

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАДИОФИЗИКИ

**Труды Международной
молодежной научной школы**

Томск, 25–26 сентября 2017 г.



**ТОМСК
«Издательство НТЛ»
2017**

Лабораторный стенд для исследования характеристик многократно рассеянного назад излучения дисперсными средами¹

Е.В. Ни, И.Д. Брюханов, Е.И. Свиридов

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Во многих отраслях промышленного производства для контроля качества продукции и рационального использования сырья необходима информация о размерах и концентрации частиц дисперсных сред. На практике широко используется метод седиментации, который обладает рядом недостатков. К ним относятся: ограничение объема исследуемой среды размерами кюветы; большая длительность получения данных (проведение измерений, обработка и пр.); невозможность использования в некоторых видах производства (например, теплоэнергетике). Оптические методы определения микроструктуры среды относятся к дистанционным и лишены этих недостатков. Они основаны на посылке лазерного излучения в исследуемый объем среды и регистрации прошедшего и (или) отраженного излучения. Интерпретация получаемых результатов, как правило, производится на основе приближения однократного рассеяния, которое применимо лишь при оптических плотностях среды менее 1. В более плотных средах проходящее и рассеянное назад излучение содержит не только однократно рассеянное излучение, но многократно рассеянное (МР). Неучёт МР-излучения приводит к снижению точности получаемых результатов при оценке параметров микроструктуры среды.

Результаты исследований многократно рассеянного назад излучения, проведенных ранее многими авторами, позволяют утверждать, что при зондировании сред с оптической толщиной $\tau \leq 3$ мощность (поток) рассеянного назад излучения с достаточной точностью можно описать в приближении двукратного рассеяния. В случае импульсного источника, наиболее полно, модель лидарного сигнала (мощность рассеянного назад излучения) с учётом двукратного рассеяния представлена в работах Кауля Б.В. и Самохвалова И.В. [1].

¹ Работа выполнена при поддержке грантом РФФИ № 16-05-00710 и программой «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета».

В настоящей работе показано, что при зондировании среды непрерывным излучением, для определённой схемы эксперимента, можно получить соотношение для интенсивности МР назад излучения. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1.

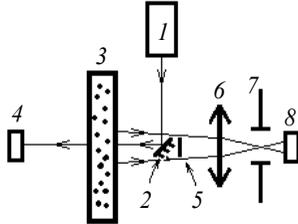


Рис. 1. Принципиальная схема установки для исследования интенсивности МР назад излучения

Коллимированный пучок излучения лазера 1 направляется на зеркало 2 , отразившись от которого проходит через кювету 3 и попадает на фотодиод 4 . Таким образом, регистрируется прямое излучение источника и рассеянное под малыми углами частицами среды. Излучение, рассеянное средой в обратном направлении, распространяется в направлении линзы 6 . При этом, однократно рассеянное назад под малыми углами излучение блокируется экраном 5 , жестко закрепленным на единой опоре с зеркалом 2 . МР назад излучение проходит мимо экрана 5 , попадает на линзу 6 , в фокусе которой устанавливаются диафрагмы 7 с разными диаметрами отверстий d , и регистрируется фотодиодом 8 . Размер отверстия в диафрагме 7 выбирается таким, чтобы на фотодиод 8 попадало только многократно рассеянное назад излучение ($d = 5$ мм) или весь поток рассеянного назад излучения – однократное и многократное ($d = 12$ мм). Таким образом, удаётся одновременно измерять интенсивность излучения, прошедшего исследуемую среду в прямом направлении, а также интенсивность многократно рассеянного назад излучения.

Интенсивность двукратно рассеянного назад излучения, регистрируемая в фокальной плоскости объектива L_2 в окрестности оптической оси, при зондировании среды непрерывным источником, описывается следующим выражением:

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

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

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

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

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

$$\varphi_1 = \arctg \frac{H}{\Delta l - r}, \quad \varphi_2 = \pi - \arctg \frac{H}{r}, \quad l_{\max 1} = \frac{\Delta l - r}{\cos \varphi}, \quad l_{\max 2} = \frac{H}{\sin \varphi},$$

$$l_{\max 3} = \frac{H}{\sin(\pi - \varphi)}, \quad l_{\max 4} = \frac{r}{\cos \varphi},$$

$\sigma(z)$ – коэффициент рассеяния, $\chi(z, \varphi)$ – индикатриса рассеяния в направлении φ , а I_1, I_2, I_3 и I_4 – интегральные параметры, описывающие интенсивность рассеянного излучения для соответствующих областей кюветы (рис. 2).

В качестве исследуемой среды использовались суспензии жировых частиц молока (рис. 3, а, б) и частиц ликоподия в воде (рис. 3, в, г). Размеры частиц определялись по микрофотографиям, полученным с помощью микроскопа.

Из гистограммы видно, что спектр размеров частиц этих сред соответствует гамма-распределению. Как видно из рисунков, диаметр жировых частиц молока лежит в диапазоне 1–8 мкм, диаметр частиц ликоподия – в диапазоне (31–36 мкм). Ширина спектра размеров жировых частиц молока несколько больше, чем у ликоподия.

Результаты эксперимента представлены на рис. 4. По оси абсцисс отложена объемная доля вещества в процентах:

$$V = \frac{V_{\text{вещ}}}{V_{\text{вещ}} + V_{\text{воды}}} 100\% .$$

По оси ординат отложен ток фотодиода, пропорциональный интенсивности рассеянного излучения.

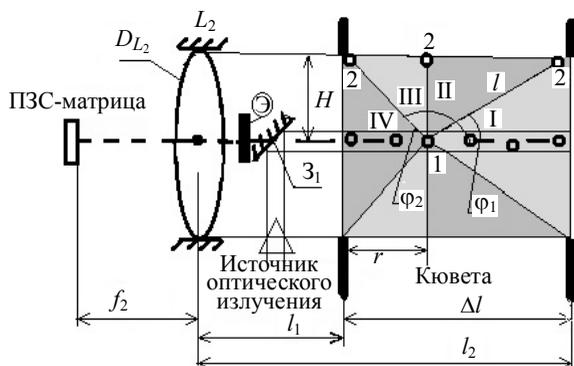


Рис. 2. К выводу выражения (1) для интенсивности сигнала двукратного рассеяния от плоского слоя дисперсной среды, помещенной в кювету

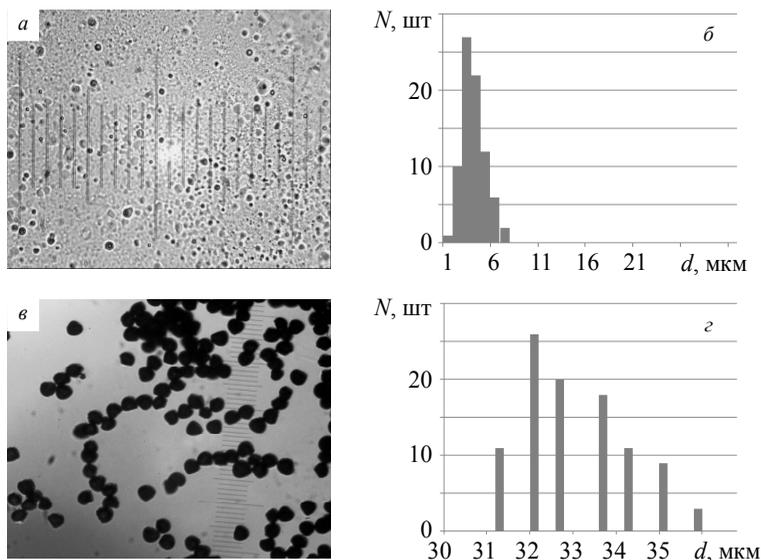


Рис. 3. Микрофотографии жировых частиц молока в растворе и частиц ликоподия (а, в) и их распределения по размерам (б, г)

Из сравнения хода кривых 1, 2 на рис. 4 следует, что при объемной доле молока в воде менее 0,4–0,5 % и объемной доли ликоподия в воде 0,25–0,35 % величина сигнала многократного рассеяния зависит от размеров частиц в среде. Чем больше размер частиц в среде, тем меньше

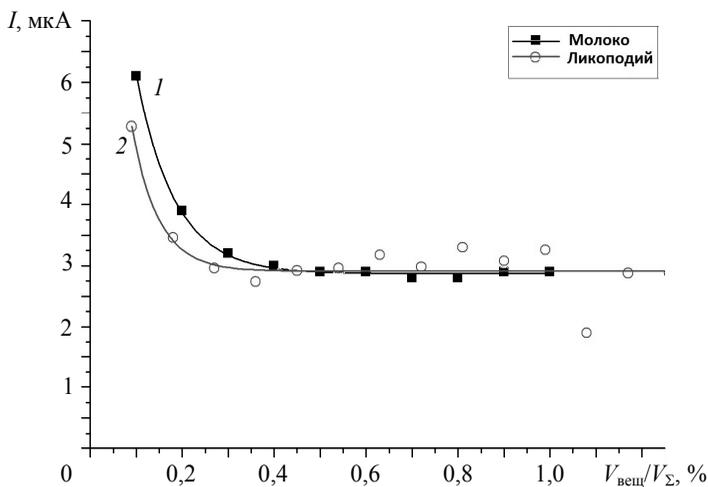


Рис. 4. Зависимость интенсивности многократно рассеянного назад излучения от объёмной доли молока и ликоподия в растворе

сигнал. Это объясняется тем, что у больших частиц индикатриса рассеяния преимущественно вытянута в направлении вперед. С дальнейшим увеличением концентрации частиц в растворе величина сигнала многократно рассеянного назад излучения практически не меняется. Это объясняется тем, что сигнал многократного рассеяния уже сформировался и изменяться уже дальше не будет с увеличением объёмной доли веществ. Таким образом, лабораторная установка позволяет исследовать влияние микроструктуры дисперсной среды на характеристики многократно рассеянного назад излучения до объёмной доли равной 0,4–0,5 %. Использование ПЗС-камеры в качестве регистрирующего устройства позволит исследовать структуру сигнала многократного рассеяния [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 18. – № 12. – С. 1051–1057.
2. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Оптика атмосферного аэрозоля. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 250 с.
3. Bryukhanova V.V. // Russ. Phys. J. – 2011. – V. 53. – No. 9. – P. 920–926.

Ни Евгений Вячеславович, аспирант; konung@mail.tsu.ru;
Брюханов Илья Дмитриевич, аспирант; plyton@mail.tsu.ru;
Свиридов Егор Игоревич, студент; EgoryanZZZ@yandex.ru.