

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ПАРАМЕТРОВ АЭРОЗОЛЬНЫХ СУБМИКРОННЫХ СРЕД

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

*Рассмотрена новая экспериментальная установка для определения концентрации, среднего размера частиц и функции распределения частиц по размерам аэрозольной среды в динамическом режиме. Представлена методика определения дисперсных характеристик аэрозольных сред. Приведены результаты экспериментального исследования параметров аэрозольной среды.*

*Ключевые слова: аэрозоль, обратная задача оптики аэрозолей, размер частиц, функция распределения частиц по размерам, спектральная оптическая плотность*

### ВВЕДЕНИЕ

Работа направлена на развитие и модификацию турбидиметрического метода (метода спектральной прозрачности [1]) путем перехода от использования непрерывного спектра к набору дискретных длин волн зондирующего излучения. При замене источника излучения с непрерывным спектром на набор монохроматических источников излучения (лазеров) необходима замена приемника излучения (спектрометра) на набор фотодиодов с системой селекции. К преимуществам разработанного метода относятся:

- возможность диагностики дисперсных сред с увеличенной (до нескольких метров) длиной оптического пути за счет использования коллимированного излучения с большой пространственной плотностью энергии;

- возможность исследования оптически плотных сред с обеспечением выполнимости закона Бугера-Ламберта-Бера;

- повышение точности измерения интенсивности зондирующего излучения за счет увеличения отношения сигнал/шум при использовании фотодиодов в качестве приемников излучения;

- компактность и мобильность измерительной установки.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСНЫХ ПАРАМЕТРОВ АЭРОЗОЛЬНОЙ СРЕДЫ

Восстановление функции распределения частиц по размерам при дистанционной диагностике дисперсных сред по экспериментальным данным об

ослаблении оптического излучения этой средой осуществляется путем решения обратной задачи оптики аэрозолей. В качестве основного уравнения для решения данной обратной задачи оптики аэрозолей используется уравнение Фредгольма первого рода [2]:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\tau(\lambda)], \quad (1)$$

$$\text{где } \tau(\lambda) = \frac{\pi C_n l}{4} \int_0^{\infty} Q\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m(\lambda)\right) D^2 f(D) dD$$

где  $I(\lambda)$  – поток излучения, прошедший через дисперсную среду на длине волны  $\lambda$ ;  $I_0(\lambda)$  – поток излучения, падающий на дисперсную среду на длине волны  $\lambda$ ;  $\tau(\lambda)$  – спектральная оптическая плотность на длине волны  $\lambda$ ;  $C_n$  – счетная концентрация частиц;  $l$  – длина оптического пути;  $Q$  – фактор эффективности ослабления;  $D$  – диаметр частицы;  $m(\lambda) = (n - ik)$  – комплексный показатель преломления материала частиц ( $n$  – показатель преломления;  $k$  – показатель поглощения);  $f(D)$  – функция счетного распределения частиц по размерам.

Искомая функция распределения частиц по размерам априорно задается в виде логарифмически нормального распределения частиц по размерам (ЛНР):

$$f(D) = \frac{1}{D\sqrt{2\pi \ln \sigma}} \exp\left[-\frac{(\ln D - \ln \bar{D})^2}{2(\ln \sigma)^2}\right], \quad (2)$$

где  $\ln \sigma$  – логарифм среднеквадратического отклонения диаметров частиц;

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ПАРАМЕТРОВ АЭРОЗОЛЬНЫХ СУБМИКРОННЫХ СРЕД

$\ln \bar{D}$  – логарифм математического ожидания диаметров частиц.

Для решения обратной задачи оптики аэрозоля используется вариационный подход к построению регуляризирующего алгоритма А.Н. Тихонова [3]. При этом на рассматриваемое множество функций распределения частиц по размерам  $\{f\}$  ( $f = f(D)$ ) накладывается ограничение, используя априорную информацию о среднем объемно-поверхностном диаметре ( $D_{32}$ ). Задача сводится к поиску минимума функционала Тихонова  $\min_{f \in G} M^\xi[f]$  на

множестве  $G$ , где  $G$  – замкнутое множество,  $\xi$  – параметр регуляризации. В соответствии с алгоритмом решения некорректно поставленных задач осуществляется минимизация функционала Тихонова [3]:

$$M^\xi[f] = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \left( \frac{\pi}{4} C_n l \int_0^\infty Q\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m(\lambda)\right) f(D) D^2 dD \right)^2 d\lambda + \xi \int_0^\infty [f^2(D) + (f'(D))^2] dD \quad (3)$$

$\tau_\delta(\lambda)$  – экспериментально определенная спектральная оптическая плотность исследуемой дисперсной среды с погрешностью  $\delta$ ;  $\lambda_{\min}$ ,  $\lambda_{\max}$  – минимальная и максимальная длина волны зондирующего излучения.

Функция распределения частиц по размерам  $f(D)$ , которая соответствует минимуму функционала Тихонова  $\min_{f \in G} M^\xi[f]$ , является решением обратной задачи.

Однако в предложенной модификации турбидиметрического метода определения дисперсных характеристик при переходе на ограниченное число длин волн зондирующего излучения возникает неопределенность при восстановлении функции распределения частиц по размерам, связанная с привлечением меньшего количества измерительных данных об исследуемой среде. Уменьшение этой неопределенности достигается промежуточным этапом, который заключается в определении осредненного размера исследуемой дисперсной среды  $D_{32}$ . Уменьшение неопределенности реализуется вследствие привлечения дополнительной информации, которая характеризует особенности искомой функции

распределения частиц по размерам. Также осредненный размер ( $D_{32}$ ) функционально связан с параметрами распределения частиц по размерам. Это позволяет конкретизировать решение поставленной задачи, то есть ограничить область решений обратной задачи оптики аэрозолей. Средний объемно-поверхностный диаметр частиц для ЛНР по размерам определяется выражением [2]

$$\ln D_{32} = \ln \bar{D} + \frac{5}{2} (\ln \sigma)^2. \quad (5)$$

Средний объемно-поверхностный диаметр частиц, определяемый выражением

$$D_{32} = \frac{\int_0^\infty D^3 f(D) dD}{\int_0^\infty D^2 f(D) dD}. \quad (6)$$

Этот размер широко используется для описания дисперсных систем.

Определение среднего объемно-поверхностного ( $D_{32}$ ) осуществляется с использованием модифицированного метода спектральной прозрачности (ММСП) [5], который основан на измерении спектральной оптической плотности аэрозольной среды для двух фиксированных длин волн зондирующего лазерного излучения. Основным уравнением метода определения  $D_{32}$  является выражение для спектральной оптической плотности слоя равномерно распределенных полидисперсных частиц:

$$\tau_\lambda = \frac{3 C_m l \bar{Q}(\lambda, D_{32})}{2 \rho D_{32}}, \quad (8)$$

где  $C_m$  – массовая концентрация частиц;  $\bar{Q}(\lambda, D_{32})$  – усредненный фактор эффективности ослабления излучения;  $\rho$  – плотность материала частиц.

Усредненный фактор эффективности ослабления  $\bar{Q}$  является важнейшей характеристикой, определяющей оптические свойства совокупности полидисперсных частиц, определяется выражением

$$\bar{Q}(\lambda, D_{32}) = \frac{\int_0^\infty Q\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m(\lambda)\right) f(D) D^2 dD}{\int_0^\infty f(D) D^2 dD}. \quad (9)$$

Как следует из уравнения (1), отношение  $\tau_\lambda$  для двух соответствующих длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  является однозначной функцией  $D_{32}$ :

$$\frac{\tau_{\lambda_2}}{\tau_{\lambda_1}} = \frac{\bar{Q}(\lambda_2, D_{32})}{\bar{Q}(\lambda_1, D_{32})} = F(D_{32}). \quad (10)$$

Путем математического моделирования установлено, что функция  $F(D_{32})$  зависит от ширины функции распределения частиц по размерам ( $\sigma$ ), это может приводить к возникновению методической погрешности в определении  $D_{32}$ . На рисунке 1 приведены зависимости  $F(D_{32})$  для ЛНР с  $\sigma = 1,2$  и  $\sigma = 1,6$  для длин волн 3,39 мкм и 0,405 мкм (водный аэрозоль). Оптические константы для частиц водного аэрозоля взяты из [5].

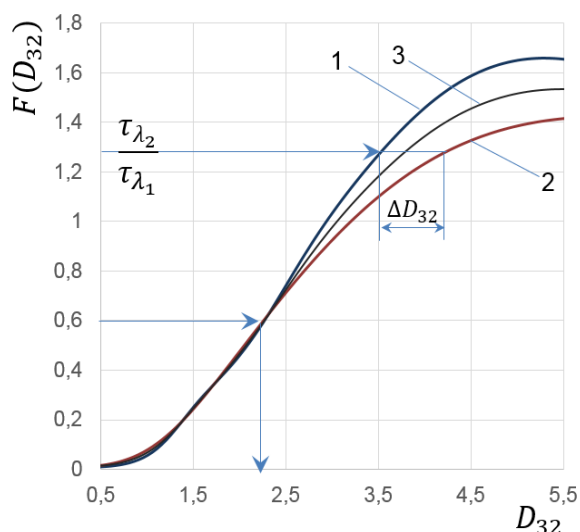


Рисунок 1 – Зависимости  $F(D_{32})$  для ЛНР с различной шириной распределения  
1 - ЛНР для  $\sigma = 1,2$ ; 2 - ЛНР для  $\sigma = 1,6$ ; 3 – среднее

Таким образом, используя информацию об ослаблении оптического излучения аэрозольной среды решается обратная задача оптики аэрозоля по восстановлению функции распределения частиц по размерам. Область решения обратной задачи ограничивается диапазоном  $\Delta D_{32}$ . Далее осуществляется минимизация функционала Тихонова. Выбирается  $f(D)$  соответствующая положению минимума. Затем по известным параметрам  $f(D)$  рассчитывается  $D_{32}$  и  $C_m$ .

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Структурная схема экспериментальной установки (рисунок 2) состоит из семи источников лазерного излучения (1): гелий-неоновый лазер  $\lambda = 3,39$  мкм и  $\lambda = 0,632$  мкм, полупроводниковые лазеры  $\lambda = 0,905$  мкм,

$\lambda = 0,850$  мкм и  $\lambda = 0,780$  мкм, диодные лазеры  $\lambda = 0,532$  мкм и  $\lambda = 0,405$  мкм. Сведение лазерного излучения один световой пучок в диапазоне длин волн от 0,405 мкм до 0,905 мкм происходит с использованием блока дихроических зеркал. Затем объединение светового пучка с лазерным излучением  $\lambda = 3,39$  мкм происходит с использованием плоскопараллельной пластины из германия (Ge).

Для гелий-неонового лазера  $\lambda = 3,39$  мкм осуществляется контроль мощности, так как у этого источника во времени происходит изменение мощности излучения. Канал контроля мощности гелий-неонового лазера  $\lambda = 3,39$  мкм состоит из светоделительной плоскопараллельной пластины из кремния (Si) и фотоприемника. Лазерное излучение, пройдя диафрагму (3), попадает в измерительный объем (4), где ослабляется аэрозольной средой. Далее ослабленное лазерное излучение попадает в фотоприемный блок, где происходит разделение лазерного пучка на исходные составляющие с использованием дифракционной решетки (5).

Лазерное излучение, ослабленное облаком аэрозоля, регистрируется фотоприемниками отдельно для каждой длины волны. Для регистрации лазерного излучения в диапазоне длин волн от  $\lambda = 0,405$  мкм до  $\lambda = 0,905$  мкм используются кремниевые фотоприемники ФДУК-11. Для регистрации лазерного излучения с  $\lambda = 3,39$  мкм используются фотоприемные устройства АМР48 (компании АИБИ) на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с однокаскадным термоэлектрическим модулем. АМР48 предназначены для регистрации оптического излучения в диапазоне от 0,8 мкм до 4,9 мкм с частотой от 150 Гц до 350 кГц. Механический обтюратор (2) производит модуляцию оптического излучения с частотой 480 Гц и скважностью 2. Регистрация сигналов с фотоприемников осуществляется аналого-цифровым преобразователем (АЦП) L-502 (фирмы L - Card), имеющим 16 дифференциальных входов с частотой дискретизации до 400 кГц.

На рисунке 3 приведен внешний вид экспериментальной установки.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ПАРАМЕТРОВ АЭРОЗОЛЬНЫХ СУБМИКРОННЫХ СРЕД

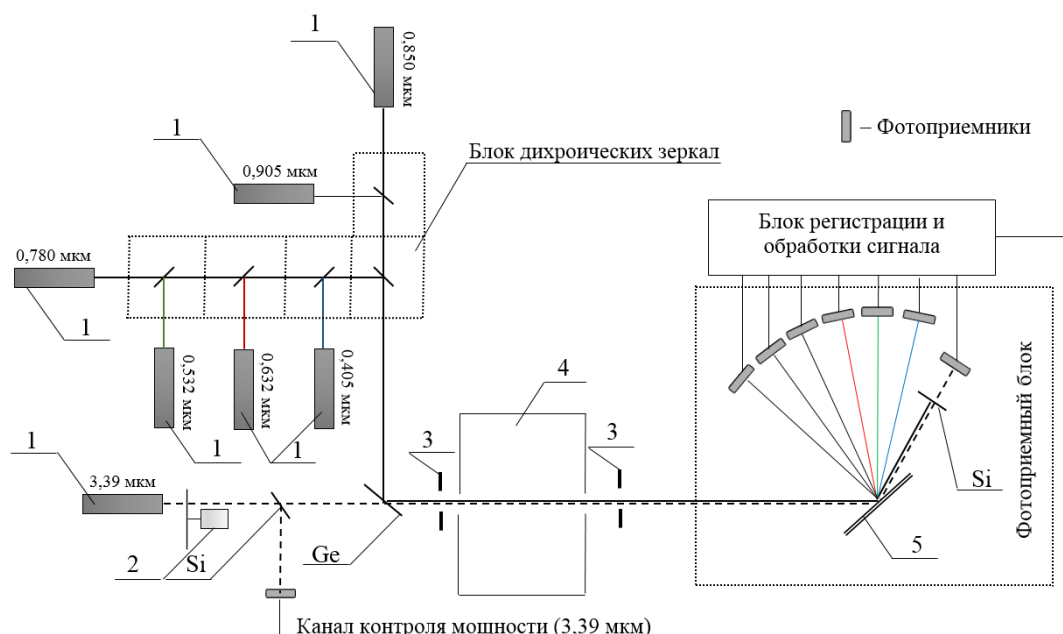


Рисунок 2 – Структурная схема измерительной установки  
 1 – лазерные источники излучения; 2 – механический модулятор света; 3 – диафрагмы;  
 4 – измерительный объем; 5 – дифракционная решетка; Si – плоскопараллельная пластина из кремния; Ge – плоскопараллельная пластина из германия

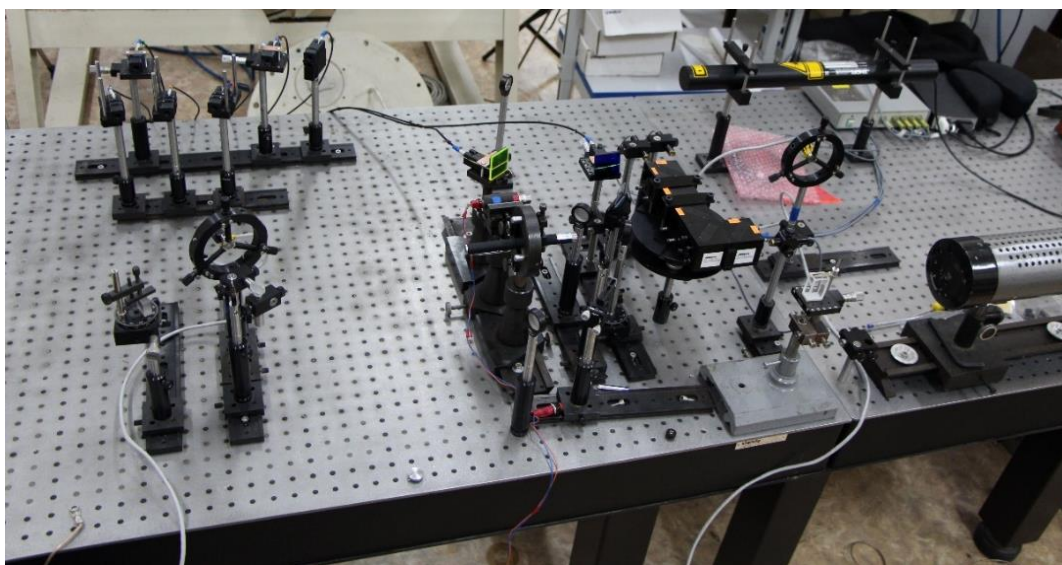


Рисунок 3 – Внешний вид экспериментальной установки

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Проведена серия экспериментов по определению динамики  $D_{32}$  аэрозольной среды, при этом первоначально для каждого момента времени была рассчитана функция распределения частиц по размерам. Далее по известному значению  $D_{32}$  была рассчитана массовая концентрации

частиц  $C_m$ . Определение дисперсных характеристик аэрозольной среды осуществлялось при заполнении измерительного объема облаком аэрозоля, создаваемым распылителем «Муссон-2». В качестве модельной жидкости для создания аэрозоля использовалась дистиллированная вода. Генерация аэрозоля осуществлялась в течении 5 с. Измерительный объем имеет размеры 8x10x16 см. Окна измерительного

объема изготовлены из лейкосапфира ( $Al_2O_3$ ), который имеет спектральную прозрачность в диапазоне длин волн зондирующего излучения (0,3 мкм – 6 мкм). На рисунке 4 приведена типичная динамика  $D_{32}$  аэрозоля в измерительном объеме.

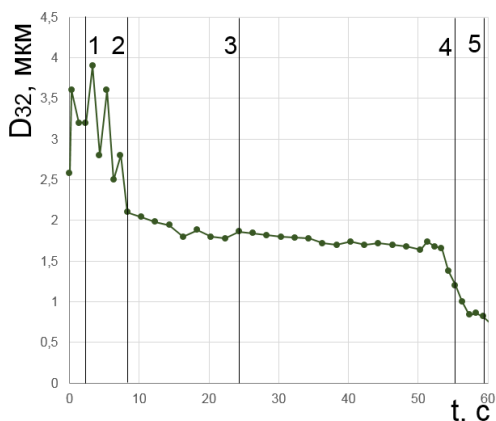


Рисунок 4 – Динамика  $D_{32}$  водного аэрозоля в замкнутом объеме

На рисунке 5 приведено изменение массовой концентрации частиц  $C_m$ .

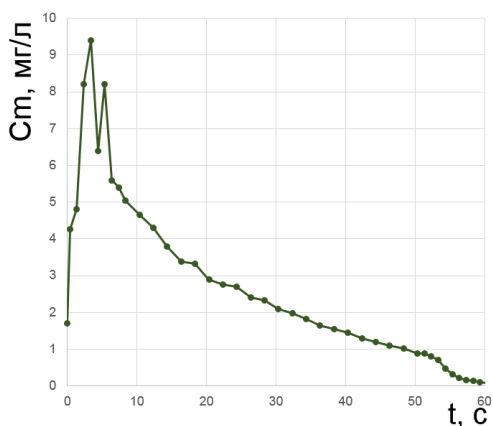


Рисунок 5 – Динамика концентрации водного аэрозоля

Эволюция аэрозоля определяется совокупным воздействием трех основных факторов: коагуляция, испарение и гравитационное осаждение. Совокупность этих основных факторов определяет динамику концентрации и размеров частиц аэрозольной среды [6].

Внешний вид зависимостей, приведенных на рисунке 4 и 5, позволяет сделать следующие выводы. Разброс значений  $D_{32}$  до 10 с (рисунок 4) объясняется нестационарным образованием облака аэрозоля. Далее наблюдается

тенденция плавного снижения размеров  $D_{32}$ , соответствующая экспоненциальному уменьшению концентрации частиц. Для объяснения полученной зависимости  $D_{32}(t)$  была проведена оценка влияния гравитационного осаждения частиц. В стационарном режиме скорость осаждения частицы  $u$  определяется уравнением [7]:

$$u = \frac{(\rho - \rho_a) D^2}{18\mu} g \quad (11)$$

где  $\rho_a$  - плотность воздуха;  $g$  - ускорение свободного падения;  $\mu$  - коэффициент динамической вязкости воздуха.

На рисунке 6 приведена зависимость скорости гравитационного осаждения от диаметра частиц.

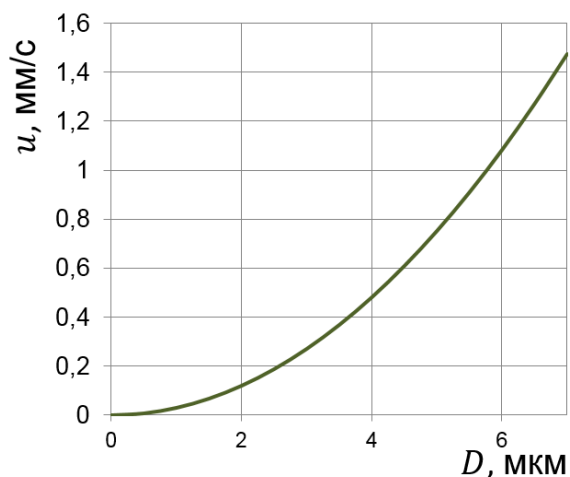


Рисунок 6 – Зависимость скорости гравитационного осаждения от диаметра частиц

Время  $T$  похождения частицей длины пути  $L$  при гравитационном осаждении определяется уравнением:

$$T = \frac{L}{u}. \quad (12)$$

На рисунке 7 приведена зависимость времени прохождения пути  $L=12$  см (так как измерение дисперсности производилось на высоте 4 см от дна измерительного объема) от диаметра частиц.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ПАРАМЕТРОВ АЭРОЗОЛЬНЫХ СУБМИКРОННЫХ СРЕД

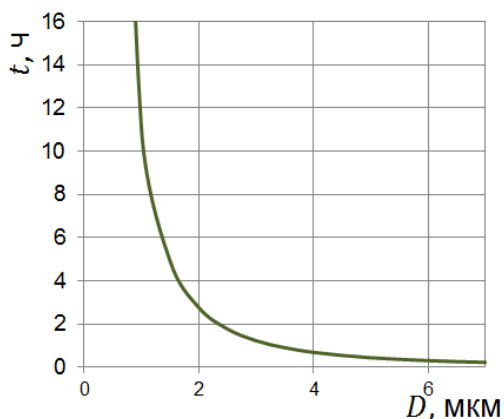


Рисунок 7 – Зависимость времени прохождения пути 12 см при осаждении частиц от их диаметра

Анализ приведенных результатов показал, что за время измерения мелкодисперсная фракция  $D < 4$  мкм практически не осаждается. Уменьшение размеров частиц при  $t > 50$  с. можно объяснить процессом испарения частиц.

Для моментов времени (1-5) выделенных на рисунке 4 приведены функции распределения частиц по размерам (рисунок 6).

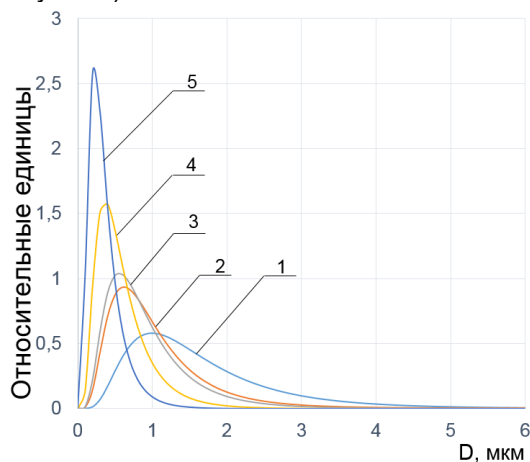


Рисунок 6 – Функции распределения частиц по размерам  
1 – 2,3 с; 2 – 8,3 с; 3 – 24,3 с; 4 – 55,3 с; 5 – 59,3 с

Внешний вид зависимостей, приведенных на рисунке 6, демонстрирует деформацию функции распределения частиц по размерам в сторону меньших диаметров в течении времени эксперимента.

### ВЫВОДЫ

- Разработана экспериментальная лазерная установка для определения

концентрации, среднего размера частиц и функции распределения частиц по размерам аэрозольной среды в динамическом режиме.

- Разработан математический аппарат решения обратной задачи оптики аэрозолей, позволяющий определять функцию распределения частиц по размерам с использованием априорной информации об экспериментально измеренном значении среднего объемно-поверхностного диаметра частиц исследуемой среды.

- Проведена серия экспериментальных исследований по определению динамики среднего объемно-поверхностного диаметра частиц аэрозольной среды, также для каждого момента времени определена функция распределения частиц по размерам и массовая концентрация частиц. Показана возможность исследования эволюции различных аэрозольных сред с использованием разработанной установки.

- Результаты измерений позволяют судить о различных процессах эволюции аэрозоля, таких как коагуляция, испарение, гравитационное осаждение частиц.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант мол\_нр 16-32-50111).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Титов С.С., Павленко А.А., Кудряшова О.Б., Архипов В.А., Бондарчук С.С., Турбидиметрический метод определения параметров субмикронных аэрозольных сред // Автометрия. – 2012. – Т. 48, № 3. – С. 68-74.
2. Архипов В.А., Бондарчук С.С. Оптические методы диагностики гетерогенной плазмы продуктов сгорания: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2012. – 265 с.
3. Ягола, А. Г. Обратные задачи и методы их решения. Приложения к геофизике [Электронный ресурс] / А. Г. Ягола, Ван Янфей, И. Э. Степанова и др. - 2-е изд. (эл.). - М. БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 216 с.
4. Архипов В.А., Ахмадеев И.Р., Бондарчук С.С., Ворожцов Б.И., Павленко А.А., Потапов М.Г. Модифицированный метод спектральной прозрачности измерения дисперсности аэрозолей // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20, №1. – С. 48-52.
5. Refractive index database: электронная база данных. URL: <http://refractiveindex.info> (дата обращения: 02.09.2016).

6. Кудряшова О.Б., Ворожцов Б.И., Антонникова А.А. Физико-математическая модель динамики функции распределения частиц по размерам с учетом процессов коагуляции, испарения и осаждения // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2012. – №1(17). – С. 81-90.

7. Архипов В.А, Усанина А.С. Движение аэрозольных частиц в потоке: Учеб. пособие. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 2013. – 92 с.

**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), E-mail: mezlered@mail.ru Ул. Социалистическая, 1, г. Бийск, Россия. Тел. 8 (3854) 30-58-47.

**Титов Сергей Сергеевич**, кандидат технических наук, ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), E-mail: titov@ipcet.ru Ул. Социалистическая, 1, г. Бийск, Россия. Тел. 8 (3854) 30-17-25.

**Муравлев Евгений Викторович**, старший 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), E-mail: admin@ipcet.ru Ул. Социалистическая, 1, г. Бийск, Россия. Тел. 8 (3854) 30-58-47.

**Павленко Анатолий Александрович**, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), E-mail: admin@ipcet.ru Ул. Социалистическая, 1, г. Бийск, Россия. 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), E-mail: leva@niipmm.tsu.ru Ул. Социалистическая, 1, г. Бийск, Россия.