РАЗДЕЛ 3. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 535.361:535.43.07

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ОСЛАБЛЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОПТИЧЕСКИ ПЛОТНЫХ СУБМИКРОННЫХ ДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ

Э.А. Мецлер, С.С. Титов, А.А. Жирнов, А.А. Павленко, В.А. Архипов

В данной работе рассмотрены основные условия применимости закона Бугера-Ламберта-Бера для прямого оптического излучения, прошедшего через дисперсную среду. Приведены результаты экспериментальных исследований ослабления оптического излучения дисперсными средами, имеющими малые и крупные рассеиватели для различных условий проведения эксперимента (изменение угла поля зрения оптической системы коллиматор-фотоприемник, изменение расстояния между фотоприёмником и кюветой с модельной средой).

Ключевые слова: аэрозоль, дисперсная среда, размер частиц, спектральная оптическая плотность.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование взаимодействия электромагнитного излучения с дисперсными средами является одним из важнейших разделов оптики аэрозолей. В центре этого раздела развитие приближенных методов решения прямой и обратной задачи оптики аэрозолей. исследование на их основе закономерностей однократного и многократного рассеяния электромагнитного излучения дисперсной средой [1-4]. При этом особое внимание уделяется измерениям оптических характеристик дисперсной среды, так как существует ряд особенностей, без учета которых возникает большая погрешность в измерительных данных. В свою очередь это может привести к непредсказуемому результату вследствие неверной интерпретации полученных данных.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПУЧКА ДИСПЕРСНОЙ СРЕДОЙ

В теории рассеяния света малыми частицами разработаны различные методы и подходы к созданию методов определения дисперсности частиц. В данной работе будут рассмотрены особенности измерений интенсивности света, связанные с ослаблением оптического излучения дисперсной средой.

На рисунке 1 приведена иллюстрация ослабления света одиночной частицей. При попадании лазерного излучения на одиноч-ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4 Т.1 2016

ную частицу происходит ослабление интенсивности излучения вследствие поглощения и рассеяния света.

Экспоненциальный закон ослабления для интенсивности параллельного монохроматического оптического пучка был открыт Бугером. Для поглощающих сред этот закон обсуждался Ламбертом и экспериментально проверился Бером.



Рисунок 1 – Ослабление оптического излучения одиночной частицей

На рисунке 2 приведена иллюстрация, демонстрирующая ослабление оптического излучения слоем дисперсной среды.

При прохождении параллельным пучком света расстояние x в дисперсной средепроисходит снижение его интенсивности за счет рассеяния и поглощения (-dI) частицами дисперсной среды на пути dx пропорционально: $-dI \approx I_x dx$. Прейдя к равенству, имеем:

$$dI = -K_{\lambda}I_x dx. \tag{1}$$

Коэффициент пропорциональности K_{λ} , называется коэффициентом ослабления. Интегрирование уравнения (1) приводит к уравнению Бугера-Ламберта-Бера:

$$= I_0 e^{-K_\lambda l} = I_0 e^{-\tau},$$

I

где *I* – поток излучения, прошедший через дисперсную среду; *I*₀ – поток излучения, падающий на дисперсную среду; *l* – оптическая длина пути; *τ* – спектральная оптическая плотность.



Рисунок 2 – Ослабление лазерного излучения слоем дисперсной среды

При описании ослабления прямого излучения с помощью закона Бугера-Ламберта-Бера предполагается, что вся рассеянная частицами энергия изымается из пучка, а коэффициент ослабления определяется интегрированной во все стороны энергией, включая направленную вперед. Приемником оптического излучения наряду с прямым излучением всегда регистрируется какая-то доля рассеянного вперед излучения. Эта доля зависит от условий проведения эксперимента и определяет степень отклонения закона ослабления интенсивности излучения в дисперсной среде от закона Бугера-Ламберта-Бера, даже при условии однократного рассеяния.

Основные условия применимости закона Бугера-Ламберта-Бера прямого оптического излучения можно сформулировать следующим образом [5]:

1. отсутствие собственного свечения среды в исследуемом интервале длин волн;

2. отсутствие индуцированного свечения среды (нет долгоживущих возбужденных состояний);

3. излучение строго монохроматично;

4. эффекты многократного рассеяния пренебрежительно малы;

5. отсутствуют кооперативные эффекты,

в том числе каждая частица рассеивает излучения независимо от присутствия других.

К перечисленным выше условиям применимости стоит добавить еще условия, связанные с необходимостью учета нелинейного взаимодействия излучения с веществом. Эти условия подробно описаны в работе В.Е. Зуева [6]:

 плотность мощности оптического пучка недостаточна для проявления нелинейных эффектов;

7. длительность оптических импульсов недостаточно мала для проявления эффектов нестационарного взаимодействия.

Ослабление оптического излучения дисперсной средой в целом полностью характеризуется парой характеристик, но только в случае изотропно рассеивающих частиц среды. Если дисперсная среда оптически активна или анизотропна, тогда ослабление оптического излучения описывается большим количеством параметров энергетических характеристик [6].

Из всех перечисленных условий многократное рассеяние является на практике наиболее важной причиной, приводящей к отклонению закона ослабления интенсивности излучения от экспоненциального. Это связано с регистрацией рассеянного в направлении вперед оптического излучения, всегда в какой-то степени присутствующего при измерениях интенсивности света.

Основные факторы, определяющие изменение интенсивности света, проходящего через рассеивающий объем, удобнее рассмотреть, используя уравнение переноса излучения [6]:

$$\frac{\partial I}{\partial l} = -kI + \frac{k_p}{4\pi} \int I f(\gamma) \partial \omega + b_0, \qquad (2)$$

где $k = k_p + k_n$ – объемный коэффициент ослабления, k_p – объёмный коэффициент рассеяния, k_n – объемный коэффициент поглощения $f(\gamma)$ – индикатриса рассеяния.

Первый член уравнения 2 правой части описывает уменьшение интенсивности с коэффициентом пропорциональности *k* и определит когерентную часть. Второй член описывает увеличение интенсивности за счет рассеянного излучения на частицах и определяет некогерентную составляющую. Третий член определяет вклад дополнительной интенсивности света, который создается в рассеивающей среде от посторонних источников излучения (лампы освещения, солнце).

От каждой частицы, находящейся в элементарном объеме на расстоянии L от фотоприемника будет фиксироваться доля рассеянного вперед излучения, сосредоточенная внутри конуса с угловым раствором ψ (рисунок 3).

На рисунке 3 для сферических частиц , приведены индикатрисы рассеяния. Приве-ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4 Т.1 2016

50

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ОСЛАБЛЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОПТИЧЕСКИ ПЛОТНЫХ СУБМИКРОННЫХ ДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ

ден угол поля зрения оптической системы коллиматор-фотоприемник. При учете только однократного рассеяния эта доля рассеянного вперед излучения для больших сферических частиц определяется [6]:

$$F(\xi) = -\frac{k_p}{4\pi} 2\pi \int_0^{\psi} f(\gamma) \gamma \partial \gamma,$$

где $\xi = \rho \psi$, $\rho = \pi D / \lambda$ – безразмерный параметр дифракции; D – диаметр частицы, λ – длина волны.



Рисунок 3 – Иллюстрация увеличения интенсивности света, падающего на фотоприемник за счет рассеянного излучения на частицах

На рисунке 4 приведены нормированные индикатрисы рассеяния для частиц диаметром D = 1 мкм и D = 4 мкм ($\lambda = 0,63$ мкм). В выноске справа приведены индикатрисы рассеяния для частиц тех же частиц в полярной системе координат. Из зависимостей, приведенных на рисунке 4. можно увидеть. что почти вся энергия рассеянного света заключена в конусе с половинным углом 15 градусов. Для регистрации интенсивности излучения, вызванного только поглощением среды, угол поля зрения оптической системы коллиматорфотоприемник Θ должен быть намного меньше, чем ψ . В общем, почти весь рассеянный свет заключен в пределах конуса с половинным углом равным $10\lambda/\pi D$ [7]. Таким образом, для частиц фиксированного размера самая короткая длина волны будет определять максимально возможный угол поля зрения оптической системы коллиматор-фотоприемник.

В работе Зуева [6] показано, что отклонение от закономерности рассеивания независимыми частицами (условие 5) обнаруживается для малых рассеивателей ($\rho \le 10$) при расстоянии между ними менее 2 диаметров, а для больших ($\rho > 10$) при расстоянии менее 5 диаметров. Расстояния между частицами *L* определяется выражением:

$$L = \frac{1 - D\sqrt[3]{C_n}}{\sqrt[3]{C_n}},$$

где *С*_{*n*} – счетная концентрация.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4 Т.1 2016



Рисунок 4 – Индикатрисы рассеяния частиц для длины волны 0,63 мкм

Структурная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 5. Экспериментальное исследование условий применимости закона Бугера-Ламберта-Бера проводилось с использованием набора кварцевых кювет (5 мм, 10 мм, 20 мм, 30 мм, 40 мм и 50 мм) и двух дисперсных сред, имеющих крупные и малые рассеивали. Кюветы располагались на расстоянии *Lд* до фотоприемника (15 мм, 150 мм и 250 мм). Угол поля зрения системы коллиматор-фотоприемник устанавливался изменением диаметра ирисовой диафрагмы. Источник излучения – гелийнеоновый лазер HRP120 «ThorLabs» (длина волны 0,63 мкм, диаметр луча 1 мм).





На рисунке 6 и 7 приведены экспериментальные зависимости ослабления лазерного излучения от длины оптического пути для малых рассеивателей $\rho = 5,9$ (суспензия оксида алюминия), крупных рассеивателей $\rho = 22,5$ (водная эмульсия молока), соответственно. Зависимости под номерами 1, 2 и 3 соответствуют расстояниям (*L*∂) 15 мм, 150 мм и 250 мм. Ось ординат имеет логарифмический масштаб и отклонение зависимостей ослабления оптического излучения от линейного соответствует отклонению от экспоненциального закона Бугера-Ламберта-Бера.





а) – поле зрения системы коллиматор-фотоприемник 3°;
б) – поле зрения системы коллиматор-фотоприемник 34°.





Такое отклонение экспериментальных зависимостей (рисунки 6 и 7) от экспоненциального объясняется вкладом многократного рассеяния (некогерентная составляющая).

Из анализа зависимостей ослабления оптического излучения малыми рассеивателями. приведенных на рисунке 5, видно, что существенное влияние на отклонения закона ослабления оптического излучения от закона Бугера-Ламберта-Бера оказывает как дистанция между фотоприемником и кюветой, так и поле зрения системы коллиматор-фотоприемник. Для экспериментальных точек соответствующих минимальной длине оптического пути 5 мм (рисунок 6 а, зависимости 1 и 2) видно, что имеется существенный вклад рассеянного излучение для расстояний (Ld) 150 мм и 250 мм. Также зависимости 1, 2 и 3 имеют различный тангенс угла наклона, который соответствует коэффициенту ослабления К, и для фиксированной длины волны является константой.

Из анализа зависимостей, ослабления оптического излучения большими рассеивателями, приведенных на рисунке 7, видно, что существенное влияние рассеянное излучение проявляет только на минимальном расстоянии L d = 15 мм. Для зависимостей 1 и 2 (рисунок 6 а, б) независимо от поля зрения системы коллиматор-фотоприемник коэффициент ослабления остается одинаковым $K_{\lambda} = 0,259$ мм⁻¹, вследствие более вытянутой вперед индикатрисы рассеяния (рисунок 4).

Важным вопросом при определении параметров частиц двухфазных потоков является калибровка измерительного тракта. Цель калибровки – установление линейного режима работы фотоприемников и осуществление идентификации спектральной оптической плотности (τ) двухфазного потока эталонным значениям спектральной оптической плотности калибровочных светофильтров. Случайная погрешность определения спектральной оптической плотности эталонных светофильтров определяется путем статической обработки результатов многократных измерений.

Так как доля зарегистрированного рассеянного оптического излучения зависит от условий проведения эксперимента и определяет основную долю отклонения закона ослабления излучения от экспоненциального, то при проведении экспериментальных исследований необходимо дополнительно соблюдать следующие условия:

 $\Theta \ll \frac{10\lambda}{\pi D};$ $\frac{l}{L\partial} \ll 1$,

где *L* ∂ – расстояние между кюветой с дисперсной средой и фотоприемником.

выводы

Экспериментально показано отклонение закона ослабления интенсивности излучения в дисперсной среде для малых и крупных рассеивателей от закона Бугера-Ламберта-Бера при различных условиях проведения эксперимента (расстояние от фотоприемника до кюветы 15 мм, 150 мм и 250 мм, поле зрения системы коллиматор-фотоприемник 3° и 34°).Таким образом, для корректного измерения ослабления оптического излучения субмикронными дисперсными средами необходимо каждый раз проводить калибровку измерительного тракта и проверять выполнимость условий применимости закона Бугера-Ламберта-Бера.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант мол_нр 16-32-50111).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ван де Хюлст, Г. Рассеяние света малыми частицами / Г. Ван де Хюлст. – М., 1961. – 460 с.

2. Дейрменджан, Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами / Д. Дейрменджан. – М. : Мир, 1971. – 168 с.

3. Архипов, В. А. Оптические методы диагностики гетерогенной плазмы продуктов сгорания : учебное пособие / В. А. Архипов, С. С. Бондарчук. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2012. – 265 с.

4. Mishchenko, M. I. Scattering, absorption, and emission of light by small particles / M. I. Mishchenko, L. D. Travis, A. A. Lacis. – New York : Cambridge University Press, 2002, – 128 p.

5. Донченко, В. А. Рассеяние оптических волн дисперсными средами. Часть ІІ. Система частиц / В. А. Донченко, М. В. Кабанов, Б. А. Савельев. – Томск : ТФСОАНСССР, 1983. – 185 с.

6. Зуев, В. Е. Оптика атмосферного аэрозоля / В. Е. Зуев, М. В. Кабанов. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1987. – 255 с.

7. Bohren, C. F. Absorption and Scattering of Light by Small Particles / C. F. Bohren, D. R. Huffman. – New York : Wiley-Interscience, 1983. – 530 p.

Мецлер Эдуард Андреевич, младший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), Россия, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, е-mail: mezlered @mail.ru, тел.: 8 (3854) 30-58-47. Титов Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химикоэнергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), Россия, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, e-mail: titov@ipcet.ru, тел.: 8 (3854) 30-17-25.

Жирнов Анатолий Алексеевич, младший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), Россия, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, е-mail: totuol 88@mail.ru, тел.: 8 (3854) 30-58-47.

Павленко Анатолий Александрович, доктор физико-математических наук, заве-

дующий лабораторией физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), Россия, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, e-mail: admin@ipcet.ru, тел.: 8 (3854) 30-14-43.

Архипов Владимир Афанасьевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), Россия, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, е-таіl: leva @niipmm.tsu.ru.