

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕГО ОБЪЕМНО-ПОВЕРХНОСТНОГО ДИАМЕТРА ЧАСТИЦ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД

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

*В данной работе описан математический аппарат определения среднего объемно-поверхностного диаметра и массовой концентрации частиц дисперсных сред. Представлена структурная схема экспериментальной установки для определения этих параметров. Описан принцип действия экспериментальной установки.*

*Ключевые слова: аэрозоль, дисперсная среда, размер частиц, оптическая плотность*

### ВВЕДЕНИЕ

Дисперсные среды в виде аэрозольных образований, пыли, дыма широко распространены в природе. Особый интерес вызывают мелкодисперсные образования, так как они могут оказывать пагубное воздействие на протекание технологических процессов благодаря высокой проникающей способности. С другой стороны, они могут применяться при медикаментозном лечении (ингаляция, спрей) и т.п.

Все это обуславливает развитие методов и средств определения дисперсных характеристик аэрозольных образований. При этом наиболее актуальными являются бесконтактные методы диагностики, основанные на явлениях поглощения и рассеяния частицами оптического излучения, как не вносящие возмущений в исследуемую среду.

### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕГО ОБЪЕМНО-ПОВЕРХНОСТНОГО ДИАМЕТРА И КОНЦЕНТРАЦИИ ЧАСТИЦ

В основе метода лежит решение обратной задачи для интегрального уравнения:

$$\tau_\lambda = \frac{\pi C_n l}{4} \int_0^\infty D^2 Q(D, \lambda, m) f(D) dD, \quad (1)$$

где  $\tau_\lambda$  – коэффициент спектральной прозрачности на длине волны  $\lambda$ ;  $C_n$  – счетная концентрация частиц;  $l$  – длина оптического пути;  $D$  – диаметр частицы;  $Q$  – фактор эффективности ослабления излучения;  $m$  – комплексный показатель преломления материала частиц;  $f(D)$  – функция распределения частиц по размерам.

Усредненный фактор эффективности ослабления излучения определяется выражением:

$$\bar{Q}(D, \lambda, m) = \frac{\int_0^\infty D^2 Q(D, \lambda, m) f(D) dD}{\int_0^\infty D^2 f(D) dD}. \quad (2)$$

Заменив счетную концентрацию частиц  $C_n$  на массовую  $C_m$ , которая определяется следующим выражением:

$$C_m = C_n \frac{\pi \rho}{6} \int_0^\infty D^3 f(D) dD, \quad (3)$$

получим выражение для коэффициента спектральной прозрачности:

$$\tau_\lambda = \frac{1,5 C_m \bar{Q}(D, \lambda, m)}{\rho D_{32}}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность материала частиц.

Средний объемно-поверхностный диаметр частиц определяется выражением:

$$D_{32} = \frac{\int_0^\infty D^3 f(D) dD}{\int_0^\infty D^2 f(D) dD}. \quad (5)$$

Методика определения среднего объемно-поверхностного диаметра частиц ( $D_{32}$ ) основана на использовании отношения значений усредненного фактора эффективности ослабления для двух длин волн как функции от среднего размера частиц  $D_{32}$ . При этом задача определения  $D_{32}$  сводится к измерению значений коэффициента спектральной прозрачности дисперсной среды на двух длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  и расчету величин усредненного фактора эффективности ослабления лазерного излучения для этих же длин волн [1].

Определение среднего объемно-поверхностного диаметра осуществляется в несколько этапов: 1) строится теоретическая зависимость отношения значений усредненного фактора эффективности ослабления излучения от  $D_{32}$ . Расчет ведется в соответствии с выражением:

$$F(D_{32}) = \frac{\bar{Q}(\lambda_1, D_{32})}{\bar{Q}(\lambda_2, D_{32})} = \frac{\tau_{\lambda_1}}{\tau_{\lambda_2}}, \quad (6)$$

2) из теоретически полученной зависимости  $F(D_{32})$ , подбирается наиболее близкое значение функции  $F(D_{32})$  к значению отношения

экспериментально измененных коэффициентов спектральной прозрачности на двух длинах волн; аргумент этой функции является искомой величиной  $D_{32}$ .

Диапазон определения средних размеров частиц зависит от выбора длин волн зондирующего излучения. В нашем случае, выбор длин волн зондирующего лазерного излучения основан на расчете, выполненном по методике [2]. Диапазон определения  $D_{32}$  выбирается таким образом, что погрешность определения в нем не превышает заданного значения. Таким образом, выбранные длины волн 0,405 мкм, 0,980 мкм и 3,39 мкм обеспечивают диапазон определения среднего объемно-поверхностного диаметра от 0,7 мкм до 3,7 мкм, при этом относительная погрешность определения не будет превышать значения 5 %.

На рисунке 1 приведены зависимости отношения значений усредненного фактора эффективности ослабления излучения для длин волн  $\lambda_1 = 3,39$  мкм и  $\lambda_2 = 0,405$  мкм от  $D_{32}$  для водного аэрозоля. Оптические константы для частиц водного аэрозоля взяты из работы [3]. На рисунке 1 продемонстрирован способ определения  $D_{32}$  по зависимости  $F(D_{32})$ .

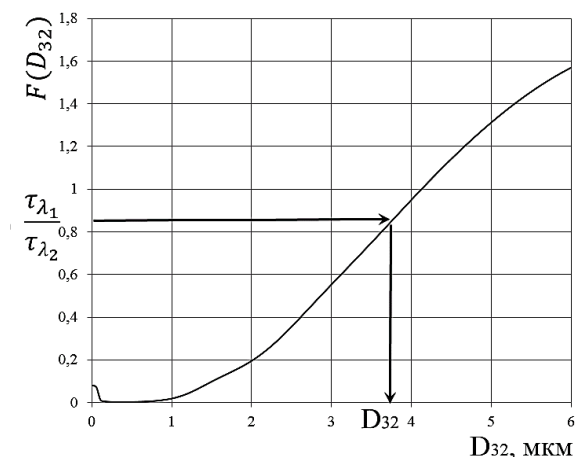


Рисунок 1 – Зависимость отношения значений усредненного фактора эффективности ослабления излучения от среднего объемно-поверхностного диаметра частиц

Расчет массовой концентрации осуществляется после экспериментально определения значения  $D_{32}$  и  $\tau_{\lambda}$  с использованием следующего выражения:

$$C_m = \frac{\tau_{\lambda} \rho D_{32}}{1,51 Q(D_{32}, \lambda, m)}. \quad (7)$$

Определение массовой концентрации

возможно, если известна оптическая длина зондирования или она определена экспериментально.

### СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Структурная схема экспериментальной установки (рисунок 2) состоит из трех источников лазерного излучения (1): гелий-неоновый лазер 3,39 мкм, полупроводниковые лазеры 0,980 мкм и 0,405 мкм. Сведение лазерного излучения в один световой пучок происходит с использованием полупрозрачных зеркал (2). Лазерное излучение (3), проходя через механический модулятор и диафрагму (5), попадает в измерительный объем (6), где ослабляется аэрозольным облаком. Механический модулятор (4) формирует прямоугольные импульсы со скважностью, равной 2. Далее ослабленное лазерное излучение попадает в фотоприёмный блок, где происходит разделение лазерного пучка на исходные составляющие 3,39 мкм, 0,980 мкм и 0,405 мкм. Селекция лазерного пучка происходит следующим образом:

– выделение длины волны 3,39 мкм. Лазерный пучок (3) частично отражается от полупрозрачного зеркала (2) в фотоприёмном блоке и попадает на фотоприемник МГ-33. При этом отраженный лазерный пучок содержит все исходные компоненты: 3,39 мкм, 0,980 мкм и 0,405 мкм. Поскольку спектральный диапазон пироэлектрического приемника МГ-33 находится в диапазоне длин волн от 2 мкм до 20 мкм, то компоненты лазерного пучка 0,980 мкм и 0,405 мкм не оказывают влияния на регистрацию интенсивности излучения на длине волны 3,39 мкм.

– выделение длины волны 0,980 мкм и 0,405 мкм. Лазерный пучок, прошедший через полупрозрачное зеркало (2) в фотоприёмном блоке, содержит все исходные компоненты: 3,39 мкм, 0,980 мкм и 0,405 мкм. Лазерное излучение, попадая на дихроическое зеркало (8), разделяется на две компоненты: 0,405 мкм (отраженную) и 0,980 мкм (прошедшую) благодаря свойству избирательного отражения/пропускания дихроического зеркала. При этом его коэффициент отражения/пропускания близок к 0,9. Компонента лазерного пучка 3,39 мкм не оказывает влияния на регистрацию интенсивности излучения на длинах волн 0,980 мкм и 0,405 мкм благодаря селективности фотоприемников. В качестве фотоприемников используются кремниевые фотодиоды ФДУК-11, имеющие спектральный диапазон чувствительности от 0,280 мкм до 1,100 мкм.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕГО ОБЪЕМНО-ПОВЕРХНОСТНОГО ДИАМЕТРА ЧАСТИЦ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД

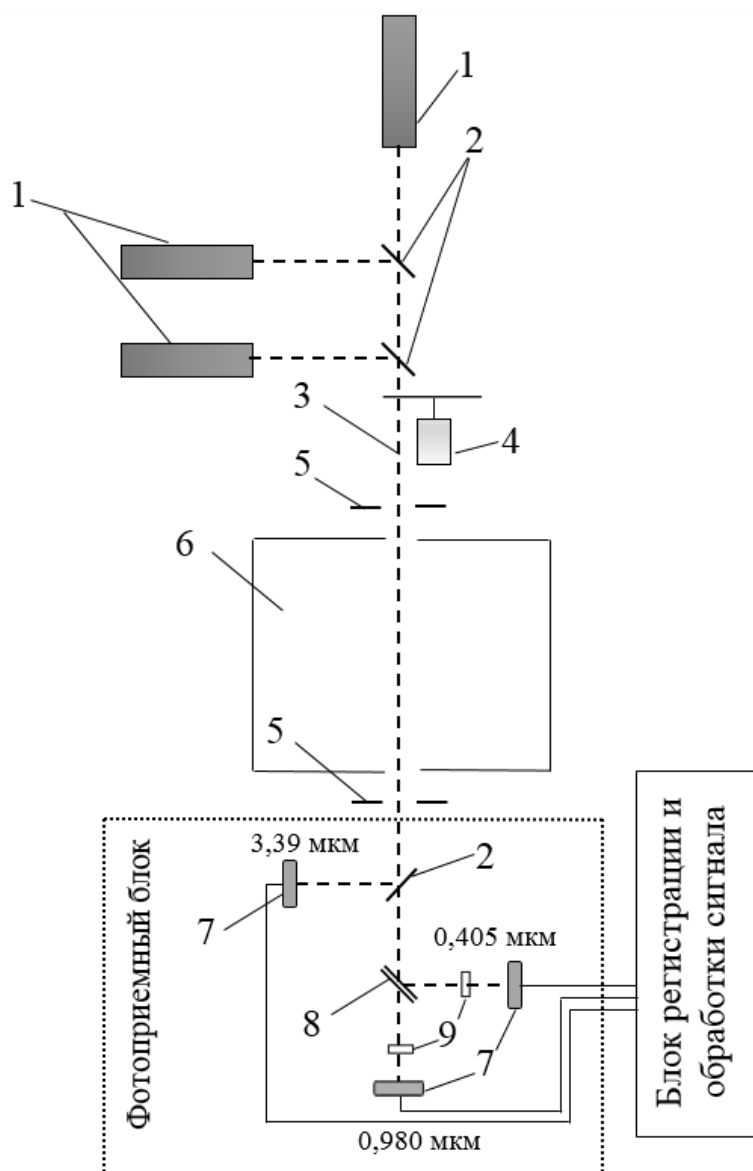


Рисунок 2 – Структурная схема измерительной установки: 1 – источник лазерного излучения; 2 – полупрозрачное зеркало; 3 – лазерный пучок; 4 – модулятор; 5 – диафрагма; 6 – измерительный объем; 7 – фотоприемник; 8 – дихроическое зеркало; 9 – светофильтр.

Далее отраженная (0,405 мкм) и прошедшая (0,980 мкм) компоненты лазерного пучка через соответствующие светофильтры (9) попадают на фотоприемники. Применение светофильтров обусловлено тем, что отраженная компонента 0,405 мкм содержит долю компонента 0,980 мкм, и наоборот, прошедшая компонента 0,980 мкм частично содержит компоненту 0,405 мкм. Это связано с неидеальностью характеристик отражения/пропускания дихроического зеркала. Структурная схема блока регистрации и обработки сигнала приведена на рисунке 3. Так как пироэлектрический приемник МГ-33 имеет ограниченную полосу пропускания (ограничение частоты модуляции не более 0,2 кГц), то частота модуляции оптического излучения экспериментальной установки выбрана 0,2 кГц.

Лазерное излучение, ослабленное облаком аэрозоля, регистрируется фотоприемниками отдельно для каждой длины волны. Лазерное излучение на длине волны 3,39 мкм попадает на пироэлектрический приемник МГ-33. Сигнал с фотоприемника МГ-33 пройдя, через предварительный усилитель (ПУ) и полосовой фильтр (ПФ) снова усиливается. Сигнал с усилителя (У) регистрируется аналого-цифровым преобразователем (АЦП).

Лазерное излучение, ослабленное облаком аэрозоля, регистрируется фотоприемниками отдельно для каждой длины волны. Лазерное излучение на длине волны 3,39 мкм попадает на пироэлектрический приемник МГ-33. Сигнал с фотоприемника МГ-33 пройдя, через предварительный усилитель (ПУ) и полосовой фильтр (ПФ) снова усиливается. Сигнал с усилителя (У) регистрируется аналого-цифровым преобразователем (АЦП).

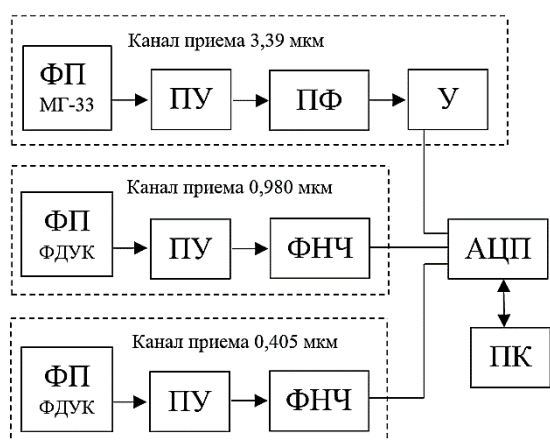


Рисунок 3 – Структурная схема блока регистрации и обработки сигнала:  
 ФП – фотоприемник; ПУ – предварительный усилитель; У – усилитель; ПФ – полосовой фильтр; ФНЧ – фильтр нижних частот; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер.

Для канала приема длины волны 3,39 мкм был синтезирован полосовой фильтр Баттерворта 6-го порядка с частотой среза 200 Гц. Применение полосового фильтра обусловлено шумами сигнала фотоприемника МГ-33 как в области высоких частот, так и низких частот.

На рисунке 4 приведена амплитудно-частотная характеристика полосового фильтра Баттерворта 6-го порядка.

Лазерное излучение на длинах волн 0,980 мкм и 0,405 мкм попадает на кремниевые фотоприёмники ФДУК-11, соответственно своих каналов приема. Сигнал с ФДУК-11, пройдя через предварительный усилитель (ПУ) и фильтр нижних частот (ФНЧ), регистрируется АЦП. Для подавления шумов были синтезированы фильтры нижних частот в каналах приема длин волн 0,980 мкм и 0,405 мкм. ФНЧ представляет собой аналоговые фильтры Баттерворта 2-го порядка с частотой среза 0,8 кГц. Регистрация сигнала осуществляется аналого-цифровым преобразователем (АЦП) L-791 (фирмы L-Card). L-791 – это 16 битное АЦП, имеющие 16 дифференциальных входов с частотой дискретизации до 300 кГц.

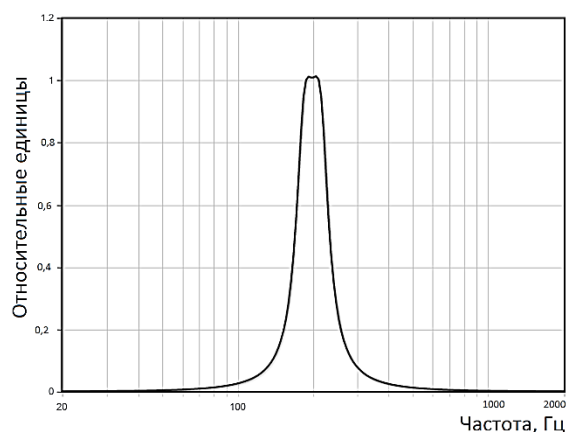


Рисунок 4 – Амплитудно-частотная характеристика полосового фильтра Баттерворта 6-го порядка

На рисунке 5 приведена временная развертка сигналов с фотоприёмников.

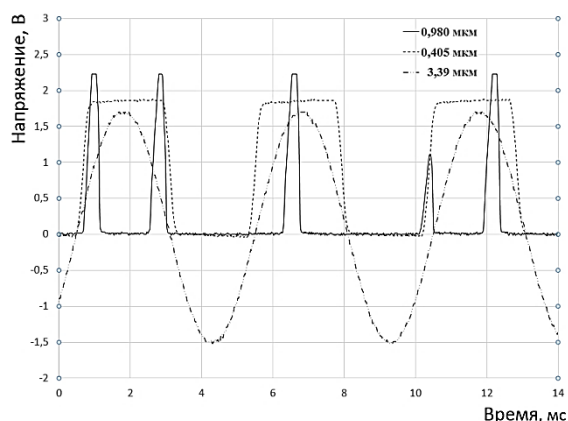


Рисунок 5 – Временная развертка сигналов с фотоприёмников

Лазерный источник на 0,980 мкм представляет собой импульсный полупроводниковый лазер с частотой следования импульсов 0,55 кГц. Из зависимостей, приведенных на рисунке 5, видно, что при модуляции оптического излучения с частотой 0,2 кГц, информативным будет оставаться хотя бы один импульс лазерного источника 0,980 мкм в промежутке времени, когда модулятор открыт.

Пирозлектрический фотоприемник МГ-33 формирует двухполярный прямоугольный сигнал. Сигнал, пройдя полосовой фильтр, преобразуется в гармонический сигнал той же частоты, амплитуда которого пропорциональна амплитуде прямоугольных импульсов исходного сигнала.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕГО ОБЪЕМНО-ПОВЕРХНОСТНОГО ДИАМЕТРА ЧАСТИЦ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД

### ВЫВОДЫ

Таким образом, разработана экспериментальная установка и создано программное обеспечение для определения параметров дисперсных сред (массовая концентрация и средний объемно-поверхностного диаметр частиц). При этом в диапазоне определения среднего объемно-поверхностного диаметра от 0,7 мкм до 3,7 мкм, относительная погрешность определения не будет превышать значения 5 %.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант мол\_нр 15-32-50547).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архипов, В. А. Модифицированный метод спектральной прозрачности измерения дисперсности аэрозолей / В. А. Архипов, И. Р. Ахмадеев, С. С. Бондарчук, Б. И. Ворожцов, А. А. Павленко, М. Г. Потапов // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20, № 1. С. 48–52.

2. Мецлер, Э. А. Оптимизация алгоритма определения дисперсности аэрозолей в турбидиметрическом высокоселективном методе / Э. А. Мецлер, С. С. Титов, А. А. Павленко // Южно-сибирский научный вестник. – 2014. – выпуск 2 (6). – С. 95–97.

3. Refractive index database: электронная база данных. URL: <http://refractiveindex.info/>.

**Титов Сергей Сергеевич**, кандидат технических наук, ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирско-

го отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), ул. Социалистическая, 1, г. Бийск, Россия, тел. 8 (3854) 30-17-25, e-mail: [titov@ipcet.ru](mailto:titov@ipcet.ru).

**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), ул. Социалистическая, 1, г. Бийск, Россия, тел. 8 (3854) 30-17-25, e-mail: [mezlered@mail.ru](mailto:mezlered@mail.ru).

**Павленко Анатолий Александрович**, доктор физико-математических наук, заведующий лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), ул. Социалистическая, 1, г. Бийск, Россия, тел. 8 (3854) 30-14-43, e-mail: [admin@ipcet.ru](mailto:admin@ipcet.ru).

**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), ул. Социалистическая, 1, г. Бийск, Россия, e-mail: [leva@niipmm.tsu.ru](mailto:leva@niipmm.tsu.ru).