

КОНФЕРЕНЦИЯ С
ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА
ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ И КОНЦЕНТРАЦИИ ЧАСТИЦ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Е.В. Ни, В.В. Брюханова, И.Д. Брюханов

Национальный исследовательский Томский государственный университет

wolf.ni@yandex.ru, lidar@mail.tsu.ru, leo@mail.tsu.ru, plyton2121@mail.ru

Ключевые слова: определение микроструктуры, плотные дисперсные среды, многократное рассеяние

Оптические методы определения микроструктуры дисперсной среды обеспечивают достаточную оперативность и точность контроля её параметров и, при этом, не вносят изменений в исследуемый объём среды. Однако, при исследовании оптически плотных сред происходит многократное рассеяние оптического излучения. В докладе обсуждается принципиальная схема прибора для определения микроструктуры рассеивающей среды, основанного на выделении из суммарного потока отражённого средой излучения интенсивности многократно рассеянного назад излучения, и результаты проведенных экспериментов.

Информация о размерах и концентрации частиц необходима во многих отраслях промышленного производства для контроля качества продукции и для рационального использования сырья. Для определения размеров и концентрации частиц используется метод седиментации. Однако данный метод ограничен объемом кюветы, обладает большой длительностью проведения экспериментов, а также невозможность использования в некоторых видах производства (например, угольная печь в ТЭЦ). Оптический метод определения микроструктуры среды лишен этих недостатков. Однако эти методы основаны на приближении однократного рассеяния, а следовательно применимы лишь при оптической толщине среды не более 1. В оптически более плотных средах появляется многократно рассеянное излучение, неучет которого приводит к погрешностям оценки параметров микроструктуры среды.

Результаты исследований многократно рассеянного назад излучения, полученных ранее многими авторами, показали, что при зондировании сред имеющих оптическую толщину до 3 лидарный сигнал с достаточной точностью можно описать в приближении двукратного рассеяния. Наиболее детально модель лидарного сигнала двукратного рассеяния представлена в работах Кауля Б.В. и Самохвалова И.В. [1]. Хотя эта модель применима для импульсного источника, тем не менее, сам подход можно использовать для получения математического соотношения, связывающего интенсивность двукратно рассеянного назад излучения при облучении дисперсной среды источником, работающим в непрерывном режиме.

Принципиальная схема создаваемого прибора приведена на рисунке 1. Лазерное излучение с помощью поворотного зеркала Z_1 направляется в кювету с исследуемой средой. Однократно рассеянное назад излучение, распространяющееся под малыми углами к оптической оси, блокируется экраном Э. Двукратно рассеянное назад излучение собирается на ПЗС-матрице с помощью объектива L_2 . Размер экрана и расстояния l_1, l_2 подобраны таким

образом, чтобы на ПЗС-матрицу попадало только двукратно рассеянное назад излучение, которое формируется в четырех областях рассеивающего объема среды I, II, III и IV.

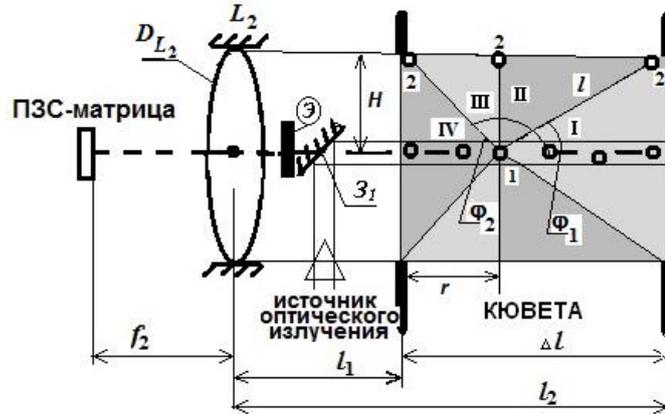


Рисунок 1 – К выводу выражения (1) для интенсивности сигнала двукратного рассеяния от плоского слоя дисперсной среды, помещенной в кювету.

Используя теорию двукратного рассеяния [2], можно получить выражение для интенсивности двукратно рассеянного назад излучения, регистрируемого в фокальной плоскости объектива L_2 в окрестности оптической оси:

$$I^{(2)}(r) = \frac{P_0}{4\pi} \int_{l_1}^{l_2} \exp\left[-\int_0^r \alpha(r) dr\right] [I_1 + I_2 + I_3 + I_4] dz, \quad (1)$$

где

$$I_1 = \int_0^{\varphi_1} \int_0^{l_{\max 1}} \exp\left[-\int_0^l \alpha(r) dr\right] \sigma(z) \sigma(l) \chi(z, \varphi) \chi(l, \pi) \sin \varphi d\varphi dl,$$

$$I_2 = \int_{\varphi_1}^{\pi/2} \int_0^{l_{\max 2}} \exp\left[-\int_0^l \alpha(r) dr\right] \sigma(z) \sigma(l) \chi(z, \varphi) \chi(l, \pi) \sin \varphi d\varphi dl,$$

$$I_3 = \int_{\pi/2}^{\varphi_2} \int_0^{l_{\max 3}} \exp\left[-\int_0^l \alpha(r) dr\right] \sigma(z) \sigma(l) \chi(z, \varphi) \chi(l, \pi) \sin \varphi d\varphi dl,$$

$$I_4 = \int_{\varphi_2}^{\pi} \int_0^{l_{\max 4}} \exp\left[-\int_0^l \alpha(r) dr\right] \sigma(z) \sigma(l) \chi(z, \varphi) \chi(l, \pi) \sin \varphi d\varphi dl,$$

$$\varphi_1 = \arctan \frac{H}{\Delta l - r}, \quad \varphi_2 = \pi - \arctan \frac{H}{r}, \quad l_{\max 1} = \frac{\Delta l - r}{\cos \varphi}, \quad l_{\max 2} = \frac{H}{\sin \varphi}, \quad l_{\max 3} = \frac{H}{\sin(\pi - \varphi)}, \quad l_{\max 4} = \frac{r}{\cos \varphi},$$

$\sigma(z)$ – коэффициент рассеяния, $\chi(z, \varphi)$ – индикатриса рассеяния в направлении φ , а I_1, I_2, I_3 и I_4 – интегральные параметры для соответствующих областей кюветы (рис. 1).

Для исследования возможности определения микроструктуры среды по многократному рассеянию нами была собрана лабораторная установка принципиальная схема, которой приведена на рисунке 2.

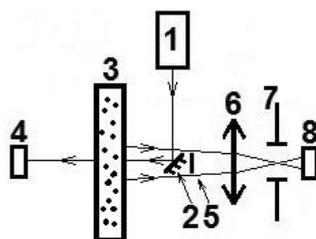


Рисунок 2 –Схема эксперимента по исследованию зависимости интенсивности многократно рассеянного назад излучения от коэффициента ослабления исследуемой среды

Коллимированный пучок излучения лазера 1 направлялся на зеркало 2, отразившись от которого проходил через кювету 3 и попадал на фотодиод 4. Таким образом, регистрировалось прямое излучение, прошедшее через среду и рассеянное под малыми углами. Излучение, рассеянное средой в обратном направлении, распространялось в сторону линзы 6. Однократно рассеянное «назад» под малыми углами излучение блокировалось экраном 5, жестко закрепленным на единой опоре с зеркалом 2. Многократно рассеянное «назад» излучение проходило мимо экрана 5 и попадало на линзу 6, в фокусе которой была установлена диафрагма 7, после чего его интенсивность измерялась фотодиодом 8. Размер отверстия в диафрагме 7 выбирался таким, чтобы на фотодиод 8 попадало только многократно рассеянное «назад» излучение ($d \leq 5 \text{ мм}$) или весь поток рассеянного назад излучения - однократное и многократное ($d \leq 12 \text{ мм}$). Таким образом, удаётся одновременно измерять интенсивность излучения, прошедшего исследуемую среду в прямом направлении, а также интенсивность многократно рассеянного «назад» излучения.

В качестве исследуемой среды был выбран водно-молочный раствор. Пример одной из микрофотографий и распределение частиц по размерам приведены на рис. 3.

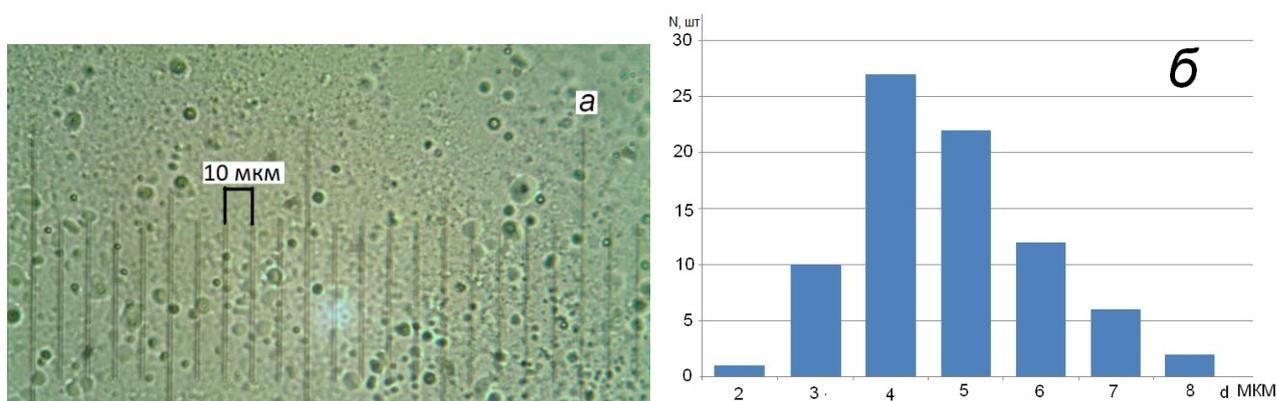


Рисунок 3 – Водно-молочный раствор: а) микрофотография жировых частиц в растворе; б) распределение жировых частиц по размерам в растворе.

Из гистограммы видно, что спектр размеров частиц в молоке соответствует гамма-распределению с модальным радиусом 4 мкм.

Результаты эксперимента представлены на рисунке 4. Здесь кривая 1 – это суммарная интенсивность однократно и многократно рассеянного «назад» излучения. Данные значения получены с диаметром диафрагмы 7 (рис. 2), равным 12мм. Это означает, что на фотодиод поступает не только многократное, но и однократно рассеянное «назад» излучение. Уменьшив диаметр отверстия в диафрагме 7 до 5 мм и установив её в фокусе линзы 6 перед фотодиодом 8, мы регистрировали интенсивности только многократно рассеянного «назад» излучения (рис. 4 кривая 2). Если из кривой 1 вычесть кривую 2, то получится интенсивность однократно рассеянного «назад» излучения (рис. 4 кривая 3).

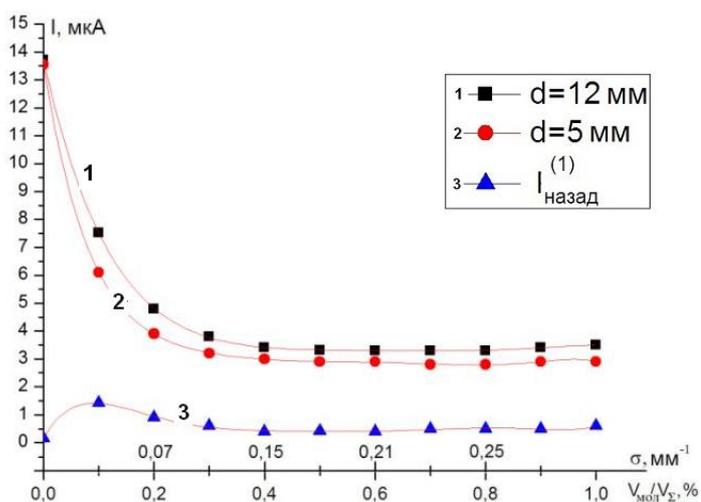


Рисунок 4 – Зависимость интенсивности многократно рассеянного «назад» излучения от коэффициента рассеяния исследуемой среды (от объёмной доли молока в растворе).

Из сравнения хода кривых (1,2) на рисунке 4 следует, что при объёмной доле молока в воде более 15-20% величина сигнала многократно рассеянного назад излучения практически не меняется. Следовательно, можно ожидать, что уровень интенсивности МР назад излучения будет определяться микроструктурой среды (размером частиц).

Приведённые на рис.4 зависимости качественно повторяют кривые, экспериментально полученные в [3] в камере искусственных туманов для туманов парения и древесного дыма.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант № 16-05-00710) и Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета».

1. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Теория и результаты лазерного зондирования ориентированных кристаллических частиц в облаках // Оптика атмосферы и океана, 2005, 18, № 12, с.1051–1057.
2. Самохвалов И.В., Брюханова В.В. Лазерное зондирование облаков на основе теории двукратного рассеяния // Вестник Томского государственного университета, 2003, №278, с.104–110.
3. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Оптика атмосферного аэрозоля. Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. 250 с.