}(n, \kappa, \rho_0, \gamma) = \frac{a_{ik}(n, \kappa, \rho_0, \gamma)}{a_{11}(n, \kappa, \rho_0, \gamma)}$ [6] в области углов $40^\circ \leq \gamma \leq 150^\circ$ при следующих параметрах среды и $f(r)$: $n = 1.02 \div 1.15$; $\kappa = 0 \div 10^{-3}$ (n и κ — действительная и мнимая части относительного показателя преломления вещества частиц относительно среды), $\rho_0 = 2\pi r_0 / \lambda = 24(2)34$ (ρ_0 — параметр дифракции, λ — длина волны излучения в среде); $\mu = 8 \div 15$. Интегрирование проводилось в интервале $15 \leq \rho_0 \leq 55$ с шагом $\Delta\rho = 0.1$.

Выбранным для расчета значениям $n, \kappa, \rho_0, \gamma$ соответствуют оптические константы и параметры полидисперсности реальных частиц: сферулированных эритроцитов [7] и тромбоцитов [8], лейкоцитов цельной крови [9], хлоропластов [10].

Заметим, что для исследуемой системы полидисперсных сферических частиц матрица рассеяния имеет восемь отличных от нуля элементов

$$\begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & 0 & 0 \\ f_{21} & f_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_{33} & f_{43} \\ 0 & 0 & f_{43} & f_{44} \end{pmatrix},$$

где $f_{11} = f_{22}$, $f_{12} = f_{21}$, $f_{33} = f_{44}$, $f_{34} = f_{43}$, а четыре элемента матрицы независимы (f_{11} характеризует интенсивность рассеянного излучения, f_{12} связан со степенью поляризации рассеянного излучения, f_{33} — с ориентацией эллипса поляризации, f_{34} — с вытянутостью эллипса [6, 11]).

На основании исследования угловой структуры компонент матрицы рассеяния $f_{33}(n, \kappa, \rho_0, \gamma)$, $f_{34}(n, \kappa, \rho_0, \gamma)$, $f_{21}(n, \kappa, \rho_0, \gamma)$ предлагается метод определения действительной части относительного показателя преломления n сферических частиц.

На рис. 1 приведены типичные зависимости элементов матрицы рассеяния $f_{33}(n, \kappa, \rho_0, \gamma)$, $f_{34}(n, \kappa, \rho_0, \gamma)$ при различных r_0 и фиксированных значениях n, κ, μ . Как показал проведенный анализ, для всех рассмотренных параметров

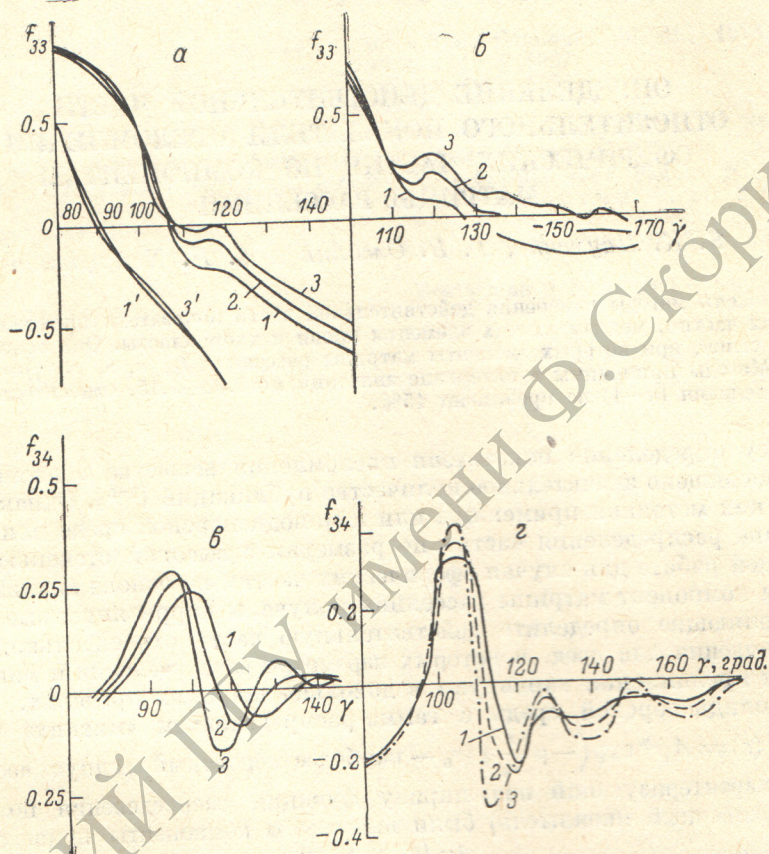


Рис. 1. Теоретически рассчитанные угловые зависимости элементов матрицы рассеяния $f_{33}(n, \kappa, \rho_0, \gamma)$ и $f_{34}(n, \kappa, \rho_0, \gamma)$ при $\kappa=10^{-4}$, $\lambda=0.6328$ мкм и различных r_0, μ, n .
 а: 1' и 3' — $n=1.02$; 1—3 — $n=1.065$; $\mu=10$; б и г — $n=1.08$, $\mu=8$; в — $n=1.04$, $\mu=12$. Цифры у кривых относятся к r_0 : 1, 1' — 3.4 мкм; 2 — 2.8 мкм; 3, 3' — 2.4 мкм.

n, κ, ρ_0, μ минимальные значения углов γ_1 , при которых $f_{33}(n, \kappa, \rho_0, \gamma)$ и $f_{34}(n, \kappa, \rho_0, \gamma)$ равны нулю, лежат в области $80-120^\circ$. При этом в области прохождения через нуль функция $f_{33}(n, \kappa, \rho_0, \gamma)$ имеет резкий угловой ход во всем диапазоне исследованных n , а $f_{34}(n, \kappa, \rho_0, \gamma)$ начиная с $n > 1.05$. Величина γ_1 элемента матрицы f_{33} практически не зависит от параметров $\kappa=0 \div 10^{-3}$; $r_0=2.4 \div 3.4$ мкм, $\mu=8 \div 12$ (рис. 1, а) в интервале $n=1.02 \div 1.07$ и определяется значением n . Большой разброс γ_1 для параметра f_{33} имеет место вне рабочего интервала n (рис. 1, б). Аналогичная зависимость наблюдается и для γ_1 элемента матрицы f_{34} (рис. 1, в) в интервале $n=1.02 \div 1.07$. Напротив, при $n=1.06 \div 1.14$ (рис. 1, г) имеет место слабая зависимость γ от κ, ρ_0, μ в указанном выше интервале значений и положение угла γ_1 является функцией только n . Отмеченные выше особенности в угловом ходе $f_{35}(n, \kappa, \rho_0, \gamma)$ и $f_{34}(n, \kappa, \rho_0, \gamma)$ были использованы для получения корреляционной зависимости γ_1 от действительной части относительного показателя преломления. Простая зависимость между $\Delta n = n - 1$ и γ_1 ($\gamma_1 = 80-120^\circ$) для элемента f_{33} существует в области $n=1.02 \div 1.07$ (рис. 2, а), а f_{34} — при $n=1.06 \div 1.14$ (рис. 2, б). Если в интервале углов

$80 \div 120^\circ$ элемент матрицы f_{33} не изменяет знак на обратный, то можно сделать вывод, что $n > 1.07$ и необходимо исследовать угловую зависимость f_{34} от γ .

На рис. 2 приведены области положения нулей функций $f_{33}(n, \kappa, \rho_0, \gamma)$ и $f_{34}(n, \kappa, \rho_0, \gamma)$ в зависимости от $n-1$. Относительная погрешность определения величины Δn в интервале $n=1.02 \div 1.15$ не превышает 15%.

Анализ угловой структуры для $f_{21}(n, \kappa, \rho_0, \gamma)$ свидетельствует о неперспективности использования этого элемента матрицы рассеяния для нахождения действительной части относительного показателя преломления.

Методика определения n в интервале $1.02 \div 1.07$, таким образом, сводится к измерению элемента матрицы $f_{33}(n, \kappa, \rho_0, \gamma)$ в области $80 \div 120^\circ$ и определе-

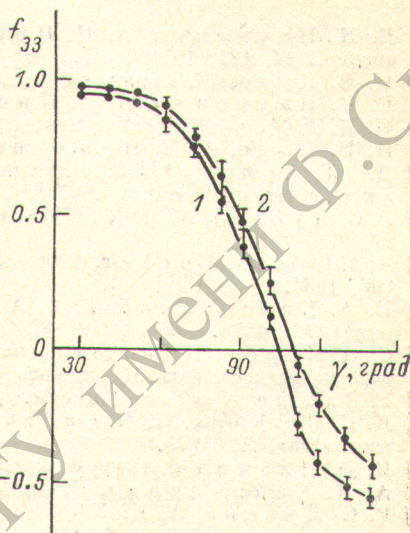
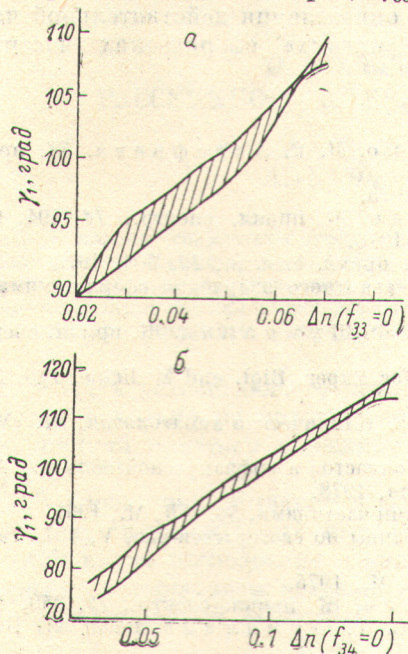


Рис. 2. Области значений Δn в зависимости от углов рассеяния γ_1 , при которых $f_{33}(n, \kappa, \rho_0, \gamma) = 0$ (а) $f_{34}(n, \kappa, \rho_0, \gamma) = 0$ (б) для сфер с параметрами $r_0 = 2.4 \div 3.4$ мкм; $\mu = 8 \div 15$.

Рис. 3. Экспериментально измеренные угловые зависимости элемента матрицы для эритроцитов [13].

1 — сферы; 2 — диски.

нию угла, при котором $f_{33}(n, \kappa, \rho_0, \gamma) = 0$. Если в исследуемом интервале угол $f_{33}(n, \kappa, \rho_0, \gamma)$ не принимает нулевых значений, то для определения n используется параметр $f_{34}(n, \kappa, \rho_0, \gamma)$.

Отметим, что при разработке методик определения действительной части относительного показателя преломления для полидисперсных сред предполагалось, что распределение частиц по размерам описывается гамма-распределением. Однако из совпадения значений γ_1 при $n=1.02$ и 1.05 , взятых из [12], для гамма- и нормального распределений при идентичных значениях ρ_0 , $\Delta \rho / \rho_0$, κ следует, что методики имеют более широкую область применимости и не ограничиваются гамма-распределением. К достоинствам методик следует отнести тот факт, что при их реализации нет необходимости в данных о концентрации частиц, а требуется лишь соблюдение условия однократного рассеяния, что связано с тем, что в их основе лежит знание не абсолютных значений элементов матрицы, а положение угла, при котором элемент матрицы изменяет знак на обратный.

Апробация методик осуществлена на основе данных, приведенных в [13]. Как видно из графика, приведенного на рис. 3, для сферулированных эритроцитов, угол при котором $f_{33}(n, \kappa, \rho_0, \gamma) = 0$, составляет 103° , что соответствует $\Delta n = 0.055$ (рис. 2). Значение $n = 1.055$, полученное указанным выше способом по результатам измерений компонент приведенной матрицы рассеяния, неплохо

согласуется со значением $n=1.06$, усредненным по спектральному интервалу $0.30-1.0$ мкм, приведенному в работе [14], и совпадает с уточненным значением, полученным в [15]. Для частиц того же объема, но дискообразной формы с показателем сферичности $d/t=3.4 \div 3.9$ (d — диаметр эритроцита, t — средняя толщина эритроцита) [9], угол, при котором $f_{33}(n, \chi, \rho_0, \gamma)=0$, равен 111° , что соответствует значению показателя преломления $n=1.07$, определенному в предположении сферичности частиц.

По-видимому, более точные значения n могут быть получены и для частиц конкретных форм на основании расчетов, которые в настоящей работе приведены для сфер. Для последних же полученные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности поляризационного метода определения действительной части относительного показателя преломления «мягких» сферических частиц.

Литература

- [1] Е. К. Науменко, А. П. Пришивалко, Л. Г. Астафьева. Ж. прикл. спектр., 14, 121, 1971.
- [2] Н. И. Дудо. Ж. прикл. спектр., 19, 904, 1973.
- [3] Е. К. Науменко, А. П. Пришивалко. Ж. прикл. спектр., 14, 494, 1971.
- [4] Н. И. Дудо. Ж. прикл. спектр., 25, 1072, 1976.
- [5] Н. И. Дудо, А. П. Пришивалко. Ж. прикл. спектр., 25, 504, 1976.
- [6] Д. Дейрменджан. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. «Мир», М., 1971.
- [7] Г. С. Дубова, А. Я. Хайруллина, С. Ф. Шумилина. Ж. прикл. спектр., 27, 871, 1977.
- [8] V. Bioll, M. Luckner. Proc. of the Soc. for Exper. Biol. and Medicine, 120, № 3, 296, 1965.
- [9] И. А. Кассирский, Г. А. Алексеев. Клиническая гематология, 21. «Медицина», М., 1970.
- [10] С. Н. Черезов. Оптические свойства хлоропластов в инфракрасной области. Автореф. канд. дисс. Изд. Казанского университета, 1978.
- [11] Г. Ван де Хюлст. Рассеяние света малыми частицами, 54. ИЛ, М., 1951.
- [12] К. С. Шифрин, И. Н. Салганик. Таблицы по светорассеянию, V, 197. Гидрометеоздат, Л., 1973.
- [13] И. Н. Плахина. Автореф. канд. дисс., 15. М., 1975.
- [14] А. Я. Хайруллина, С. Ф. Шумилина. Ж. прикл. спектр., 19, 340, 1973.
- [15] Г. С. Дубова, А. Я. Хайруллина, С. Ф. Шумилина. Весті АН БССР, сер. физ.-мат., № 2, 100, 1980.

Поступило в Редакцию 29 сентября 1980 г.