

*Четырнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 26—30 июня 2017 г.*

УДК 532.574.7

Вин Тху
*Московский энергетический институт (технический университет), Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14*

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ КОМПЛЕКС ДИАГНОСТИКИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ КОРРЕЛЯЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена расчету рассеяния света частицами в среде MathCad.

В теоретической части рассмотрен физический смысл рассеяния света оптически однородными сферическими частицами; приведены основные закономерности рассеяния Ми в случае освещения частицы одним пучком света; описаны особенности рэлеевского рассеяния; дан сравнительный анализ рассеяния Рэлея и рассеяния по теории Ми.

ВВЕДЕНИЕ

Теория рассеяния Ми позволяет определять амплитудные функции рассеяния. Интерференционные методы лазерной диагностики потоков основаны на регистрации интерференционного поля, возникающего в рассеянном оптическими неоднородностями излучении.

Методы лазерной доплеровской диагностики основаны на регистрации интерференционного поля, возникающего на поверхности фотоприемника, когда поток освещается двумя или более рассеивающимися лазерными пучками. Методы светорассеяния определения размера частиц, широко применимые в аэро- и гидродинамике, океанологии и химической технологии, также основаны на закономерностях рассеяния оптического излучения.

В настоящее время существуют программы расчета амплитудных функций рассеяния Ми, написанных на таких языках программирования, как Фортран [1] и Паскаль. Однако с появлением новых программных продуктов, повышением быстродействия компьютеров, изменением требований к точности расчетов возникла необходимость создания новых программ для расчета амплитудных функций рассеяния в наиболее распространенных программных средах.

Программа MathCad имеет широкий круг пользователей, так как она применима для научных исследований и инженерной работы, курсовых и типовых расчетов. Это связано с тем, что MathCad является уникальной системой для работы с формулами, числами, текстами и графиками в наглядном виде. Программный продукт MathCad столь же гибок, как самые мощные электронные таблицы и языки программирования, но лёгок в освоении и удобен в использовании.

В данном пособии показан расчет основных закономерностей рассеяния света, выполненный в среде MathCad.

1. ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА АМПЛИТУДНЫХ ФУНКЦИЙ РАССЕЙЯНИЯ МИ

Для применения разработанной программы важно убедиться в правильности ее работы. Для тестирования программы были взяты стандартные зависимости, приводимые во многих литературных источниках [1, 2, 3, 4], а также численные характеристики рассеяния Ми [1].

Изменение поляризации при неполяризованном падающем излучении.

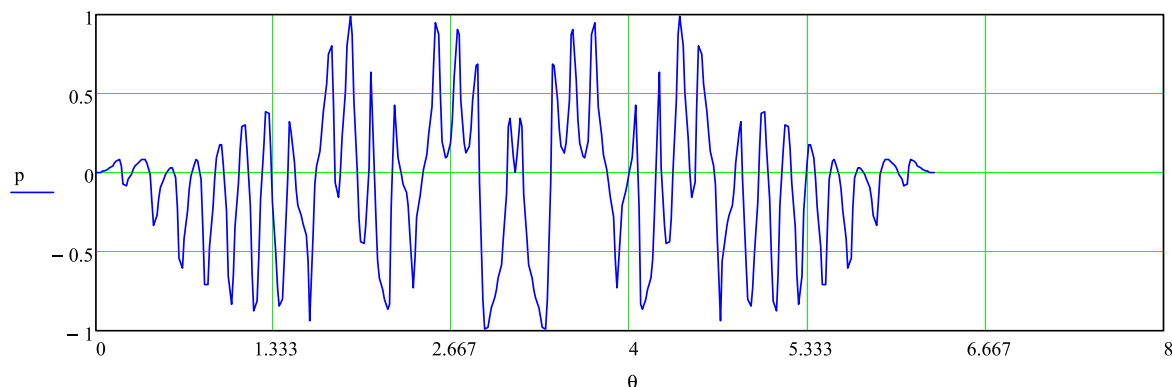


Рис – 1 Изменение поляризации при неполяризованном падающем излучении.

Для индикатрис рассеяния Ми должны выполняться следующие условия:

1. Степень поляризации должна обращаться в нуль при углах рассеяния равных 0° и 180° (см. рис. 2).
2. При всех углах рассеяния элементы матрицы рассеяния размером 4×4 должны удовлетворять тождеству:

$$1 = \left(\frac{S_{12}}{S_{11}} \right)^2 + \left(\frac{S_{33}}{S_{11}} \right)^2 + \left(\frac{S_{34}}{S_{11}} \right)^2$$

В данной программе это тождество заданно в качестве функции и построено для проверки (см. рис. 3).

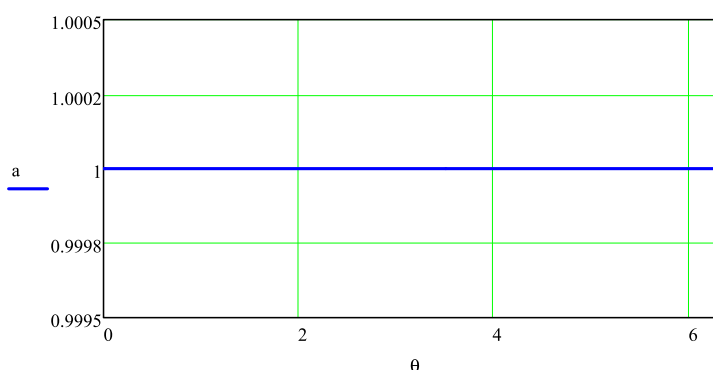


Рис - 2 Тестирование с помощью коэффициентов матрицы Стокса

1.2 ГРАФИЧЕСКИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ УГЛОВЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

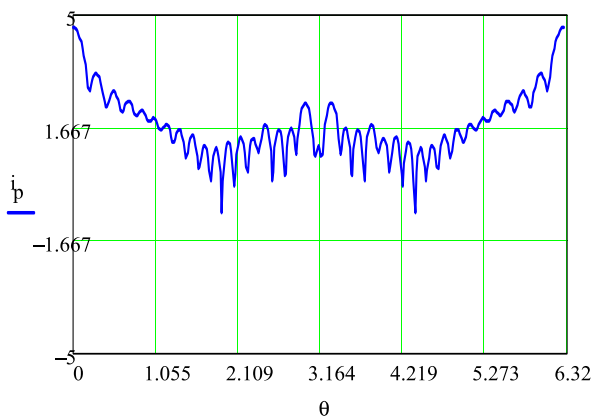


Рис 3 - логарифмическая зависимость рассеянной интенсивности от угла рассеяния, в декартовых координатах, при условии, что падающий свет поляризован в направлении параллельном плоскости рассеяния

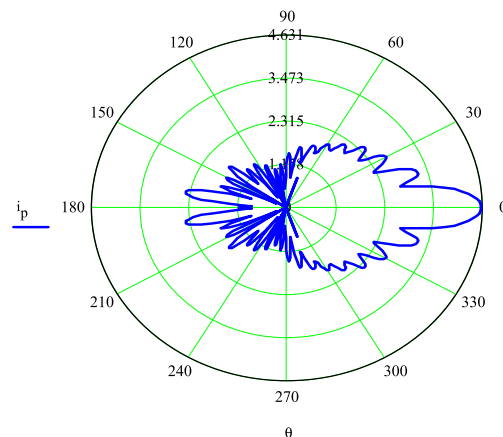


Рис 4 - логарифмическая зависимость рассеянной интенсивности от угла рассеяния, в рассеяния, в полярных координатах, при условии, что падающий свет поляризован в направлении параллельном плоскости рассеяния

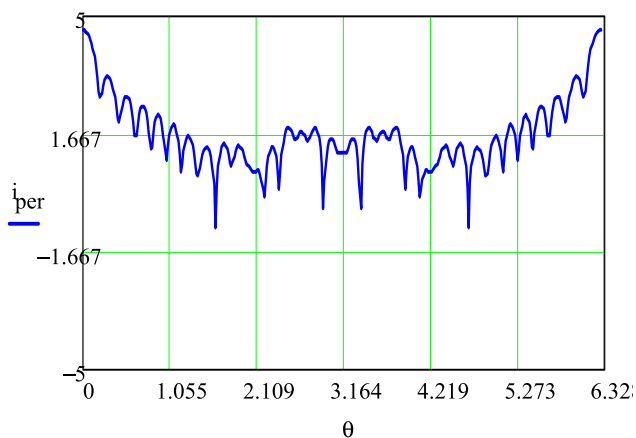


Рис 5- логарифмическая зависимость рассеянной интенсивности от угла рассеяния, в рассеяния, полярных координатах, при условии, что падающий свет поляризован в направлении плоскости рассеяния перпендикулярном

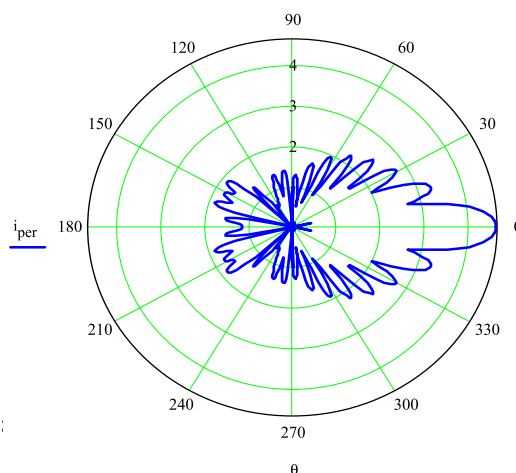


Рис 6 - логарифмическая зависимость рассеянной интенсивности от угла рассеяния, в рассеянии в полярных координатах, при условии, что падающий свет поляризован в направлении перпендикулярном плоскости рассеяния

1.3 РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА АМПЛИТУДНЫХ ФУНКЦИЙ РАССЕЯНИЯ МИ В СРЕДЕ MATHCAD

Расчётная часть.

Расчёт относительного размера частицы

$$x := 2 \cdot \pi \cdot m_2 \cdot \frac{r}{\lambda}$$

Расчёт относительного показателя преломления.

$$m := \frac{m_1}{m_2}$$

Необходимое для сходимости ряда рассеяния Ми число членов рассчитывается по формуле:

$$\text{NSTOP} := \text{ceil} \left(x + 4 \cdot x^{\frac{1}{3}} + 2 \right) \quad \text{NSTOP} = 27$$

$$n := 0 .. \text{NSTOP}$$

Диапазон изменения угла рассеяния

$$j := 0 .. 360$$

Угол рассеяния

$$\theta_j := 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{j}{360} \right)$$

Расчёт безразмерной переменной для вычисления логарифмической производной

$$\rho := m \cdot x$$

Расчёт функций, определяющих угловую зависимость. Вычисляются на основе рекуррентных соотношений.

$$pi_{0,j} := 0$$

$$pi_{(n+1),j} := \text{if} \left[n \neq 0, \frac{[2 \cdot (n+1) - 1]}{n} \cdot \cos(\theta_j) \cdot pi_{n,j} - \frac{(n+1) \cdot pi_{(n-1),j}}{n}, 1 \right]$$

$$tau_{n,j} := n \cdot \cos(\theta_j) \cdot pi_{n,j} - (n+1) \cdot \text{if} [n \neq 0, pi_{(n-1),j}, pi_{n,j}]$$

Расчёт логарифмической производной $D_n(\rho) = \frac{d}{d\rho} \ln[\psi_n(\rho)]$.

Расчёт производится методом обратной рекурсии начиная с D_{NMX} при условии, что NMX существенно превосходит $NSTOP$ и $|\rho|$.

$if(NSTOP > |\rho|, NSTOP, ceil(|\rho|))$

$NMX := NSTOP + 15 \quad NMX = 42$

$n := NMX, NMX - 1 .. 1$

$D_{NMX} := 0 + 0i$

Рекурентное соотношение, которому удовлетворяет логарифмическая производная.

$$D_{(n-1)} := \left(\frac{n}{\rho} \right) - \frac{1}{D_n + \frac{n}{\rho}}$$

Для упрощения коэффициентов ряда рассеяния рассчитаем функции Риккати-Бесселя $\psi(\rho)$ и $\zeta(\rho)$ методом прямой рекурсии.

$n := 0 .. NSTOP$

$\psi_0 := \sin(x)$

$\psi_{(n+1)} := \frac{(2 \cdot n + 1)}{x} \cdot \psi_n - if(n \neq 0, \psi_{n-1}, \cos(x))$

$\chi_0 := \cos(x)$

$\zeta_0 := \psi_0 - \chi_0 \cdot i$

$\zeta_{(n+1)} := \frac{(2 \cdot n + 1)}{x} \cdot \zeta_n - if(n \neq 0, \zeta_{n-1}, \cos(x) + \sin(x) \cdot i)$

Расчёт коэффициентов рассеянного поля при условии, что магнитная проницаемость частицы и окружающей среды одна и та же.

$$a_n := \frac{\left[\left(\frac{D_n}{m} + \frac{n}{x} \right) \cdot \psi_n - \text{if} (n \neq 0, \psi_{n-1}, \cos(x)) \right]}{\left[\left(\frac{D_n}{m} + \frac{n}{x} \right) \zeta_n - \text{if} (n \neq 0, \zeta_{n-1}, \cos(x) + \sin(x) \cdot i) \right]}$$

$$b_n := \frac{\left[\left(D_n \cdot m + \frac{n}{x} \right) \cdot \psi_n - \text{if} (n \neq 0, \psi_{n-1}, \cos(x)) \right]}{\left[\left(D_n \cdot m + \frac{n}{x} \right) \zeta_n - \text{if} (n \neq 0, \zeta_{n-1}, \cos(x) + \sin(x) \cdot i) \right]}$$

Расчёт амплитудных функций рассеяния.

$$n := 1 .. NSTOP$$

$$S_{I_j} := \sum_n \frac{(2 \cdot n + 1)}{n \cdot (n + 1)} \cdot (a_n \cdot \text{pi}_{n,j} + b_n \cdot \text{tau}_{n,j})$$

$$S_{II_j} := \sum_n \frac{(2 \cdot n + 1)}{n \cdot (n + 1)} \cdot (a_n \cdot \text{tau}_{n,j} + b_n \cdot \text{pi}_{n,j})$$

Расчёт элементов матрицы Стокса.

$$S_{11_j} := 0.5 \left[\left(|S_{II_j}| \right)^2 + \left(|S_{I_j}| \right)^2 \right] \quad S_{12_j} := 0.5 \cdot \left[\left(|S_{II_j}| \right)^2 - \left(|S_{I_j}| \right)^2 \right]$$

$$S_{33_j} := 0.5 \cdot \left(\overline{S_{II_j}} \cdot S_{I_j} + S_{II_j} \cdot \overline{S_{I_j}} \right) \quad S_{34_j} := \frac{i \cdot \left(S_{I_j} \cdot \overline{S_{II_j}} - S_{II_j} \cdot \overline{S_{I_j}} \right)}{2}$$

Расчёт изменения поляризации при неполяризованном падающем излучении.

$$p_j := \frac{-S_{12j}}{S_{11j}}$$

Расчёт рассеянной интенсивности, приходящейся на единичную падающую интенсивность при условии, что падающий свет поляризован в направлении параллельном плоскости рассеяния.

$$i_{p_j} := \left(|S_{IIj}| \right)^2$$

Расчёт рассеянной интенсивности, приходящейся на единичную падающую интенсивность при условии, что падающий свет поляризован в направлении перпендикулярном плоскости рассеяния.

$$i_{per_j} := \left(|S_{Ij}| \right)^2$$

Расчёт локальных максимумов интенсивности рассеянного излучения.

$$I_{\max}(M) := \left| \begin{array}{l} j \leftarrow 1 \\ n \leftarrow 0 \\ \text{while } j \leq \text{rows}(M) - 2 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{if } [M_j > M_{(j-1)}] \cdot [M_j > M_{(j+1)}] \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{Max}_n \leftarrow M_j \\ \theta_n \leftarrow j \\ n \leftarrow n + 1 \end{array} \right. \\ \quad j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ \text{Max} \end{array} \right.$$

$$i_{per_j} := \log(i_{per_j})$$

$$i_{p_j} := \log(i_{p_j})$$

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На схеме излучение от лазера попадает на стекло, на котором наклеены тестовые частицы. Для два эксперимента использованы частицы полистирола и полые стеклянные сферы. После прохождения стекла рассеянное излучение попадает на экран. Затем изображения света при разных углах собираются ПЗС видеокамерой и передаются на компьютер со специальным программным обеспечением.

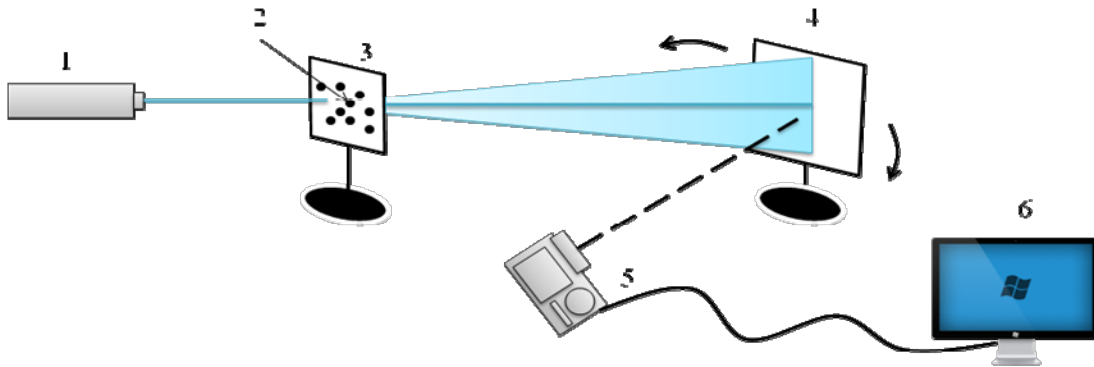


Рис 7 - Экспериментальная установка

1- лазер; 2- полые стеклянные сферы ; 3- стекло ; 4- экран; 5- ПЗС видеокамера ; 6- компьютер с программным обеспечением для обработки результатов измерений

2.1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ РАЗНЫХ УГЛАХ УСТАНОВКИ ЭКРАНА (ПОЛЫЕ СТЕКЛЯРНЫЕ СФЕРЫ)

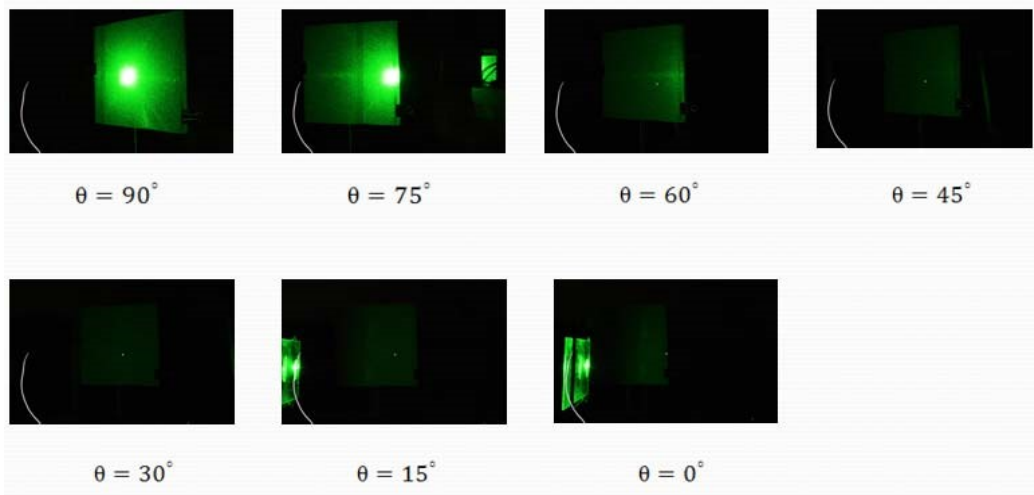
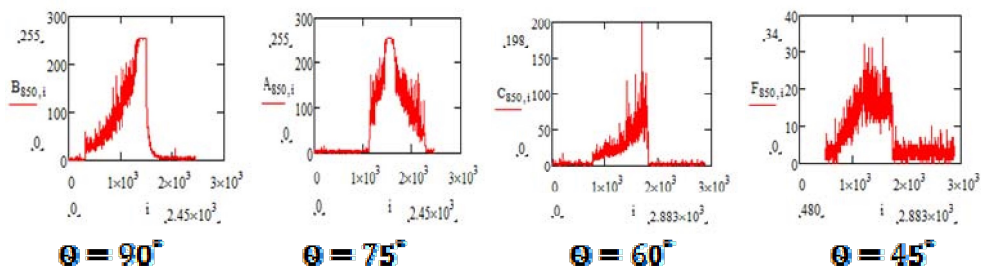


Рис 8 - Экспериментальные изображения при разных углах установки экрана (полистерол)

В результате эксперимента получен набор изображений, который позволит в дальнейшем построить индикатрису рассеяния Ми. Данные изображения получены при рассеянии лазерного пучка на полистероле диаметром 40 микрон.

2.2 СЕЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ РАЗНЫХ УГЛАХ УСТАНОВКИ ЭКРАНА (ПОЛЫЕ СТЕКЛЯРНЫЕ СФЕРЫ)



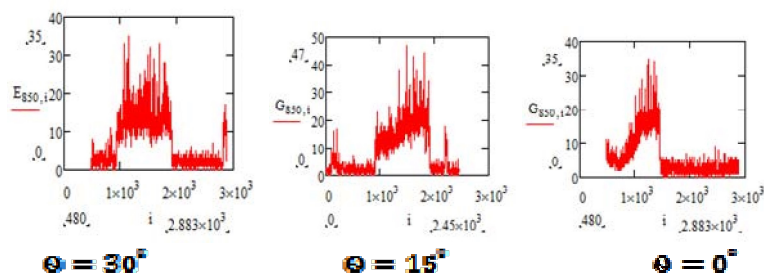


Рис 8 - Сечения экспериментальных изображений при разных углах установки экрана (полистерол)
 Сечение центр графики представляют собой интенсивности света лчи при разных углах.

2.3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ РАЗНЫХ УГЛАХ УСТАНОВКИ ЭКРАНА (ПОЛИСТЕРОЛ)

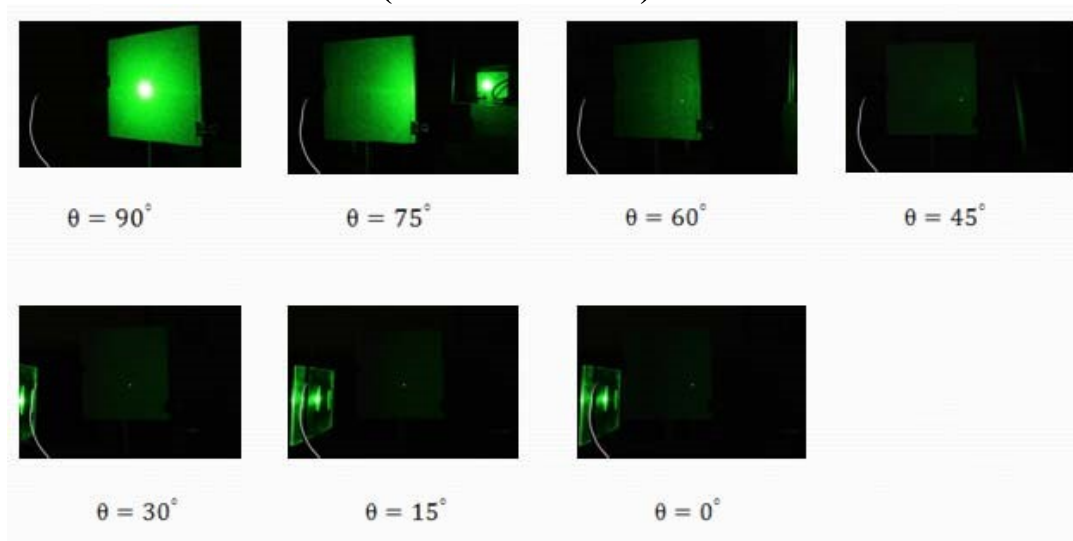
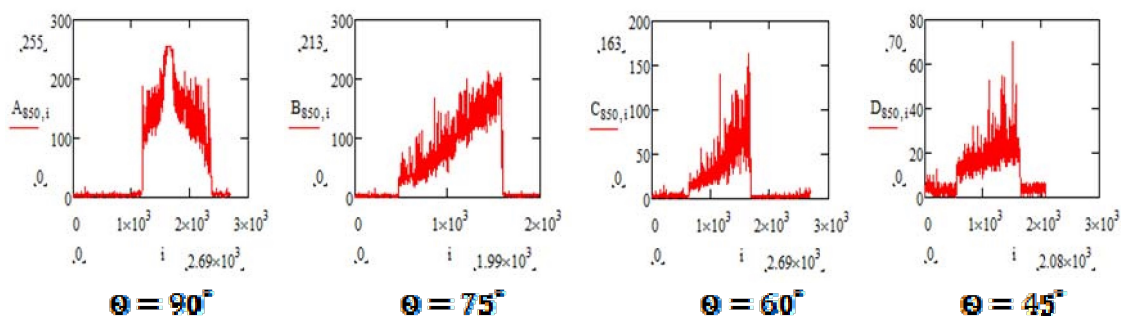


Рис 9- Экспериментальные изображения при разных углах установки экрана
 В результате эксперимента получен набор изображений, который позволит в дальнейшем построить индикатрису рассеяния Ми. Данные изображения получены при рассеянии лазерного пучка на полистероле диаметром 20 микрометров.

2.4 СЕЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ РАЗНЫХ УГЛАХ УСТАНОВКИ ЭКРАНА (ПОЛИСТЕРОЛ)



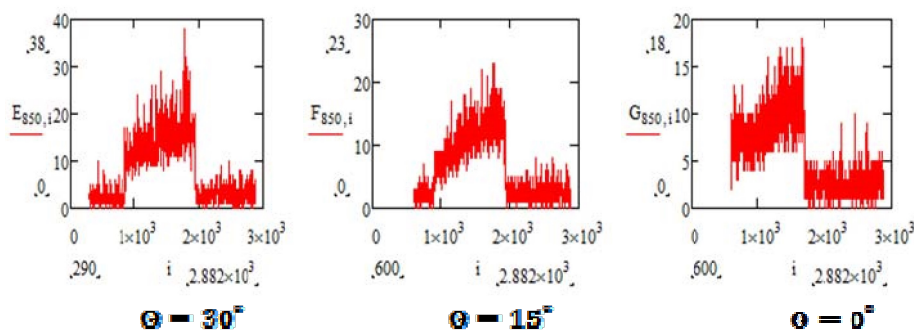


Рис 10 - Сечения экспериментальных изображений при разных углах установки экрана (полые стеклянные сферы)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная и протестированная в среде MathCad программа позволяет:

- рассчитывать амплитудные функции рассеяния, значения локальных и глобальных максимумов интенсивности рассеянного излучения и поляризации;
- найти численные значения коэффициентов рассеянного поля;
- построить в декартовых и полярных координатах следующие графические зависимости:
 - угловую зависимость изменения поляризации при падении неполяризованного излучения,
 - индикатрисы рассеяния для падающего света, линейно поляризованного в направлении: параллельном плоскости рассеяния; перпендикулярном плоскости рассеяния.

Для удобства пользователя разработанная программа обладает следующими особенностями:

- в начале программы приведено описание переменных,
- осуществлена возможность изменения входных параметров,
- вывод результатов и построение графиков осуществляется сразу после ввода исходных параметров (сама программа расчета размещена в конце документа).

Данная программа позволяет рассчитывать рассеяние на частице только в приближении плоской волны. Планируется выпустить вторую часть пособия, посвященную рассеянию гауссова пучка на частице, основанную на проведенных научных исследованиях [5].

- Разработана программа компьютерного моделирования рассеяния Ми на различных частицах.
- Получены индикатрисы рассеяния Ми на наиболее часто используемых в АИЧ методе частицах.
- Разработана экспериментальная установка, позволяющая зарегистрировать в цифровом виде индикатрисы рассеяния Ми.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

Описание переменных.

- m_1 - Показатель преломления частицы.
 m_2 - Показатель преломления среды.
 m - Относительный показатель преломления.
 r - Радиус частицы.
 λ - Длина волны.
 x - Относительный размер частицы.
NSTOP - Необходимое число членов для сходимости ряда рассеяния Ми.
 j, n - Ранжированные переменные.
 θ - Угол рассеяния.
 ρ - Безразмерная переменная для вычисления логарифмической производной
 ρ_i, τ_i - функции, определяющие угловую зависимость коэффициентов ряд
рассеяния. Для расчёта этих функций в среде "MathCad" удобно ввести
следующие обозначения $\rho_i \equiv \pi_n, \tau_i \equiv \tau_n$.
 $D_n(\rho)$ - Логарифмическая производная, впервые введённая Аденом.
 ψ, ζ, χ - Функции Риккати-Бесселя.
 a, b - коэффициенты рассеянного поля.
 S_I, S_{II} - Амплитудные функции рассеяния.
 $S_{11}, S_{12}, S_{33}, S_{34}$ - Элементы матрицы Стокса.
 P - Поляризация.
 i_p - Интенсивность рассеянного света при условии, что падающий свет
поляризован в направлении параллельном плоскости рассеяния.
 i_{per} - Интенсивность рассеянного света при условии, что падающий свет
поляризован в направлении перпендикулярном плоскости рассеяния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Борен К., Хафмен Д.** Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: – Мир. 1986. 664 с.
2. **Дубнищев Ю. Н., Ринкевичюс Б.С.** Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982. 303 с.
3. **Ринкевичюс Б. С.** Лазерная диагностика потоков/Под ред. В. А. Фабриканта. - М.: Издательство МЭИ, 1990. 288 с.
4. **Смирнов В. И., Янина Г. М.** Расчёт и проектирование лазерных анемометров. М.: Издательство МЭИ, 1996.
5. **Скорнякова Н.М.** «Исследование рассеяния гауссова пучка на движущихся частицах в задачах лазерной диагностики потоков». Диссертация. К.т.н. Москва, 2001.

Vin Thu

*Moscow Power Engineering Institute (Technical University), Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14.*

**OPTICAL ELECTRONICS COMPLECS OF AERODYNAMICS FLOWS
DIAGNOSTICS BY CORRELATION METHODS**

ABSTRACT

The work is devoted to calculation of the light scattering particles in MathCad. In the theoretical part describes the physical meaning of light scattering optically homogeneous spherical particles; the main regularities of mie scattering in the case of illumination of a particle in one beam of light; describes the features of Rayleigh scattering; comparative analysis of the Rayleigh scattering and scattering using mie theory.