

На правах рукописи

Мецлер Эдуард Андреевич

**ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ДИСТАНЦИОННОЙ ЭКСПРЕСС-
ДИАГНОСТИКИ ДИСПЕРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХФАЗНЫХ
СРЕД**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), в Лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов.

Научный руководитель: **Павленко Анатолий Александрович**, доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Каленский Александр Васильевич**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет» (КемГУ), г. Кемерово, профессор кафедры Химии твердого тела и химического материаловедения

Сыпин Евгений Викторович, кандидат технических наук, доцент, Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск, доцент кафедры Методов и средств измерений и автоматизации

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР), г. Томск

Защита состоится «18» декабря 2018 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу г. Томск, ул. Белинского, 53а и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан « » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Шевелева
Елена Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Субмикронные аэрозольные системы широко распространены и часто встречаются в природе. Они нашли применение во многих отраслях промышленности, современной технике. Контроль дисперсных характеристик аэрозольных сред (концентрации и размеров частиц) остается одной из актуальных научных и технических задач. Дисперсный состав частиц в аэрозольных средах является важнейшей характеристикой, которая зачастую определяет эффективность технологических процессов, а также состояние окружающей среды.

Большинство промышленных установок по контролю гранулометрического состава частиц относится к анализаторам с предварительным отбором проб. При таком контроле важно обеспечить представительность проб, то есть соответствие отобранного образца реальному объекту исследования, что достаточно трудно, а иногда невозможно осуществить, особенно для быстропротекающих процессов. Для жидкокапельных аэрозолей метод отбора не применим, что является одним из недостатков пробоотборных методов. На практике часто требуется оперативное получение информации о состоянии окружающей среды, среды в жилых и производственных помещениях и при контроле распыления, осаждения, коагуляции, испарения. Исходя из вышесказанного, создание средства контроля и диагностики, удовлетворяющего следующим требованиям: возможность контроля *in situ* (то есть, на месте, размещение оборудования в полевых условиях); универсальность (контроль сред как с жидкой, так и с газообразной дисперсионной средой); экспресность получения результатов; высокое временное разрешение; большая длина оптического пути (до нескольких метров); возможность работы с оптически плотными средами; дистанционность измерений; портативность аппаратуры – является актуальной задачей.

Степень разработанности темы. Для контроля дисперсности в реальных двухфазных потоках, аэрозольных образованиях существует ограниченный парк приборов, например, измерительный комплекс Spraytec (компании Malvern Instruments, Great Britain), измерительная установка ТИПАС-1 (турбидиметрический измеритель параметров аэрозольных сред, разработанный в ИПХЭТ СО РАН). Но применение этих приборов ограничено для некоторых типов задач, таких, как определение размеров частиц в дисперсных средах, имеющих большую спектральную оптическую плотность или протяженные пространственные зоны контроля. Эти ограничения связаны с особенностями методов измерения и их реализацией.

Работа направлена на развитие и модификацию турбидиметрического метода (метода спектральной прозрачности) путем перехода от использования источника излучения с непрерывным спектром к источнику излучения с набором дискретных длин волн зондирующего лазерного излучения с рабочим названием «Метод спектральной прозрачности с дискретными длинами волн» (СПДВ). Приемником оптического излучения вместо спектрометра, в этом случае, является набор фотодиодов с системой селекции длин волн. К преимуществам разработанного метода относятся:

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

- возможность контроля оптически плотных сред с обеспечением применимости закона Бугера-Ламберта-Бера;
- повышение точности измерения ослабления излучения за счет увеличения отношения сигнал/шум при использовании фотодиодов в качестве приемников излучения;
- компактность, мобильность, портативность экспериментальной установки, возможность использования в лабораторных, производственных и полевых условиях.

Объектом исследования являются двухфазные дисперсные среды.

Предметом исследования являются оптические методы контроля дисперсных характеристик двухфазных сред.

Целью работы является разработка метода контроля и экспериментальной установки для измерения дисперсных характеристик нано- и субмикронных частиц двухфазных сред с большой спектральной оптической плотностью и программно-аппаратного комплекса с автоматизированной системой обработки экспериментальных данных.

Задачи исследования

1. Разработать математическую модель метода для измерения функции распределения частиц по размерам с использованием априорной информации об экспериментально измеренном значении среднего объемно-поверхностного диаметра частиц при контроле дисперсности исследуемой среды.

2. Разработать экспериментальную многочастотную лазерную установку для измерения функции распределения частиц по размерам, концентрации и среднего объемно-поверхностного размера частиц двухфазных сред с большой спектральной оптической плотностью.

3. Разработать программно-аппаратный измерительный комплекс, реализующий метод измерения динамики дисперсности частиц при экспресс-диагностике дисперсных характеристик двухфазных сред.

4. Провести верификацию разработанного метода СПДВ при измерении дисперсности частиц с использованием разработанной экспериментальной установки и современных измерительных установок: измерительного комплекса Spraytec (Malvern Instruments, GBR), измерительной установки ТИПАС-1 (ИПХЭТ СО РАН).

Научная новизна работы.

Разработана методика измерения среднего объемно-поверхностного диаметра частиц двухфазных сред с методической погрешностью, не превышающей заданного значения, что повышает корректность поиска решения за счет учета процессов взаимодействия зондирующего излучения со средами с различной степенью дисперсности.

Разработана методика измерения функции распределения нано- и субмикронных частиц по размерам двухфазных сред, основанная на решении обратной задачи оптики аэрозолей методом регуляризации в ансамбле гладких функций с привлечением априорной информации в виде измеренного значения среднего объемно-поверхностного диаметра частиц, что упрощает процесс вычисления параметров функции распределения частиц по размерам.

Теоретически и экспериментально показана возможность дистанционного измерения динамики дисперсного состава двухфазных сред большой спектральной

оптической плотности в непрерывном режиме. Разработан программно-аппаратный комплекс контроля дисперсных характеристик двухфазных сред.

При решении обратной задачи оптики аэрозолей с применением турбидиметрического метода показана возможность восстановления функции распределения частиц по размерам с использованием оптимального количества дискретных длин волн зондирующего излучения.

Практическая значимость работы состоит в разработке и непосредственной реализации метода СПДВ, на базе созданной экспериментальной установки, позволяющей в автоматическом режиме в реальном масштабе времени измерять дисперсный состав и концентрацию частиц при контроле дисперсных характеристик двухфазных сред.

Работы проводились в рамках проекта фундаментальных исследований СО РАН по приоритетному направлению V.49 «Фундаментальные исследования в области химии и материаловедения в интересах обороны и безопасности страны»; грантов Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 15-32-50547 «Развитие метода турбидиметрической диагностики субмикронных аэрозольных сред большой оптической плотности» и № 16-32-50111 мол_нр «Развитие оптического метода определения характеристик дисперсности аэрозольных сред».

Методология работы и методы исследований. В процессе выполнения работы применялись как теоретические, так и экспериментальные методы исследования, направленные на достижение поставленной цели. Применялось физико-математическое моделирование взаимодействия оптического излучения с дисперсной средой. Результаты, полученные при проведении экспериментальных работ с использованием экспериментальной установки, сравнивались с данными полученных с использованием других современных измерительных комплексов и установок.

Положения, выносимые на защиту.

1. Методика измерения функции распределения нано- и субмикронных частиц по размерам двухфазных сред, основанная на решении обратной задачи оптики аэрозолей по экспериментальным данным об ослаблении оптического излучения на дискретных длинах волн.

2. Программное обеспечение, реализующее разработанный метод измерения динамики дисперсных характеристик двухфазных сред, программно-аппаратный комплекс, выполняющий сбор и обработку измерительной информации в автоматическом режиме.

3. Экспериментальная лазерная портативная установка для дистанционного измерения динамики среднего размера, концентрации и функции распределения частиц по размерам при контроле дисперсных характеристик двухфазной среды.

4. Верификация разработанного метода измерения дисперсности частиц с использованием разработанной экспериментальной установки и современных измерительных установок: измерительной установки ТИПАС-1, комплекса Spraytec.

Достоверность полученных результатов основывается на:

- физической обоснованности и корректности постановки решаемых задач;
- использовании математически строгих преобразований в разработанной модели;

- использовании современной измерительной техники высокой точности и выполнении калибровки измерительных приборов;
- верификации экспериментальных данных, полученных при измерении с использованием разработанного метода; с данными, полученными с использованием других методов.

Апробация работы. Результаты работы обсуждались на научно-технических семинарах Лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов ИПХЭТ СО РАН, а также обсуждались на конференциях различного уровня: III Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Материалы и технологии XXI века» (г. Бийск, 2013 г.); Всероссийской конференции «Информационные технологии в науке, экономике и образовании» (г. Бийск, 2013 г.); на XX, XXI и XXII Рабочих группах «Аэрозоли Сибири» (г. Томск, 2013 г., 2014 г., 2015 г.); XI, XII Всероссийской конференции «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» (г. Бийск, 2014 г., 2017 г.); Международной конференции ATMOSPHERIC DUST (Italy, Castellaneta Marina, 2014 г.); на V, VI Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых «Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов» (г. Бийск, 2014 г., 2016 г.); XXIV Всероссийском семинаре с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям (г. Новосибирск, 2015 г.); на XII, XIV Международной конференции NEMs-2016, (Россия, г. Томск, 2016 г.); VI Международном симпозиуме «Энергетические материалы и их применение ISEM2017», (Япония, г. Сендай, 2017 г.); VIII Международном управленческом форуме «Алтай. Точки Роста» (г. Белокуриха, 2016 г.); XV Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» (г. Иркутск, 2017 г.); конкурсе инновационных и исследовательских проектов среди студентов, аспирантов и молодых специалистов наукограда Бийск «Молодые ученые Наукограда» «Разработка методики определения среднего объемно-поверхностного диаметра частиц субмикронных дисперсных сред» (г. Бийск, 2015 г.).

Личный вклад автора. Автором лично получены основные результаты, которые заключаются в формировании основных научных идей, создании математических моделей расчета, планировании и проведении экспериментальных исследований, обработке полученных данных, написании статей на основе интерпретации накопленных результатов, а также их реализация в технологических процессах.

Публикации. Материалы по теме диссертации изложены в 20 научных работах, в том числе в 6 статьях журналов, входящих в перечень ВАК. Получено 1 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы из 108 наименований и 4 приложений. Диссертация изложена на 135 страницах машинописного текста, содержит 9 таблиц и 49 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая

значимость полученных результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы и структуре диссертации, указан личный вклад автора.

В первой главе приведен обзор методов измерения и контроля размеров мелкодисперсных частиц, изложено современное состояние проблемы измерения размеров частиц. Проведен обзор и анализ схем формирования лазерного излучения на различных длинах волн в один пучок. На основе анализа выбрана схема формирования лазерного излучения с использованием набора дихроических зеркал.

Во второй главе приведено описание физико-математической модели измерения параметров двухфазных сред, дана оценка устойчивости разработанного алгоритма.

При прохождении монохроматического излучения с длиной волны λ через дисперсную среду происходит его ослабление за счет рассеяния и поглощения частицами. Количественной характеристикой ослабления является коэффициент пропускания T_λ , связанный со спектральной оптической плотностью τ_λ законом Бугера-Ламберта-Бера:

$$T_\lambda = I_\lambda / I_{0\lambda} = \exp(-\tau_\lambda), \quad (1)$$

где I_λ – поток излучения, прошедший через дисперсную среду; $I_{0\lambda}$ – поток излучения, падающий на дисперсную среду.

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 задачи выступает уравнение Фредгольма первого рода:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp \left[-\frac{\pi C_n l}{4} \int_0^\infty Q(\rho, m(\lambda)) D^2 f(D) dD \right], \quad (2)$$

где C_n – счетная концентрация частиц; l – длина оптического пути; $Q(\rho, m(\lambda))$ – фактор эффективности ослабления; D – диаметр частицы; $m(\lambda) = (n - i\kappa)$ – комплексный показатель преломления материала частиц (n – показатель преломления; κ – показатель поглощения); $\rho = \pi D / \lambda$ – безразмерный параметр дифракции (параметр Ми); $f(D)$ – функция счетного распределения частиц по размерам.

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

$$f(D) = \frac{1}{D\sqrt{2\pi\ln\sigma}} \exp \left[-\frac{(\ln D - \ln \bar{D})^2}{2(\ln \sigma)^2} \right], \quad (3)$$

где $\ln \sigma$ – логарифм среднеквадратического отклонения диаметров (σ – параметр, определяющий ширину функции распределения частиц по размерам); $\ln \bar{D}$ – логарифм математического ожидания диаметров частиц.

Логарифмически нормальный закон распределения частиц по размерам широко распространен в природе, например, ему подчиняется распределение взвешенных частиц в жидкости и воздухе, поэтому этот закон часто используется при описании дисперсных систем. Можно показать, что при соответствующем выборе параметров $\ln \sigma, \ln \bar{D}$ логарифмически нормальное распределение хорошо аппроксимирует часто используемые в литературе гамма-распределение (ГР) и обобщенное гамма-распределение (ОГР).

Решение обратной задачи заключается в том, что из априорно заданного массива данных $\{\bar{D}; \sigma\}$ (параметры распределения), который определяет массив всех возможных функций распределения частиц по размерам с использованием регуляризационного алгоритма выбираются параметры, наиболее оптимально описывающие экспериментальные данные об ослаблении оптического излучения. В качестве экспериментальных данных используется информация о спектральной оптической плотности исследуемой дисперсной среды для нескольких длин волн $\tau(\lambda_i) \ i \in [1..P]$, где P – число длин волн.

Восстановление функции распределения частиц по размерам осуществляется с привлечением дополнительной априорной информации о среднем объемно-поверхностном диаметре частиц (D_{32}) этой исследуемой дисперсной среды. Измерение D_{32} осуществляется с использованием информации о спектральной оптической плотности $\tau(\lambda_i)$ из исходного массива данных (например, для водного аэрозоля измерение D_{32} осуществляется с использованием двух длин волн $\lambda = 3,390$ мкм, $\lambda = 0,405$ мкм). Знание D_{32} исследуемой среды позволяет привлечь дополнительную априорную информацию, которая характеризует искомую функцию распределения частиц по размерам.

Для логарифмически нормального распределения частиц по размерам (3) имеется функциональная связь D_{32} с параметрами распределения:

$$\ln D_{32} = \ln \bar{D} + 2,5(\ln \sigma)^2. \quad (4)$$

Известное значение D_{32} позволяет варьировать значение одного параметра распределения, а второго – находить из выражения (4). Таким образом, предварительное измерение D_{32} позволяет конкретизировать некорректно поставленную задачу.

Для решения обратной задачи оптики аэрозолей используется вариационный подход к построению регуляризующего алгоритма А.Н. Тихонова. При этом на рассматриваемое множество функций распределения частиц по размерам $\{f\}$ ($f = f(D)$) накладывается ограничение, используя априорную информацию о D_{32} . Задача сводится к поиску минимума функционала Тихонова $\min_{f \in G} M^\xi[f]$ на множестве G , где G – замкнутое множество, ξ – параметр регуляризации. В соответствии с алгоритмом решения некорректно поставленных задач осуществляется минимизация функционала Тихонова:

$$M^\xi[f] = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \left(\frac{\pi}{4} C_n I \int_0^\infty Q\left(\pi D / \lambda, m(\lambda)\right) f(D) D^2 dD - \tau^\delta(\lambda) \right)^2 d\lambda + \xi \int_0^\infty \left[f^2(D) + (f'(D))^2 \right] dD, \quad (5)$$

где $\tau^\delta(\lambda)$ – экспериментально измеренная (с погрешностью δ) спектральная оптическая плотность исследуемой дисперсной среды; $\lambda_{\min}$, $\lambda_{\max}$ – минимальная и максимальная длины волн зондирующего излучения.

Спектральная оптическая плотность $\tau(\lambda)_{теор}$ рассчитывается в соответствии с уравнениями полной теории Ми:

$$\tau(\lambda)_{теор} = \frac{\pi}{4} C_m l \int_0^\infty Q\left(\pi D / \lambda, m(\lambda)\right) f(D) D^2 dD. \quad (6)$$

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

Измерение среднего объемно-поверхностного диаметра частиц (D_{32}) осуществляется с использованием модифицированного метода спектральной прозрачности (ММСП), который основан на измерении спектральной оптической плотности аэрозольной среды для двух фиксированных длин волн зондирующего лазерного излучения. Основным уравнением метода измерения D_{32} является выражение для спектральной оптической плотности слоя равномерно распределенных полидисперсных частиц с унимодальной функцией распределения:

$$\tau_\lambda = \frac{3C_m l \bar{Q}(\lambda, D_{32})}{2\rho_p D_{32}}, \quad (7)$$

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

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

$$\bar{Q}(\lambda, D_{32}) = \frac{\int_0^\infty Q(\rho, m(\lambda)) f(D) D^2 dD}{\int_0^\infty f(D) D^2 dD}. \quad (8)$$

Как следует из уравнения (7), отношение τ_λ для двух соответствующих длин волн λ_1 и λ_2 является однозначной функцией D_{32} :

$$\frac{\tau_{\lambda_2}}{\tau_{\lambda_1}} = \frac{\bar{Q}(\lambda_2, D_{32})}{\bar{Q}(\lambda_1, D_{32})} = F(D_{32}). \quad (9)$$

Путем математического моделирования установлено, что функция $F(D_{32})$ зависит от ширины функции распределения частиц по размерам (σ), что может приводить к возникновению методической погрешности при измерении D_{32} . На рисунке 1 приведены зависимости $F(D_{32})$ для ЛНР с $\sigma=1,2$ и $\sigma=1,6$ для длин волн $\lambda=3,390$ мкм и $\lambda=0,405$ мкм (водный аэрозоль).

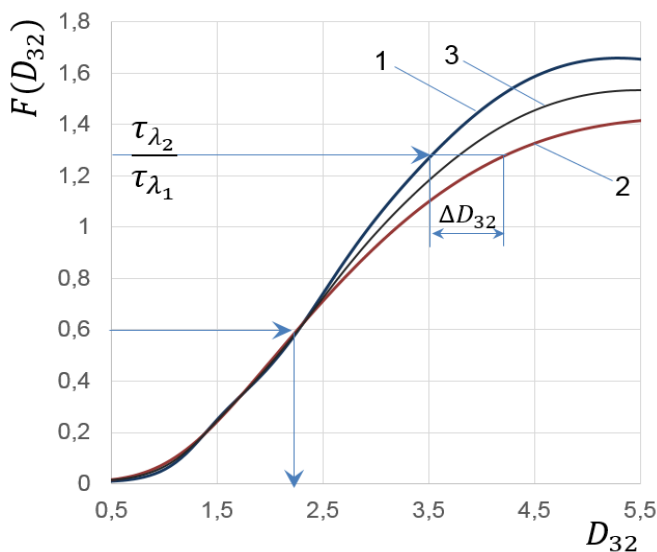
Таким образом, используя информацию об ослаблении оптического излучения аэрозольной среды, решается обратная задача оптики аэрозоля по восстановлению функции распределения частиц по размерам. Область решения обратной задачи ограничивается диапазоном ΔD_{32} . Далее осуществляется минимизация функционала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

Для процессов с быстрым изменением дисперсного состава (характерно для аэрозольных сред) регистрация данных об ослаблении оптического излучения происходит с высоким временным разрешением до 2 мс, то есть за короткий промежуток времени происходит накопление большого количества измерительной информации. Предварительно измеренное значение ΔD_{32} конкретизирует область решения обратной задачи оптики аэрозолей, значительно уменьшая время обработки измерительной информации, обеспечивая экспрессность методики измерения $f(D)$ аэрозольной среды.

В случае частиц, имеющих комплексный показатель преломления материала частиц m_1 , взвешенных в прозрачной среде с показателем преломления среды m_2 , отличным от 1, например, водная суспензия из частиц оксида алюминия, при расчете ослабления оптического излучения используются значения $m = m_1/m_2$, $\rho = \pi D m_2 / \lambda$.

Для оценки устойчивости разработанного алгоритма решения обратной задачи оптики аэрозолей (восстановления $f(D)$) проведена серия численных экспериментов:

- 1) для выбранной функции распределения частиц по размерам $f(D)$ рассчитывается теоретическое ослабление в соответствии с формулой (2);
- 2) решается задача восстановления $f(D)$ для данных $\tau^\delta(\lambda) = \tau(\lambda)_{теор} \pm \delta$, где δ – относительная погрешность, значения которой выбираются случайным образом на уровнях $\pm 3\%$; $\pm 5\%$, $\pm 10\%$;
- 3) сравниваются основные геометрические характеристики исходной $f(D)$ и восстановленной $f(D)$ по данным $\tau^\delta(\lambda)$.

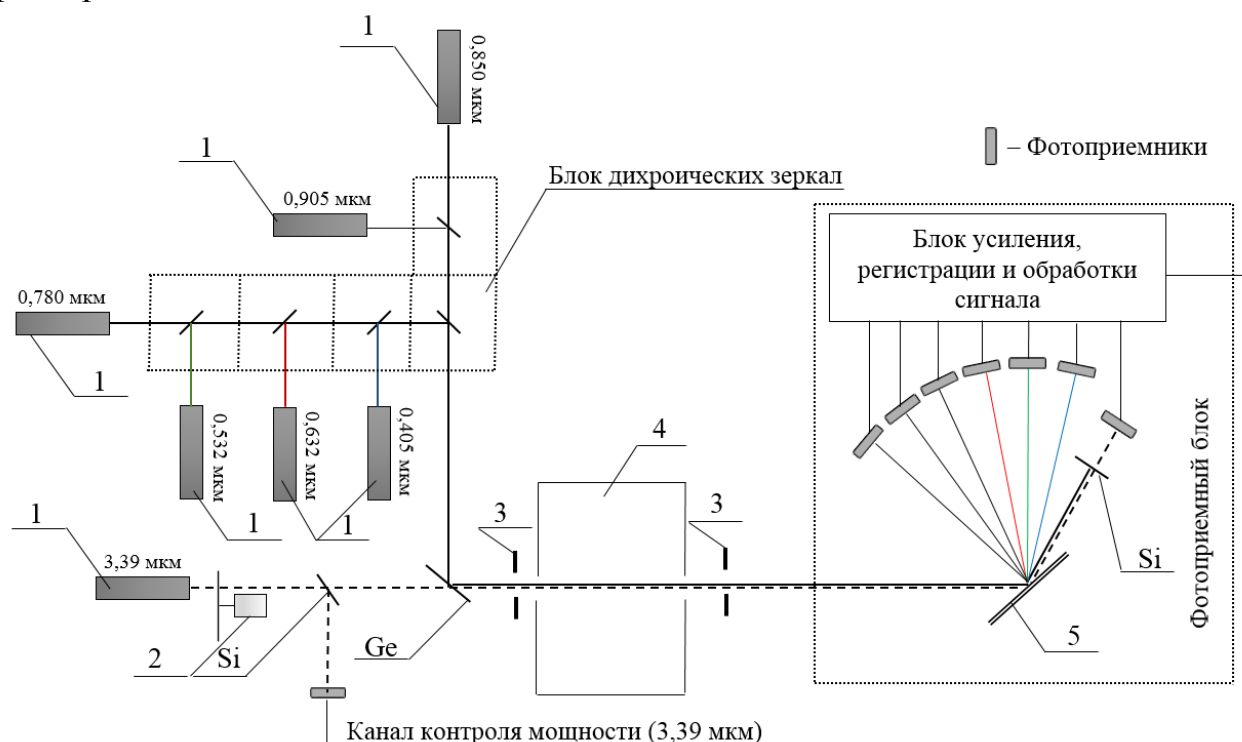


1 - ЛНР для $\sigma = 1,2$; 2 - ЛНР для $\sigma = 1,6$; 3 – среднее
Рисунок 1 – Зависимости $F(D_{32})$ для ЛНР с различной шириной распределения

Установлено, что при погрешности измерения $\tau(\lambda)$ в пределах $\pm 5\%$, погрешность восстановления основных геометрических характеристик функции распределения частиц по размерам не превышает 14 %.

В третьей главе приведено описание разработанной экспериментальной установки. Структурная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 2. Экспериментальная установка состоит из семи источников лазерного излучения (1): гелий-неоновый лазер $\lambda = 3,390$ мкм и $\lambda = 0,632$ мкм, полупроводниковые лазеры $\lambda = 0,905$ мкм, $\lambda = 0,850$ мкм, $\lambda = 0,780$ мкм $\lambda = 0,532$ мкм и $\lambda = 0,405$ мкм. Формирования многоволнового пучка лазерного излучения в диапазоне длин волн от $\lambda = 0,405$ мкм до $\lambda = 0,905$ мкм происходит с использованием блока дихроических зеркал (компании Mightex Systems). Затем объединение светового пучка с лазерным излучением $\lambda = 3,390$ мкм происходит с использованием плоскопараллельной пластины из германия (Ge).

Для длины волны $\lambda = 3,390$ мкм гелий-неонового лазера осуществляется контроль мощности. Канал контроля мощности состоит из светоделительной плоскопараллельной пластины из кремния (Si) и фотоприемника. Лазерное излучение, пройдя диафрагму (3), попадает в измерительный объем (4), где ослабляется аэрозольным облаком. Для длины волны $\lambda = 3,390$ мкм гелий-неонового лазера осуществляется контроль мощности. Канал контроля мощности состоит из светоделительной плоскопараллельной пластины из кремния (Si) и фотоприемника.



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 2 – Структурная схема экспериментальной установки

Лазерное излучение, пройдя диафрагму (3), попадает в измерительный объем (4), где ослабляется двухфазной средой. Далее ослабленное лазерное

излучение попадает в фотоприемный блок, где происходит разделение лазерного пучка на исходные составляющие с использованием дифракционной решетки (5) (600 штрихов на миллиметр). На рисунке 3 приведен внешний вид разработанной экспериментальной установки для измерения дисперсных характеристик двухфазных сред. Использование полупроводниковых лазерных источников позволит создавать более компактную конструкцию экспериментальной установки.

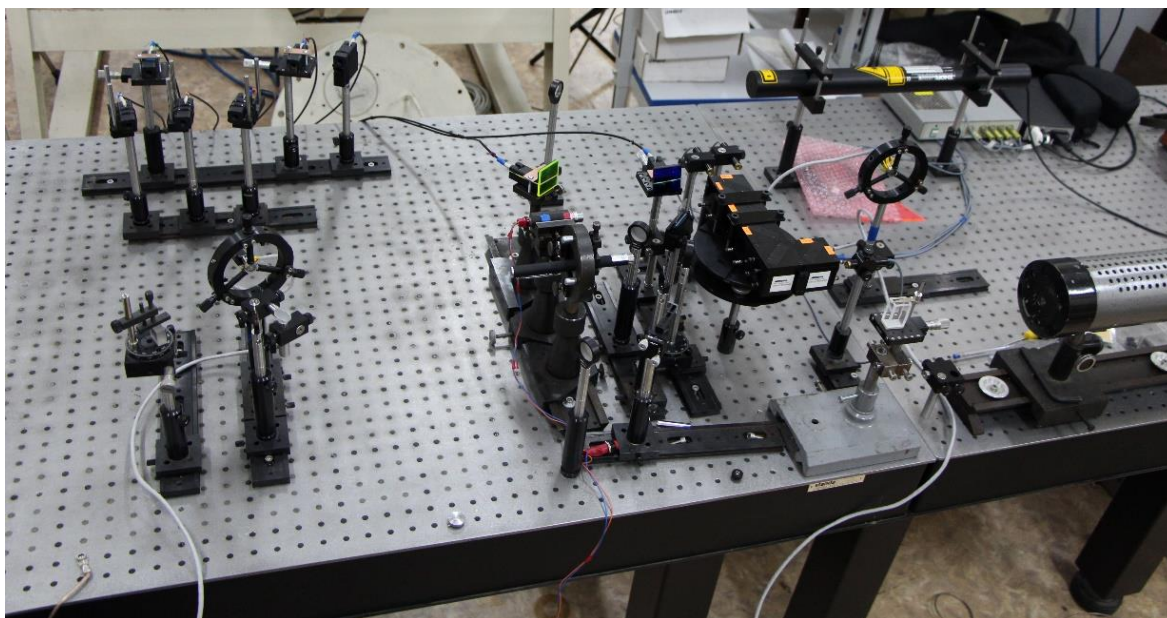


Рисунок 3 – Внешний вид разработанной экспериментальной установки измерения дисперсных характеристик двухфазных сред

Лазерное излучение, ослабленное двухфазной средой, регистрируется фотоприемниками отдельно для каждой длины волн. 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 $\lambda = 3,390$ мкм используются фотоприемные устройства АМР48 (компании АИБИ) на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с однокаскадным термоэлектрическим модулем. Фотоприемники 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 до 0,5 кГц и скважностью 2. Сигналы с фотоприемников усиливаются блоком усилителей. Регистрация сигналов с блока усилителей осуществляется аналого-цифровым преобразователем (АЦП) L-502 (фирмы L - Card), имеющим 16 дифференциальных входов с частотой дискретизации до 400 кГц. Данная модель АЦП внесена в Госреестр средств измерения (RU.C.30.390.A № 68764).

При измерении ослабления лазерного излучения двухфазными средами (аэрозольными образованиями, суспензиями) особое внимание стоит уделить условиям применимости закона Бугера-Ламберта-Бера (1) для прямого оптического излучения. Это связано с тем, что больший вклад, влияющий на

отклонение закона ослабления излучения от экспоненциального, происходит из-за условий проведения эксперимента, а не от особенностей рассеивающей среды.

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. На рисунке 4 приведены нормированные индикатрисы рассеяния для частиц диаметром $D=1$ мкм ($\rho \approx 5$) и $D=4$ мкм ($\rho \approx 20$), для длины волны зондирующего излучения $\lambda = 0,632$ мкм. Эти индикатрисы рассеяния соответствуют типичным индикатрисам рассеяния для малых ($\rho \leq 10$) и крупных ($\rho > 10$) рассеивателей. В выноске справа приведены индикатрисы рассеяния для тех же частиц в полярной системе координат. Для регистрации ослабления излучения, вызванного только поглощением среды, угол поля зрения оптической системы коллиматор-фотоприемник должен быть меньше, чем $\lambda / 2\pi D$. Проведена серия экспериментальных исследований по измерению ослабления оптического излучения для малых рассеивателей $\rho = 5,9$ (водная суспензия из частиц оксида алюминия) и крупных рассеивателей $\rho = 22,5$ (водная эмульсия молока). На рисунке 5 приведены зависимости спектральной оптической плотности от длины оптического пути для суспензий. Установлено, что при измерении ослабления оптического излучения субмикронными дисперсными средами с использованием разработанной экспериментальной установки, в диапазоне длин волн от $\lambda = 0,405$ мкм до $\lambda = 0,905$ мкм применимость закона Бугера-Ламберта-Бера осуществляется до значений $\tau \approx 8$, при этом относительная погрешность отклонения закона ослабления оптического излучения от линейного не превышает 5 %.

Проведена проверка линейного режима работы фотодиодов с использованием нейтральных светофильтров НС1 и НС7 (ГОСТ 3514-94). На

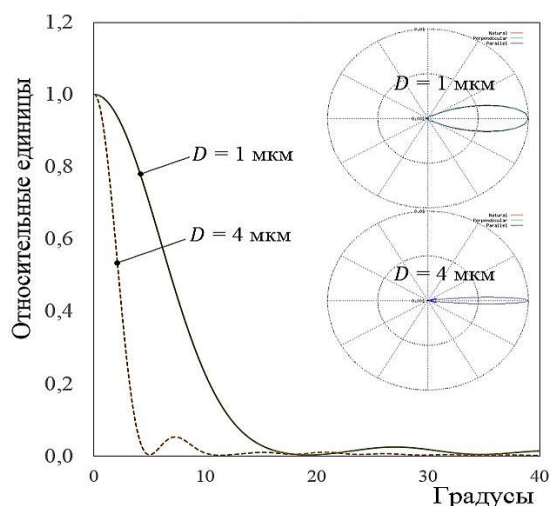
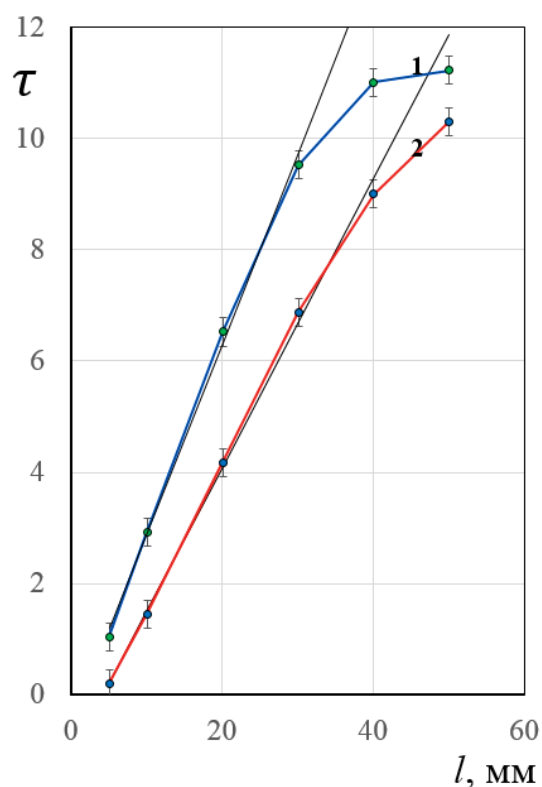


Рисунок 4 – Индикатрисы рассеяния частиц для длины волны 0,63 мкм



1 – водная суспензия из частиц Al_2O_3 ;
2 – эмульсии молока;

Рисунок 5 – Зависимости ослабления интенсивности лазерного излучения от длины оптического пути

рисунке 6 приведены зависимости $\tau(\lambda)$, измеренные для различных комбинаций нейтральных светофильтров НС1 и НС7.

Проведена проверка линейного режима работы фотодиодов с использованием нейтральных светофильтров НС1 и НС7 (ГОСТ 3514-94). На рисунке 6 приведены зависимости $\tau(\lambda)$, измеренные для различных комбинаций нейтральных светофильтров НС1 и НС7. В линейном режиме работы фотодиода осуществляется следующее соотношение: сумма значений $\tau(\lambda)$ для нейтральных светофильтров НС1 и НС7, измеренная по отдельности для каждого светофильтра, равна $\tau(\lambda)$, измеренная при одновременном ослаблении оптического излучения обоими нейтральными светофильтрами НС1 и НС7. Экспериментально

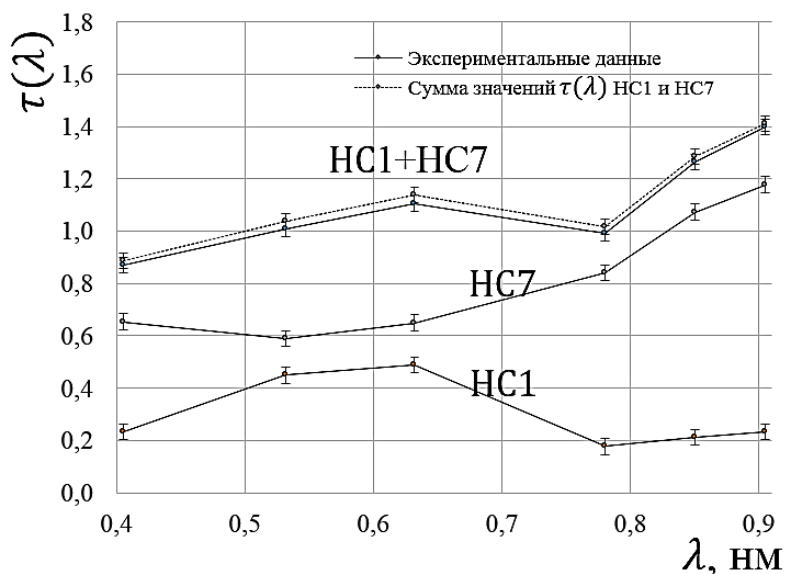


Рисунок 6 – Спектральная оптическая плотность $\tau(\lambda)$ от длины волны λ для различных комбинаций светофильтров НС1 и НС7

установлено, что относительное отклонение режима работы фотодиода от линейного в диапазоне длин волн $\lambda = 0,405$ мкм до $\lambda = 0,905$ мкм не превышает 5 %.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований.

Для оценки адекватности измерений с помощью разработанной экспериментальной установки и методики измерения дисперсности двухфазных сред проведена верификация путем сравнения дисперсности двухфазной среды полученной с использованием разработанной экспериментальной установки, установки ТИПАС-1 и измерительного комплекса Spraytec.

При проведении верификации по измерению $f(D)$ требуется обеспечить представительство проб, отобранных для измерения на разных установках. Однако, достаточно трудно обеспечить постоянство объекта измерений в виде двухфазной среды, поскольку $f(D)$ является функцией времени и всегда в какой-то степени изменяется с различной скоростью (зависит от начальной дисперсности и внешних условий).

Для уменьшения случайной составляющей погрешности требуется использование параллельных одновременных измерений одной и той же физической величины ($f(D)$). Для этого необходимо используются сразу несколько измерительных установок, таких как разработанная экспериментальная установка, установка ТИПАС-1 и измерительный комплекс Spraytec.

Для сравнения дисперсных характеристик двухфазных сред выбрана суспензия, так как изменение $f(D)$ в этой двухфазной среде (то есть, частиц находящихся во взвешенном состоянии) менее выражена от времени.

В качестве дисперсной фазы выбраны порошки оксида титана (TiO_2) и оксида алюминия (Al_2O_3), так как относятся к материалам с гидрофильной поверхностью, то есть хорошо смачиваются, например, дистиллированной водой. Поскольку частицы дисперсной фазы хорошо смачиваются дисперсионной средой, то возле их поверхности образуется сольватная оболочка, которая препятствует слипанию частиц.

Для приготовления суспензии навеска исходного порошка массой 150 мг помещается в стеклянный реактор, далее в реактор заливается 100 мл дистиллированной воды. Частицы дисперсной фазы могут находиться в агломерированном состоянии, вследствие слеживаемости порошкообразных материалов. Разбиение агломератов оксида металла осуществляется с использованием ультразвукового миксера, за счет процессов кавитации. Для размешивания суспензии рабочий элемент ультразвукового миксера помещается в стеклянный реактор с суспензией. Далее на суспензию осуществляется ультразвуковое воздействие в течение 1 часа.

После приготовления суспензии проводилась серия экспериментальных исследований по измерению дисперсных характеристик с использованием разработанной экспериментальной установки, измерительного комплекса Spraytec и измерительной установки ТИПАС-1. Измерения дисперсности суспензий осуществлялись следующим образом: в измерительный объем каждой установки устанавливаются кюветы с дистиллированной водой; производится измерение ослабления зондирующего излучения кюветы с дистиллированной водой; из реактора с приготовленной суспензией осуществлялся забор пробы с использованием механического дозатора Proline Plus (объем забора пробы 300 мкл) с последующим разбавлением пробы в измерительной кювете для каждой установки отдельно; после разбавления суспензии осуществляется измерение дисперсности. На рисунке 7 приведены типичные функции распределения частиц по размерам, полученные с использованием разработанной установки (аббревиатура СПДВ), измерительной установки ТИПАС-1, измерительного комплекса Spraytec для водной суспензии из частиц TiO_2 и Al_2O_3 . На рисунке 7 б) дополнительно приведена гистограмма распределения частиц по размерам оксида алюминия, полученная с использованием электронного микроскопа JSM-840 (общее число частиц в выборках – 1300).

На рисунке 8 приведена фотография фрагмента одной выборки частиц оксида алюминия, полученная с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM-840. Однако при анализе фотографий выбрана большая ширина столбцов гистограммы распределения частиц по размерам порядка ~ 1 мкм, вследствие низкого разрешения исходных фотографий. Поэтому, результату измерения электронного микроскопа JSM-840 можно давать только качественную оценку.

Исходя из предварительной информации о дисперсности частиц измеряемой среды, была уточнена область решения обратной задачи оптики аэрозолей.

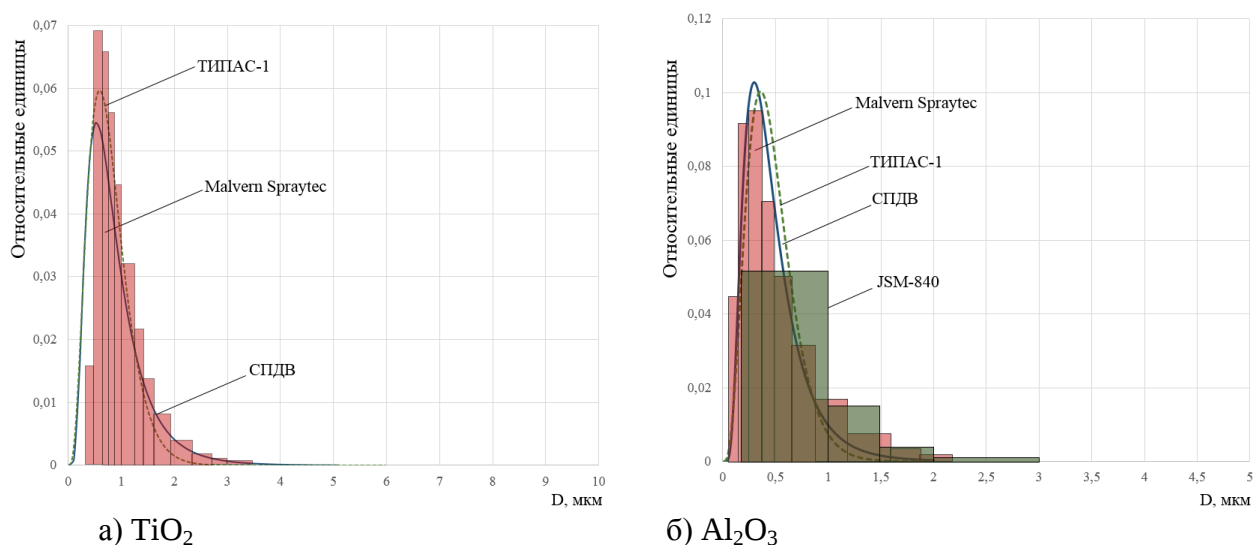


Рисунок 7 – Функции распределения частиц по размерам водных суспензий из оксидов металлов

На рисунке 9 приведен фрагмент экспериментальных и расчетных данных $\tau(\lambda)$ для водной суспензии из частиц оксида алюминия (Al_2O_3). Расчетные данные являются результатом решения обратной задачи оптики аэрозолей, то есть соответствуют наилучшему совпадению экспериментальных и расчетных данных. Из анализа полученной зависимости, приведенной на рисунке 9, можно сделать вывод о значительном совпадении расчетных и экспериментальных данных. Это свидетельствует об адекватности математического аппарата при решении обратной задачи оптики аэрозолей.

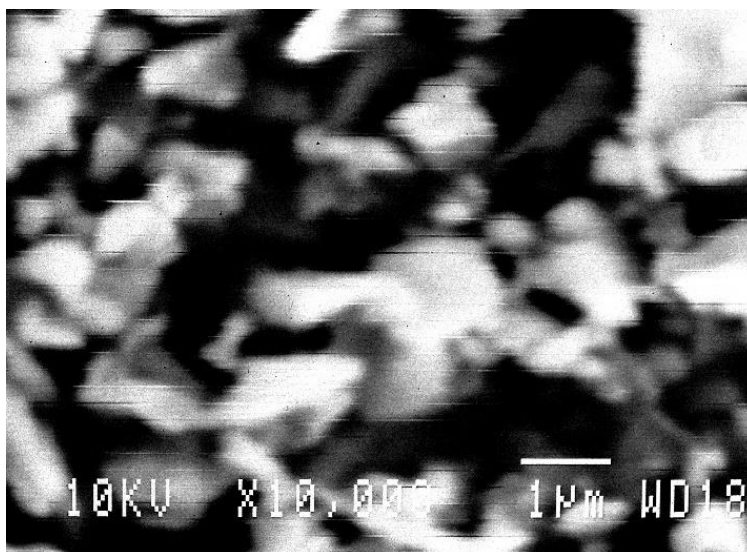


Рисунок 8 – Фотография частиц оксида алюминия, полученная сканирующим электронным микроскопом JSM-840

При анализе дисперсных систем удобно оценивать форму функций распределения частиц по размерам с помощью геометрических характеристик (рисунок 10):

- модальный диаметр D_0 ;

- полуширина распределения Δ ;
- коэффициент

$$\text{асимметрии } \varepsilon = \frac{D_0 - D_1}{2\Delta}.$$

В таблице 1-2 показано сравнение геометрических характеристик соответствующих функций распределения частиц по размерам, приведенных на рисунке 7.

Верификация разработанного метода СПДВ при измерении дисперсности частиц водной суспензии из частиц оксида титана (TiO_2) и оксида алюминия (Al_2O_3) с использованием разработанной экспериментальной установки и измерительного комплекса Spraytec показала, что погрешность восстановления основных геометрических характеристик функции распределения частиц по размерам для дисперсных сред не превышает 21 %, а верификация измерительного комплекса ТИПАС-1, реализующего турбидиметрический высокоселективный метод, показала, что погрешность восстановления основных геометрических характеристик функции распределения частиц по размерам для дисперсных сред не превышает 16 %.

Таблица 1 – Основные геометрические характеристики $f(D)$ суспензий из частиц оксида титана и оксида алюминия, полученные с использованием Spraytec и СПДВ

TiO_2	D_0	Δ	ε	Al_2O_3	D_0	Δ	ε
Spraytec	0,640	0,350	0,286	Spraytec	0,281	0,205	0,373
СПДВ	0,505	0,392	0,313	СПДВ	0,302	0,215	0,319
Относительная погрешность	21	12	9	Относительная погрешность	7	5	15

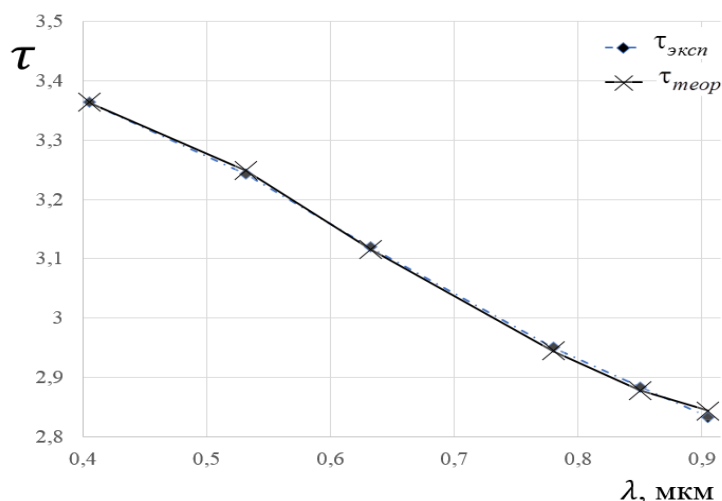


Рисунок 9 – Экспериментальные данные $\tau(\lambda)$ для водной суспензии из частиц Al_2O_3 и расчетные данные, полученные при решении обратной задачи оптики аэрозолей

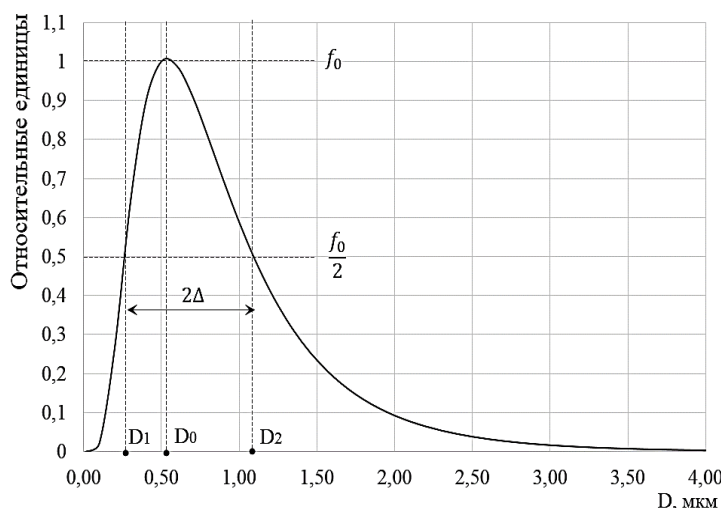


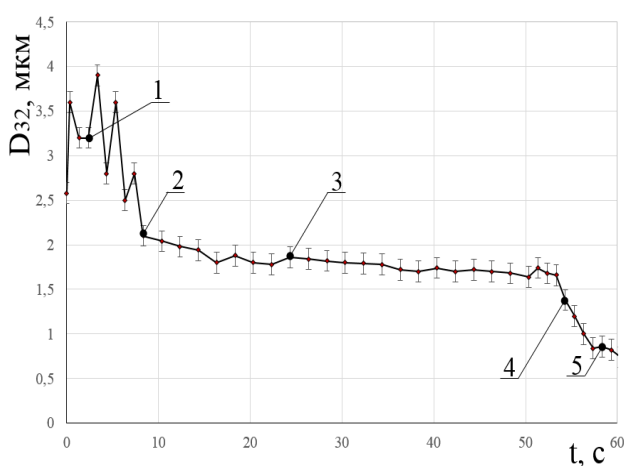
Рисунок 10 – Геометрические характеристики функции распределения частиц по размерам

Таблица 2 – Основные геометрические характеристики $f(D)$ суспензий из оксида титана и оксида алюминия, полученные с использованием ТИПАС-1 и СПДВ

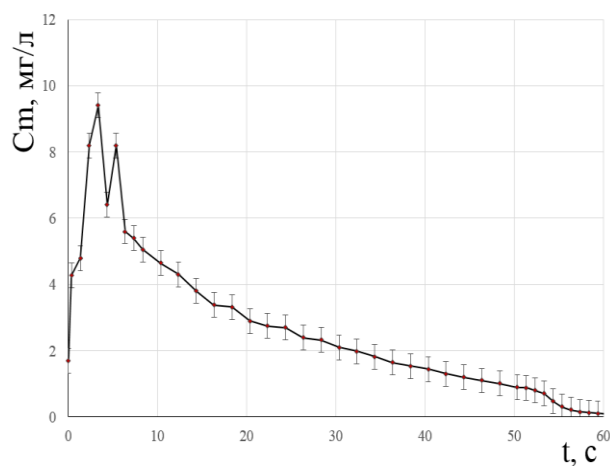
TiO_2	D_0	Δ	ε
Spraytec	0,571	0,395	0,368
СПДВ	0,505	0,392	0,313
Относительная погрешность, %	12	1	15

Al_2O_3	D_0	Δ	ε
Spraytec	0,353	0,230	0,378
СПДВ	0,302	0,215	0,319
Относительная погрешность, %	14	7	16

С использованием разработанной экспериментальной установки проведена серия экспериментальных исследований по измерению динамики дисперсных параметров двухфазной среды (D_{32}) и концентрации частиц во времени, в аэрозольной камере объемом 0,01 м³. Генерация аэрозоля велась в течение 5 с. Измерение дисперсных характеристик двухфазной среды осуществлялось при заполнении измерительного объема облаком аэрозоля, создаваемым ультразвуковым генератором «Муссон-2».



а) изменение D_{32} во времени



б) изменение концентрации (C_m) во времени

Рисунок 11 – Зависимость изменения параметров водного аэрозоля во времени в измерительном объеме

Из анализа зависимостей, приведенных на рисунке 11, можно сделать вывод, что процесс образования облака аэрозоля является нестационарным. В течение всего времени распыливания (до 9 с) водного аэрозоля в замкнутый объем наблюдается общая тенденция уменьшения размера D_{32} аэрозольной среды. Далее наблюдается тенденция плавного снижения размеров D_{32} , соответствующая экспоненциальному уменьшению концентрации частиц.

Для выбранных моментов времени 1-5 (рисунок 11) приведены соответствующие функции распределения частиц по размерам (рисунок 12).

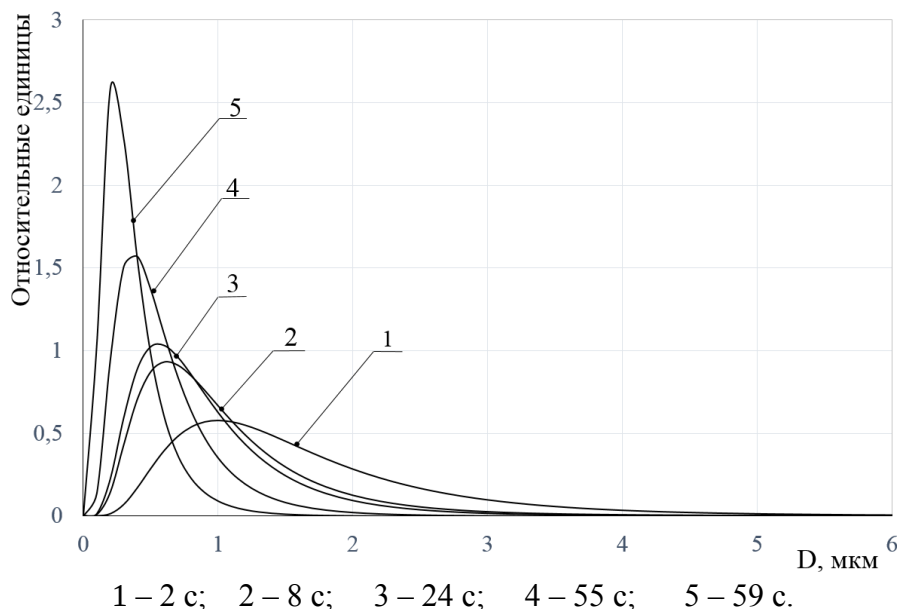


Рисунок 12 – Функции распределения частиц по размерам водного аэрозоля

Внешний вид зависимостей, приведенных на рисунке 12, демонстрирует деформацию функции распределения частиц по размерам в сторону меньших диаметров в течение времени эксперимента, это объясняется влиянием основных действующих процессов: коагуляции, испарения и гравитационного осаждения частиц.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана новая методика измерения среднего объемно-поверхностного диаметра частиц двухфазных сред, которая позволяет находить диапазон, в котором методическую погрешность измерений не превышает заданного значения, например, 5 %.

2. Впервые разработан математический аппарат решения обратной задачи оптики аэрозолей с привлечением дополнительной априорной информации в виде измеренного значения среднего объемно-поверхностного диаметра частиц исследуемой среды. Проведена оценка устойчивости разработанного алгоритма восстановления функции распределения частиц по размерам. Показано, что при погрешности измерений спектральной оптической плотности $\pm 5\%$, погрешность восстановления основных геометрических характеристик функции распределения частиц по размерам не превышает 14 %.

3. Разработано программное обеспечение, реализующее метод спектральной прозрачности на дискретных длинах волн (СПДВ) и осуществляющее сбор и обработку измерительной информации, расчет и сохранение параметров дисперсности двухфазной среды в автоматическом режиме.

4. Разработана экспериментальная установка и программно-аппаратный комплекс для измерения концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц, функции распределения частиц по размерам в диапазоне размеров диаметров от сотен нанометров до десяти микрометров, с возможностью контроля дисперсных характеристик оптически плотных двухфазных сред.

5. Проведена верификация разработанного СПДВ при измерении дисперсности двухфазных сред водных суспензий, состоящих из частиц оксида

титана (TiO_2) и оксида алюминия (Al_2O_3) с использованием разработанной экспериментальной установки, а также измерительного комплекса Spraytec, измерительной установки ТИПАС-1. Установлено, что погрешность восстановления основных геометрических характеристик функции распределения частиц по размерам для двухфазных сред не превышает 21 %.

6. Установлено, что при измерении ослабления оптического излучения субмикронными дисперсными средами для разработанной экспериментальной установки, в диапазоне длин волн зондирующего излучения от 0,405 мкм до 0,905 мкм, применимость закона Бугера-Ламберта-Бера осуществляется до значения спектральной оптической плотности $\tau \approx 8$, что позволяет осуществлять контроль дисперсных характеристик двухфазных сред на протяженных атмосферных трассах или в оптически плотных двухфазных средах.

7. Проведена серия экспериментальных исследований по измерению динамики среднего объемно-поверхностного диаметра и массовой концентрации частиц водного аэрозоля. Установлена закономерность трансформации во времени функции распределения частиц по размерам при распространении двухфазной среды, обусловленной конкурирующими процессами испарения, коагуляции и осаждения частиц. Экспериментально показана возможность экспресс-диагностики дисперсных характеристик при эволюции двухфазной среды с использованием разработанного метода СПДВ и экспериментальной установки.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Мецлер, Э.А.** Особенности измерений ослабления лазерного излучения в оптически плотных субмикронных дисперсных средах [Текст] / Э.А. Мецлер, С.С. Титов, А.А. Жирнов, А.А. Павленко, В.А. Архипов // Ползуновский вестник. – 2016. – Т. 1, № 4. – С. 49-54.

2. **Мецлер, Э.А.** Экспериментальная установка определения дисперсных параметров субмикронных аэрозольных сред [Текст] / Э.А. Мецлер, С.С. Титов, А.А. Павленко, В.А. Архипов // Ползуновский вестник. – 2017. – Т. 1, № 4. – С. 49-54.

3. **Мецлер, Э.А.** Установка для исследования динамики среднего размера частиц субмикронных аэрозольных сред [Текст] / Э.А. Мецлер, С.С. Титов, А.А. Жирнов, А.А. Павленко // Датчики и системы. – 2016. – № 11. – С. 52-58.

4. Титов, С.С. Создание средств оптической диагностики параметров ансамбля субмикронных частиц [Текст] / С.С. Титов, А.А. Павленко, В.А. Архипов, С.С. Бондарчук, **Э.А. Мецлер** // Известия ВУЗов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 9-2. – С. 86-89.

5. Титов, С.С. Экспериментальная установка определения среднего объемно-поверхностного диаметра частиц дисперсных сред [Текст] / С.С. Титов, **Э.А. Мецлер**, А.А. Павленко, В.А. Архипов // Ползуновский вестник. – 2015. – Т. 2, № 4 – С. 47-51.

6. Жирнов, А.А. Границы применимости высокоселективного турбидиметрического метода [Текст] / А.А. Жирнов, **Э.А. Мецлер**, С.С. Титов, А.А. Павленко, О.Б. Кудряшова // Ползуновский вестник. – 2016. – Т. 1, № 4. – С. 55-58.

Патенты и свидетельства

1 Павленко, А.А. Программа расчета усредненных факторов эффективности ослабления зондирующего излучения для определения оптимального диапазона измерения средних размеров частиц аэрозольной среды. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017610241, заявка № 2016662232, дата рег. 09.01.2017 г. / А.А. Павленко, **Э.А. Мецлер**, С.С. Титов, С.А. Ворожцов

Прочие издания

1. **Мецлер, Э.А.** Оптимизация алгоритма определения дисперсности аэрозолей в турбидиметрическом высокоселективном методе [Текст] / Э.А. Мецлер, С.С. Титов, А.А. Павленко // Южно-Сибирский научный вестник. – 2014. – № 2(6). – С. 95-97.

2. **Мецлер, Э.А.** Модификация методики определения среднего объемно-поверхностного диаметра частиц дисперсных сред [Текст] / Э.А. Мецлер, А.А. Павленко, С.С. Титов, В.А. Архипов // Южно-Сибирский научный вестник. – 2017. – № 4(20). – С. 48-51.

3. Ахмадеев, И.Р. Увеличение диапазона измерения дисперсных характеристик аэрозолей в модифицированном методе малоуглового рассеяния [Текст] / И.Р. Ахмадеев, **Э.А. Мецлер** // Южно-Сибирский научный вестник. – 2017. – № 4(20). – С. 52-56.

4. Titov, S.S. Optical methods and algorithms for determination of fine aerosol parameters [Текст] / S.S. Titov, A.A. Pavlenko, V.A. Arkhipov, S.S. Bondarchuk, I.R. Akhmadeyev, **E.A. Metsler**, A.A. Zhirnov // Book of abstracts International Conference on ATMOSPHERIC DUST Castellana Marina. – Italy: DUST, 2014. – P. 417.

5. Титов, С.С. Разработка методики определения динамики средних размеров частиц субмикронных аэрозольных сред в быстропротекающих и установившихся процессах [Текст] / С.С. Титов, **Э.А. Мецлер**, А.А. Павленко, В.А. Архипов // Высокоэнергетические материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение: материалы XII Международной конференции НЕМs-2016. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2016. – С. 107–108.

6. **Мецлер, Э.А.** Модификация турбидиметрического высокоселективного метода в виде макета установки для экспресс-оценки дисперсных характеристик многофазных сред [Текст] / Э.А. Мецлер, С.С. Титов, А.А. Павленко // Материалы и технологии XXI века: материалы докладов III Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова, 2013. – С. 26-30.

7. **Мецлер, Э.А.** Оптический метод экспресс-диагностики дисперсных характеристик многофазных сред с высоким временным разрешением [Текст] / Э.А. Мецлер, С.С. Титов, А.А. Павленко // Аэрозоли Сибири: тезисы докладов XX юбилейной Рабочей группы. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2013. – С. 8.

8. **Мецлер, Э.А.** Математическое моделирование в оптических методах определения параметров нано- субмикронных аэрозолей [Текст] / Э.А. Мецлер, С.С. Титов, А.А. Павленко // Информационные технологии в науке, экономике и

образовании: материалы докладов Всероссийской конференции. – Бийск -Кизляр, 2013. – С. 68-70.

9. **Мецлер, Э.А.** Аспекты реализации обработки измерительных данных при модификации турбидиметрического метода определения дисперсности аэрозолей [Текст] / Э.А. Мецлер, С.С. Титов, А.А. Павленко // Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов: материалы докладов V Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых. – Барнаул: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2014. – С. 204-211.

10. **Мецлер, Э.А.** Модификация турбидиметрического метода дистанционного определения дисперсности аэрозолей [Текст] / Э.А. Мецлер, С.С. Титов, А.А. Павленко // Аэрозоли Сибири: тезисы докладов XXI Рабочей группы. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2014. – С. 73.

11. **Мецлер, Э.А.** Разработка методики турбидиметрического определения среднего объемно-поверхностного диаметра частиц аэрозольных сред [Текст] / Э.А. Мецлер, С.С. Титов, А.А. Павленко, В.А. Архипов // Аэрозоли Сибири: труды конференции XXII Рабочей группы. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2015. – С. 68.

12. Архипов, В.А. Определение усредненных характеристик аэрозолей в модификации турбидиметрического высокоселективного метода [Текст] / В.А. Архипов, Е.А. Маслов, С.Е. Орлов, А.А. Павленко, С.С. Титов, **Э.А. Мецлер** // Струйные, отрывные и нестационарные течения: тезисы докладов XXIV Всероссийского семинара с международным участием. – Новосибирск: Изд-во Параллель, 2015. – С. 15-16.

13. **Мецлер, Э.А.** Обработка измерительных данных об ослаблении оптического излучения облаком аэрозоля при импульсном распылении жидкости [Текст] / Э.А. Мецлер, С.С. Титов, Е.В. Муравлев, А.А. Павленко, В.А. Архипов // Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов: материалы VI Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых. – Бийск: РОАК ООП «Общероссийское литературное сообщество», 2016. – С. 192–197.

14. **Мецлер, Э.А.** Разработка методики определения дисперсных параметров аэрозольных сред с использованием турбидиметрического метода [Текст] / Э.А. Мецлер, С.С. Титов, А.А. Павленко // Взаимодействие полей и излучения с веществом: труды XV конференции молодых ученых. – Издательский отдел ИСЗФ СО РАН, 2017. – С. 187-189.

Подписано в печать 17.10.2018. Формат А5.
Бумага офсетная. Печать лазерная. Тираж 120 экз.
Заказ №17/10/18 отпечатано в типографии «Аквамарин»
634050, г. Томск, Московский тракт 2г. Т. 933-529