

На правах рукописи



**Титов Сергей Сергеевич**

**ТУРБИДИМЕТРИЧЕСКИЙ ВЫСОКОСЕЛЕКТИВНЫЙ МЕТОД И  
БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕСТАЦИОНАРНЫХ  
МНОГОФАЗНЫХ СРЕД**

Специальность: 01.04.01 – Приборы и методы  
экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Барнаул – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения РАН (ИПХЭТ СО РАН)

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

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,  
профессор  
**Суторихин Игорь Анатольевич**

доктор физико-математических наук,  
профессор  
**Галенко Юрий Анатольевич**

**Ведущая организация:** Обособленное структурное подразделение «Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики» Томского государственного университета, г. Томск

Защита состоится «08» декабря 2011 г. в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.004.06 при Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова, по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, в аудитории 127 главного корпуса.

Просим присылать отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, по адресу 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.004.06. (dmitriikrivobokov@mail.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Автореферат разослан «03» ноября 2011 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук



Д.Е. Кривобоков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Различные аэрозольные среды часто встречаются в природе, а также широко применяются во многих отраслях современной техники. Исследование законов существования, образования и эволюции аэрозолей является необходимым для оценки степени их влияния на живые организмы, определения оптимальных условий протекания технологических процессов с участием многофазных сред, выявления фундаментальных физических основ их распространения и взаимодействия с различными объектами. При изучении характеристик таких сред существенное значение имеют экспериментальные методы, так как в определяющие их уравнения входят, как правило, эмпирические зависимости и константы. Кроме того, широкое применение наноматериалов, обусловленное их уникальными свойствами, послужило причиной начала исследования безопасности методов их получения. При этом возникла необходимость определять параметры наночастиц, полученных различными способами, либо присутствующих в исследуемом объёме. Также экспериментальная информация о таких параметрах конденсированной фазы аэрозоля, как концентрация и дисперсность, позволяет оценивать степень адекватности реальному процессу принятой для его описания математической модели, и используется в качестве исходных данных при проведении расчётов рабочих процессов в конкретных устройствах. Эмпирически полученные данные позволяют оценивать влияние начальных и внешних условий на рассматриваемые характеристики изучаемого аэрозоля.

Для получения информации о значениях параметров многофазной среды необходим прибор, позволяющий определять дисперсность, концентрацию и пространственно-временные характеристики аэрозоля с высоким временным разрешением, с учётом частиц размером от десятков нанометров до десятков микрометров, не внося возмущений в объект исследования.

На сегодняшний день существует много приборов, созданных для исследования параметров аэрозолей, однако большинство из них не отражают динамику характеристик объекта исследования и основаны на принципах пробоотбора. При использовании таких приборов необходимо при каждом измерении обеспечивать изокинетичность и представительность отобранной пробы, при этом неизбежно оказывается влияние на исследуемую среду. Существующие приборы, которые основаны на бесконтактных методах измерения, как правило, не отображают динамики характеристик аэрозольного облака, не дают информации о размерах частиц в широком диапазоне или применимы лишь к конкретным типам аэрозолей, либо сложны в исполнении, что существенно ограничивает их использование.

Исходя из этого, можно сделать вывод о необходимости разработки нового метода и реализующего его измерительного комплекса для бесконтактного дистанционного исследования дисперсности конденсированной фазы аэрозолей в широком диапазоне размеров частиц и их концентраций, отличающегося быстродействием, относительной простотой реализации и универсальностью применения в отношении исследуемых сред с возможностью получать данные о пространственно-временных характеристиках многофазной среды.

Наиболее подходящими характеристиками для требуемого измерительного устройства, в сочетании с большим потенциалом в плане модернизации, обладают турбидиметрические методы, к которым относится классический метод спектральной прозрачности (МСП). Он основан на наблюдении за ослаблением прошедшего через исследуемую среду зондирующего излучения, по характеристикам которого оценивается дисперсность и концентрация аэрозоля. МСП позволяет проводить измерения параметров неустановившейся гетерогенной системы с высокими скоростями её движения при значительной фоновой освещённости с регистрацией частиц диаметром от десятков нанометров.

Недостатком МСП является то, что его математическая реализация представляет собой обратную задачу, которая является некорректной и имеет строгое решение лишь для оптически мягких частиц. Кроме того, в известных реализациях МСП используются приближённые формулы и информация о коэффициенте спектральной прозрачности лишь для нескольких длин волн, что значительно уменьшает точность проводимых измерений и возможности метода. Также использование МСП без дополнительных средств получения информации об исследуемой среде не даёт возможность определять концентрацию и пространственно-временные характеристики рассматриваемого аэрозоля.

Исследования, представленные в диссертационной работе, выполнялись при частичной поддержке РФФИ (грант № 11-02-90708) и в рамках программы «Участник молодёжного научно-инновационного конкурса» (У.М.Н.И.К.) Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере «Разработка программно-аппаратного комплекса исследования пространственно-временных и дисперсных параметров многофазных сред на основе проведения скоростной видеосъёмки и измерения коэффициентов спектральной прозрачности среды в широком диапазоне длин волн зондирующего излучения для определения качества устройств и технологических процессов создания аэрозолей и оценки экологической обстановки локальных зон окружающей среды и производственных помещений».

**Объектом исследования** является турбидиметрический метод восстановления распределения частиц по размерам и концентрации аэрозольных сред со значительно различающимися дисперсными параметрами, без внесения возмущений в исследуемый объект с возможностью проводить измерения автоматически с высокой скоростью.

**Предмет исследования** – восстановление функции распределения частиц по размерам и концентрации конденсированной фазы для различных аэрозольных сред; корректность и информативность получаемого результата; влияние различных математических реализаций обработки экспериментальной информации об ослаблении оптического излучения на характеристики рассматриваемого метода.

**Целью работы** является разработка турбидиметрического метода бесконтактного определения дисперсности и концентрации аэрозолей различной природы и фракционных составов частиц с возможностью получения их пространственно-временных характеристик и измерительного комплекса, его реализующего, с автоматической системой обработки экспериментально полученной

информации об ослаблении оптического излучения в широком диапазоне длин волн с высокой спектральной селективностью.

**Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:**

1 Обосновать выбор турбидиметрического метода в качестве базового для разработки метода определения функции распределения частиц по размерам.

2 Разработать метод восстановления функции распределения частиц по размерам и концентрации многофазных сред, основанный на новой математической модели ослабления зондирующего излучения аэрозолями различной дисперсности.

3 Разработать программно-аппаратный измерительный комплекс, реализующий предлагаемый метод определения параметров нестационарных многофазных сред, отличающийся высокой информативностью и быстродействием, при этом необходимо выбрать параметры источника оптического излучения, способ и прибор регистрации ослабленного исследуемой средой излучения, и создать программный комплекс, обеспечивающий обработку экспериментальной информации.

4 Разработать методику проведения измерений.

5 Экспериментально подтвердить применимость метода и реализующего его измерительного комплекса для оценки параметров аэрозолей различной природы и дисперсности с использованием разработанной методики.

**Методы исследования.** В процессе выполнения поставленных задач были использованы как теоретические, так и экспериментальные методы. Применялось математическое моделирование влияния дисперсного состава субмикронного и среднедисперсного аэрозоля на ослабление зондирующего излучения. Результаты, полученные при проведении экспериментов с использованием разработанной установки, сравнивались с данными других методов измерения – методом малоуглового рассеяния, электронным микроскопным анализом на сканирующем электронном микроскопе JSM-840. Исследования проводились в лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов ИПХЭТ СО РАН (г. Бийск).

**Научная новизна.**

1 Разработана новая физико-математическая модель ослабления оптического излучения в широком диапазоне длин волн субмикронным и среднедисперсным аэрозолями.

2 Разработан новый турбидиметрический высокоселективный метод (ТВСМ) исследования параметров субмикронных и среднедисперсных аэрозольных сред с использованием метода спектральной прозрачности, математическая реализация которого не содержит обратной задачи и позволяет определять дисперсность и концентрацию многофазной системы по информации об ослаблении прошедшего через неё оптического излучения.

3 Впервые разработан и сконструирован измерительный комплекс, реализующий новый турбидиметрический высокоселективный метод, отличающийся тем, что коэффициент спектральной прозрачности определяется для широкого диапазона длин волн с высокой спектральной селективностью и дополнительно

используется скоростная видеосъёмка для определения оптической длины пути зондирующего излучения и пространственно-временных характеристик объекта исследования. Техническая новизна разработанного измерительного комплекса подтверждена решением о выдаче патента на изобретение «Способ определения дисперсности и концентрации частиц в аэрозольном облаке» № 2010143653/28(062846) от 02.09.2011.

4 Экспериментально доказана возможность использования впервые разработанного комплекса для исследования параметров односоставных субмикронных и среднedisперсных аэрозолей различной природы и химического состава.

#### **На защиту выносятся:**

1 Турбидиметрический высокоселективный метод определения функции распределения частиц по размерам и концентрации многофазных сред различной природы по их спектральной прозрачности, основанный на новой физико-математической модели ослабления оптического излучения в широком диапазоне длин волн субмикронным и среднedisперсным аэрозолями.

2 Быстродействующий измерительный комплекс, позволяющий с высокой информативностью и точностью осуществлять определение параметров аэрозольных сред различного химического состава с широким диапазоном размеров частиц в процессе их создания, распространения и развития.

3 Программное обеспечение, реализующее разработанный метод определения дисперсности многофазных сред, выполняющее сбор и обработку информации от измерительного оборудования и позволяющее осуществлять измерения в автоматическом режиме.

4 Методика проведения измерений.

**Практическая значимость работы** состоит в создании быстродействующего измерительного комплекса определения параметров нестационарных многофазных сред и возможности его использования на предприятиях, занимающихся исследованием свойств и получением наноразмерных порошков и аэрозолей, а также в использовании разработанного измерительного комплекса для мониторинга запылённости промышленных помещений, экологического состояния объектов и контроля параметров аэрозольных сред, применяемых в технологических процессах. Впервые получены результаты по дистанционному бесконтактному определению функции распределения частиц по размерам субмикронных аэрозолей, полученных импульсным способом; показана динамика изменения функции распределения частиц по размерам различных аэрозольных сред, создаваемых импульсным методом, в процессе их образования и распространения; установлена зависимость трансформации спектра размеров частиц аэрозоля от физических параметров распыляемого вещества.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Разработанные метод и измерительный комплекс используются для исследования параметров субмикронных и среднedisперсных аэрозолей при выполнении работ по проектам фундаментальных исследований СО РАН № 5.5.1.3 и V.40.1.1 в ИПХЭТ СО РАН. Модернизация лабораторной установки для мелкосерийного производства позволит внедрить разработанный комплекс для экспериментальных исследований в других организациях. Результаты работы внедрены и используются в

обособленном структурном подразделении Томского государственного университета Научно-исследовательском институте прикладной математики и механики и в Бийском технологическом институте (филиале) «Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова».

**Достоверность полученных результатов основывается на:**

- физической обоснованности и корректности постановки решаемых задач;
- использовании математически строгих преобразований в разработанной модели;
- использовании современной исследовательской техники высокой точности и выполнении калибровки измерительных приборов;
- совпадении экспериментальных данных, полученных при измерении с использованием разработанного метода ТВСМ, с данными, полученными при помощи других методов;
- прямом совпадении теоретических и экспериментальных данных для тестовых объектов исследования;
- последовательной обоснованности предложенных решений и их пошаговой проверке на численных моделях;
- непротиворечивостью полученных результатов с известными положениями других исследователей;
- ясной физической интерпретацией полученных оценок и обоснованностью используемых приближений;
- воспроизводимости полученных результатов.

**Апробация работы.** Материалы работы обсуждались на научно-технических семинарах лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов ИПХЭТ СО РАН и кафедры информационных управляющих систем БТИ АлтГТУ, а также докладывались и получили положительную оценку на конференциях и симпозиумах: Всероссийской конференции «Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов» (Бийск, 2008, 2010); Всероссийской конференции «Информационные технологии в науке, экономике и образовании» (Бийск, 2009, 2010, 2011); Всероссийской конференции «Инновационные технологии: производство, экономика, образование» (Бийск, 2009); Всероссийской конференции «Методы исследования состава и структуры функциональных материалов» (Новосибирск, 2009); Всероссийской конференции «Современная баллистика и смежные вопросы механики» (Томск, 2009); Международной конференции «High Energy Materials: Demilitarization, Antiterrorism and Civil Application» (Biarritz, 2009, Бийск, 2010); Всероссийской конференции «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» (Бийск, 2010, 2011); Всероссийской конференции «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред» (Томск, 2010); Рабочей группе «Аэрозоли Сибири» (Томск, 2010); Международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2011); Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, 2011); Международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии» (Томск, 2011); Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные

проблемы современной механики» (Томск, 2011); Всероссийской конференции «Химия, технология и применение высокоэнергетических соединений» (Бийск, 2011).

**Личный вклад автора.** Автором лично получены все основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, осуществлена обработка и интерпретация полученных данных, разработан метод и измерительный комплекс для определения параметров многофазных сред, написано программное обеспечение, реализующее разработанный метод, подготовлены публикации и доклады на конференциях, сформулированы основные научные положения и выводы.

**Публикации.** По материалам диссертационного исследования опубликованы 24 печатных работы, из них 2 в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК: «Известия вузов. Физика», «Ползуновский вестник».

### **Структура и объём работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 4 приложений. Общий объём диссертации 153 страницы текста, диссертация содержит 65 рисунков, 7 таблиц, список литературы из 113 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** сформирована цель и задачи работы, обоснована актуальность темы диссертации, научная и практическая значимость полученных результатов, изложены выносимые на защиту положения, представлено краткое содержание каждой главы.

**В первой главе (Бесконтактные методы исследования параметров многофазных сред)** проведён обзор и анализ бесконтактных методов диагностики многофазных сред и приведена их классификация. Рассмотрены основные характеристики аэрозолей, методы их определения и реализующие эти методы измерительные устройства. Приводятся физические основы взаимодействия оптического излучения с многофазными средами.

На основе выполненного обзора и анализа с учётом преимуществ и недостатков рассматриваемых методов в качестве базового, при разработке нового метода определения дисперсности и концентрации субмикронных аэрозолей, выбран турбидиметрический МСП, как наиболее подходящий для решения поставленных задач.

**Во второй главе (Турбидиметрический высокоселективный метод восстановления функции распределения частиц по размерам и концентрации аэрозолей)** приведено описание физико-математической модели разработанного метода определения дисперсности и концентрации аэрозольных сред.

В разработанном методе восстановление функции распределения частиц по размерам осуществляется с помощью уравнения Фредгольма первого рода:

$$I(\lambda, t) = I_0(\lambda, t) \exp \left[ -\frac{\pi C_n(t) l(t)}{4} \int_0^{\infty} Q \left( \frac{\pi D}{\lambda}, m(\lambda) \right) D^2 f(D, t) dD \right], \quad (1)$$



где  $I(\lambda, t)$  – интенсивность прошедшего через аэрозоль излучения;  $I_0(\lambda, t)$  – интенсивность зондирующего излучения;  $C_n$  – счётная концентрация конденсированной фазы аэрозоля;  $l(t)$  – длина оптического пути;  $Q\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m(\lambda)\right)$  – фактор эффективности ослабления зондирующего излучения;  $D$  – диаметр частиц;  $\lambda$  – длина волны зондирующего излучения;  $m(\lambda)$  – комплексный показатель преломления конденсированной фазы аэрозоля;  $f(D, t)$  – функция распределения частиц по размерам.

Вид функции распределения частиц по размерам задаётся априорно в виде обычного гамма-распределения:

$$f(D, t) = a(t) D^{\alpha(t)} \exp(-b(t)D), \quad (2)$$

где  $\alpha(t)$  и  $b(t)$  – параметры распределения,  $a(t)$  является нормировочным коэффициентом и находится из выражения:

$$a(t) = \left[ \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^{\alpha(t)} \exp(-b(t)D) dD \right]^{-1}, \quad (3)$$

где  $D_{\min}$  и  $D_{\max}$  соответственно минимальный и максимальный диаметры частиц, присутствующих в исследуемом аэрозоле. При численном расчёте интеграл в выражении (3) находится с использованием алгоритма Ромберга, благодаря чему удаётся повысить точность его нахождения не увеличивая время, затрачиваемое на расчёт. Гамма-распределение (2) выбрано для описания распределения частиц по размерам в исследуемом аэрозоле ввиду его универсальности, применительно к средам с одним механизмом получения дисперсной фазы, кроме того, этот вид распределения частиц по размерам наиболее часто встречается в природных аэрозолях.

При решении задачи определения функции распределения частиц по размерам используется экспериментальная информация о коэффициенте спектральной прозрачности:

$$\tau_{\lambda}^{\text{эксн}}(t) = \ln \frac{I_0(\lambda, t)}{I(\lambda, t)}. \quad (4)$$

После чего находится отношение:

$$k_{\text{эксн}}(t) = \frac{\tau_{\lambda_1}^{\text{эксн}}(t)}{\tau_{\lambda_2}^{\text{эксн}}(t)}, \quad (5)$$

где  $\tau_{\lambda_1}^{\text{эксн}}$  – экспериментально измеренный коэффициент спектральной прозрачности для длины волны  $\lambda_1$ ;  $\tau_{\lambda_2}^{\text{эксн}}$  – экспериментально измеренный коэффициент спектральной прозрачности для длины волны  $\lambda_2$ . Для спектрального диапазона зондирующего излучения последовательность выбора длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  определяется по специальному закону, который должен быть применён при

обработке ансамбля теоретических и экспериментальных значений коэффициентов спектральной прозрачности, при этом проведённое теоретическое исследование показало, что точность и устойчивость алгоритма нахождения функции распределения частиц по размерам не зависит от способа выбора этих длин волн. На следующем шаге методом циклического покоординатного спуска задают параметры  $\alpha(t)$  и  $b(t)$  распределения (2). Далее рассчитывается отношение теоретически полученных коэффициентов спектральной прозрачности в соответствии с уравнением (1) для длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  по формуле:

$$k_{meop}(t) = \frac{\tau_{\lambda_1}^{meop}(t)}{\tau_{\lambda_2}^{meop}(t)} = \frac{\int_{D_{min}}^{D_{max}} Q\left(\frac{\pi D}{\lambda_1}, m(\lambda_1)\right) D^2 f(D, t) dD}{\int_{D_{min}}^{D_{max}} Q\left(\frac{\pi D}{\lambda_2}, m(\lambda_2)\right) D^2 f(D, t) dD}, \quad (6)$$

где фактор эффективности ослабления зондирующего излучения ( $Q$ ) рассчитывается в соответствии с теорией Ми по формуле:

$$Q\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m(\lambda)\right) = \frac{2}{\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n), \quad (7)$$

где коэффициенты Ми ( $a_n$  и  $b_n$ ) рассчитываются в соответствии с выражениями:

$$a_n\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m(\lambda)\right) = \frac{\left[ \frac{A_n\left(\frac{\pi D m(\lambda)}{\lambda}\right)}{m(\lambda)} + \frac{n}{\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)} \right] \operatorname{Re}\left[\xi_n\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)\right] - \operatorname{Re}\left[\xi_{n-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)\right]}{\left[ \frac{A_n\left(\frac{\pi D m(\lambda)}{\lambda}\right)}{m(\lambda)} + \frac{n}{\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)} \right] \xi_n\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) - \xi_{n-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)}; \quad (8)$$

$$b_n\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m(\lambda)\right) = \frac{\left[ m(\lambda) A_n\left(\frac{\pi D m(\lambda)}{\lambda}\right) + \frac{n}{\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)} \right] \operatorname{Re}\left[\xi_n\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)\right] - \operatorname{Re}\left[\xi_{n-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)\right]}{\left[ m(\lambda) A_n\left(\frac{\pi D m(\lambda)}{\lambda}\right) + \frac{n}{\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)} \right] \xi_n\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) - \xi_{n-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)}, \quad (9)$$

где  $A_n$  и  $\xi_n$  представляют собой комплексные рекуррентные соотношения, они рассчитываются по формулам:

$$\xi_n\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) = \frac{2n-1}{\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)} \xi_{n-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) - \xi_{n-2}\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right); \quad (10)$$

$$\xi_0\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) = \sin\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) + i \cos\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right); \quad (11)$$

$$\xi_{-1} = \cos\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right) - i \sin\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right); \quad (12)$$

$$A_n\left(\frac{\pi D m(\lambda)}{\lambda}\right) = -\frac{n}{\left(\frac{\pi D m(\lambda)}{\lambda}\right)} + \left[ \frac{n}{\left(\frac{\pi D m(\lambda)}{\lambda}\right)} - A_{n-1}\left(\frac{\pi D m(\lambda)}{\lambda}\right) \right]^{-1}; \quad (13)$$

$$A_0\left(\frac{\pi D m(\lambda)}{\lambda}\right) = \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi D m(\lambda)}{\lambda}\right). \quad (14)$$

Численный расчёт интегралов в выражении (6) осуществляется методом Симпсона.

Нахождение отношений коэффициентов спектральной прозрачности (выражения (5) и (6)), а не их абсолютных величин реализовано для того, чтобы избавиться от множителя перед знаком интеграла в формуле (1), с целью привлечения меньшего количества априорной информации об исследуемом процессе.

Фактор эффективности ослабления зондирующего излучения ( $Q$ ) считается найденным при выполнении условия:

$$\left[ \sum_{n=1}^N (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n) \right] \cdot 10^{-8} > (2N+3) \operatorname{Re}(a_{N+1} + b_{N+1}). \quad (15)$$

На следующем этапе проводится определение отклонения ( $\Delta$ ) расчётного значения отношений коэффициентов спектральной прозрачности от экспериментального по формуле:

$$\Delta = \left| k_{\text{эксн}}(t) - k_{\text{теор}}(t) \right|. \quad (16)$$

После выполнения приведённых расчётов для всего диапазона длин волн находится суммарное отклонение расчётных данных от экспериментальных для выбранной функции распределения частиц по размерам ( $f(D, t)$ ) в соответствии с формулой:

$$\chi(f(D, t)) = \sum_{i=0}^{(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})/S} \Delta_i, \quad (17)$$

где  $\lambda_{\max}$  и  $\lambda_{\min}$  соответственно максимальное и минимальное значения длин волн зондирующего излучения,  $S$  – величина шага по длине волны. Далее выбирается тот вид функции распределения частиц по размерам ( $f(D, t)$ ), для которого параметр  $\chi$  имеет наименьшее значение.

Затем с помощью скоростной видеосъёмки и использования программного комплекса определяется оптическая длина пути зондирующего излучения в ис-

следуемом аэрозоле ( $l(t)$ ) и рассчитывается массовая концентрация дисперсной фазы аэрозоля по формуле:

$$C_m(t) = \frac{S}{(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})} \sum_{j=1}^{(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})/S} \frac{\tau_{\lambda_j}^{\text{эксн}} \rho D_{32}(t)}{1,5l(t) \bar{Q}\left(\frac{\pi D}{\lambda_j}, m(\lambda_j)\right)}, \quad (18)$$

где  $\rho$  – плотность вещества частиц аэрозоля;  $D_{32}(t)$  – средний объёмно-поверхностный диаметр частиц;  $\bar{Q}$  – усреднённый фактор эффективности ослабления оптического излучения, они находятся, соответственно, по формулам:

$$D_{32}(t) = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^3 f(D, t) dD}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^2 f(D, t) dD}; \quad (19)$$

$$\bar{Q}\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m(\lambda)\right) = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} Q\left(\frac{\pi D}{\lambda}, m(\lambda)\right) D^2 f(D, t) dD}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^2 f(D, t) dD}. \quad (20)$$

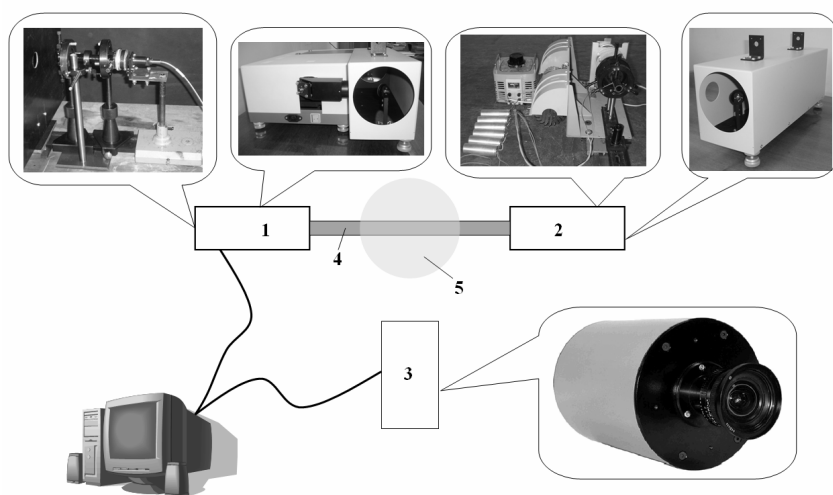
Проведённая расчётно-теоретическая оценка для видимой области оптического излучения показала, что с использованием разработанной физико-математической модели ТВСМ, возможно исследовать аэрозоли с размерами частиц от 22 нм до 10,5 мкм.

Для проверки адекватности разработанного алгоритма восстановления функции распределения частиц по размерам проведена серия численных экспериментов, суть которых заключалась в следующем: в исходном состоянии предполагалась известной зависимость коэффициента спектральной прозрачности от длины волны оптического излучения для некоторого вида гамма-распределения, после чего вид распределения считался неизвестным и определялся с помощью разработанного метода. Результаты такого определения полностью совпадают с исходными данными. Для проверки устойчивости метода осуществлялось восстановление функции распределения частиц по размерам с использованием начальных данных с наложенным на них шумом, что также привело к исходному гамма-распределению.

Совместно с разработанным турбидиметрическим методом ТВСМ использовался модифицированный метод малоуглового рассеяния (ММУ) для сравнительной оценки получаемых результатов. Он основан на определении дисперсных параметров аэрозоля по измерению рассеянного под малыми углами излучения, прошедшего через исследуемый объём, и позволяет регистрировать частицы размером от 1 до 100 мкм.

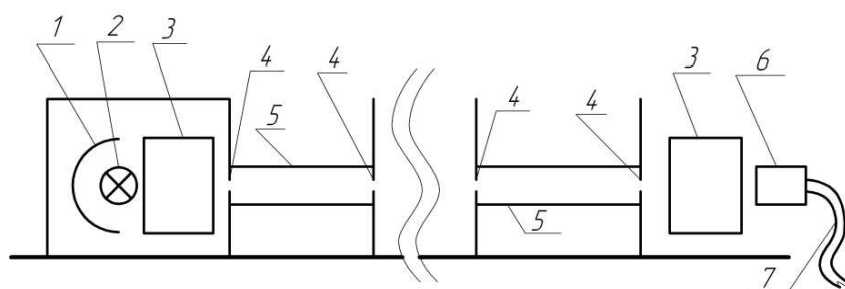
**В третьей главе (Программно-аппаратный измерительный комплекс определения параметров многофазных сред)** приведено описание разработанного измерительного комплекса, реализующего новый метод определения параметров аэрозольных сред. Он осуществляет непосредственное определение величин интенсивности опорного оптического излучения  $I_0(\lambda, t)$ , излучения, прошедшего через аэрозоль  $I(\lambda, t)$  и длины его пути в исследуемой среде  $l(t)$ . Блок-схема разработанного измерительного комплекса приведена на рисунке 1.

На рисунке 2 схематически приведено устройство оптического тракта измерительного комплекса. Одной из отличительных особенностей разработанного измерительного комплекса является возможность варьирования в широких пределах расстояния между источником и приёмником излучения.



1 – приёмник зондирующего излучения; 2 – источник зондирующего излучения; 3 – камера скоростной видеосъёмки; 4 – коллимированный поток оптического излучения; 5 – облако исследуемого аэрозоля

Рисунок 1 – Блок-схема измерительного комплекса



1 – сферическое зеркало; 2 – галогенная лампа накаливания; 3 – система линз; 4 – диафрагмы; 5 – светозащитный тубус; 6 – торцевая гильза световода; 7 – световод

Рисунок 2 – Устройство источника и приёмника оптического излучения

В разработанном измерительном комплексе в качестве источника и приёмника оптического излучения применяется различная аппаратура в зависимости от диапазона размеров частиц исследуемого аэрозоля. Для среднedisперсных аэрозолей (размеры частиц от 1 до 10 мкм) приёмником оптического излучения является инфракрасный Фурье-спектрометр «Инфралюм ФТ-801», а источником излучения – инфракрасный прожектор, диапазон длин волн зондирующего излучения для данной реализации 1,8 – 18 мкм. Для субмикронных аэрозолей приёмник излучения выполнен в виде конденсорной линзы, фокусирующей параллельный пучок излучения на торце световода. Собранный конденсором излучение по световоду передаётся в спектроаналитический анализатор, реализованный на базе спектрометра S125-2048/14 производства фирмы

В разработанном измерительном комплексе в качестве источника и приёмника оптического излучения применяется различная аппаратура в зависимости от диапазона размеров частиц исследуемого аэрозоля. Для среднedisперсных аэрозолей (размеры частиц от 1 до 10 мкм) приёмником оптического излучения является инфракрасный Фурье-спектрометр «Инфралюм ФТ-801», а источником излучения – инфракрасный прожектор, диапазон длин волн зондирующего излучения для данной реализации 1,8 – 18 мкм. Для субмикронных аэрозолей приёмник излучения выполнен в виде конденсорной линзы, фокусирующей параллельный пучок излучения на торце световода. Собранный конденсором излучение по световоду передаётся в спектроаналитический анализатор, реализованный на базе спектрометра S125-2048/14 производства фирмы

инфракрасный прожектор, диапазон длин волн зондирующего излучения для данной реализации 1,8 – 18 мкм. Для субмикронных аэрозолей приёмник излучения выполнен в виде конденсорной линзы, фокусирующей параллельный пучок излучения на торце световода. Собранный конденсором излучение по световоду передаётся в спектроаналитический анализатор, реализованный на базе спектрометра S125-2048/14 производства фирмы

«SolarТП», где с помощью дифракционной решётки разлагается в спектр по длинам волн с шагом в 0,376 нм, чем и обеспечивается высокая селективность. Измерение интенсивности излучения осуществляется на участке длин волн от 360 до 1100 нм. Источником излучения служит галогенная газонаполненная лампа накаливания, запитанная от стабилизированного источника тока.

Для измерения длины пути зондирующего излучения, а также пространственно-временных характеристик исследуемого объекта применяются камеры скоростной видеосъёмки ВидеоСпринт /С/Г4 и ВидеоСпринт /Г4/NG, совместно с гелий-неоновыми лазерами и кварцевыми галогенными осветителями «ARRI Compact», используемыми для подсветки облака аэрозоля с целью более точного определения его границ.

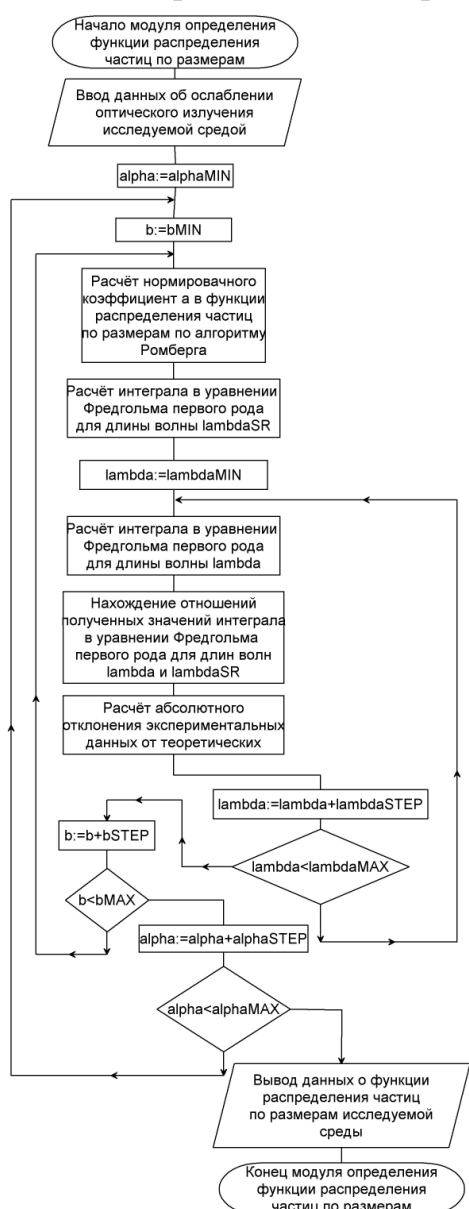


Рисунок 3 – Обобщённая блок-схема модуля определения функции распределения частиц по размерам программной части разработанного измерительного комплекса

Вся информация с применяемого оборудования передаётся на компьютер, где осуществляется её дальнейшая обработка с использованием разработанного программного обеспечения. Программное обеспечение представляет собой несколько модулей каждый из которых выполняет определённые действия: приём и обработка информации от аппаратной части измерительного комплекса; расчёт пространственно-временных характеристик исследуемой среды; восстановление функции распределения частиц по размерам (обобщённая блок-схема этого модуля представлена на рисунке 3); расчёт концентрации; обеспечение диалога с оператором (пользовательский интерфейс); выдача управляющих воздействий на аппаратную часть измерительного комплекса; блок сохранения и вывода информации об исследуемой среде (в том числе подготовка отчёта).

Процесс измерения происходит в следующей последовательности: сначала регистрируется опорный спектр без присутствия аэрозоля на пути зондирующего излучения ( $I_0(\lambda, t)$ ), далее запускается процесс создания аэрозоля и регистрации спектральных и видеоданных. В случае исследования процессов, где генерация дисперсной среды происходит непрерывно, для регистрации опорного спектра измерительный комплекс может быть оснащён обводным оптическим каналом. Последующая обработка полученной информации происходит программно с использованием персонального компьютера.

Существенным достоинством предлагаемой реализации метода является простота регулиро-

вания измеряемого диапазона размеров исследуемых частиц, которое осуществляется изменением диапазона длин волн зондирующего излучения. При использовании оптического излучения с длинами волн всего видимого и ближнего инфракрасного диапазонов удаётся получать информацию о частицах размером от десятков нанометров до десятков микрометров. Для расширения возможностей метода, с целью учёта вклада в функцию распределения более мелких частиц и частиц размером сотни микрометров, необходимо будет дополнить измерительный комплекс оптическим каналом с ультрафиолетовой и дальней инфракрасной областями оптического спектра, соответственно. При этом математическая модель метода остаётся прежней, не требуя модификаций. Также, большим преимуществом разработанного метода и измерительного комплекса является возможность проводить исследования как нестационарных потоков многофазных сред, так и стационарных дисперсных сред, в том числе помещённых в оптические кюветы, в этом случае в качестве среды, в которой находятся исследуемые частицы, может выступать любое оптически прозрачное вещество. Это стало возможным благодаря тому, что коэффициент спектральной прозрачности находится как относительная величина, поэтому единственным дополнительным требованием для различных сред будет выступать необходимость снятия опорного спектра для этой среды без исследуемой дисперсной фазы.

Разработанный измерительный комплекс применялся для исследования аэрозолей совместно с установкой ЛИД-2М, реализующей метод малоуглового рассеяния. Схема проведения эксперимента приведена на рисунке 4.

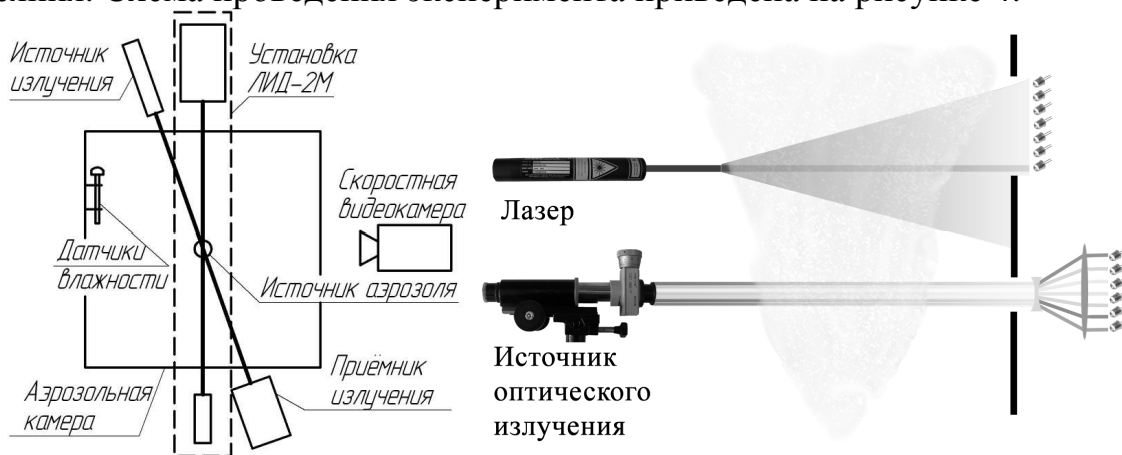


Рисунок 4 – Схема совместного использования разработанного измерительного комплекса и установки ЛИД-2М

С целью повышения оперативности измерений и обеспечения портативности используемого оборудования предложена схема мобильного измерительного комплекса, в котором в качестве источников зондирующего излучения используются различные полупроводниковые лазеры, а в качестве приёмников – фотодиоды с селективностью длин волн на основе использования интерференционных фильтров, металлических и диэлектрических пластин.

Данный вариант измерительного комплекса предназначен для проведения экспресс-анализа дисперсности и концентрации аэрозолей, присутствующих в производственных помещениях и локальных зонах атмосферы, а также для ис-

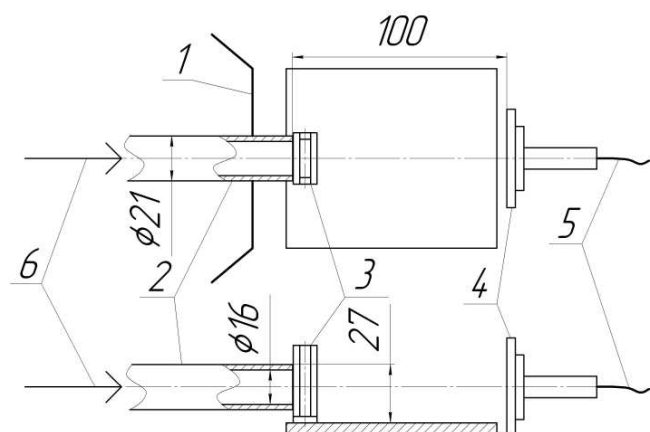
пользования в технологических процессах с целью измерения и контроля параметров многофазных сред.

**В четвёртой главе (Исследование параметров многофазных сред)** представлены результаты тестовых и исследовательских экспериментов по определению параметров различных многофазных сред.

В качестве модельного эксперимента для проверки работоспособности аппаратной части, отвечающей за измерение параметров субмикронных аэрозолей, проводилось измерение ослабления оптического излучения взвесью химически чистого субмикронного порошка оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) в дистиллированной воде. Выбор оксида алюминия был обусловлен известностью зависимостей его показателей преломления ( $n(\lambda)$ ) и поглощения ( $\varphi(\lambda)$ ) в комплексном показателе преломления ( $m(\lambda) = n(\lambda) - i\varphi(\lambda)$ ) от длины волны зондирующего излучения:

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \lambda^2 \left( \frac{1,024}{\lambda^2 - 0,003776} + \frac{1,058}{\lambda^2 - 0,01225} + \frac{5,281}{\lambda^2 - 321,4} \right)} \cdot 0,996364; \quad (21)$$

$$\varphi(\lambda) = 0,002(0,06\lambda^2 + 0,7\lambda + 1) \cdot 0,007391. \quad (22)$$



1 – светозащитный экран; 2 – выходной тубус коллиматора; 3 – кювета; 4 – конденсор; 5 – световод; 6 – направление прохождения оптического излучения  
Рисунок 5 – Кюветная часть измерительного комплекса

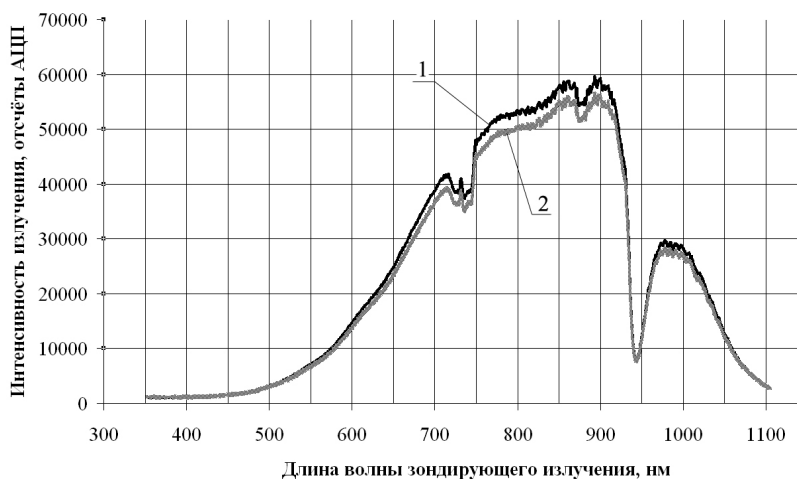
Как было установлено в предварительных экспериментах пренебрежение зависимостью комплексного показателя преломления от длины волны и использование постоянных величин для всех длин волн приводит к ошибкам.

Перед исследованием оксид алюминия перемалывался в агатовой ступе в течение 40 часов. Суспензия оксида алюминия подвергалась воздействию ультразвука с целью избавления от образовавшихся в ней агломератов, после чего помещалась в стеклянную кювету, в которой проводилось её исследование. Перед измерением кювета выстаивалась в покое в течение 72 часов с целью осаждения оставшихся неразрушенными агломератов. Концентрация оксида алюминия в используемой суспензии составляла  $0,4 \text{ кг/м}^3$ . Кюветная часть разработанного измерительного комплекса приведена на рисунке 5 (все размеры даны в миллиметрах). Длина пути оптического излучения в исследуемой среде (расстояние между внутренними поверхностями стёкол кюветы) составила  $5,075 \text{ мм}$ .

Перед измерением пропускания излучения кюветой с суспензией оксида алюминия измерялся базовый спектр пропускания излучения кюветой с чистой дистиллированной водой. Базовый спектр и спектр пропускания исследуемой суспензии приведены на рисунке 6. По приведённым спектральным данным

Перед измерением пропускания излучения кюветой с суспензией оксида алюминия измерялся базовый спектр пропускания излучения кюветой с чистой дистиллированной водой. Базовый спектр и спектр пропускания исследуемой суспензии приведены на рисунке 6. По приведённым спектральным данным





1 – спектр пропускания кюветы с чистой дистиллированной водой; 2 – спектр пропускания кюветы с суспензией  $Al_2O_3$

Рисунок 6 – Спектры пропускания оптического излучения на зависимость, приведённая под номером 1 на рисунке 8.

Под номером 2 на рисунке 8 приведена теоретически рассчитанная зависимость коэффициента спектральной прозрачности от длины волны зондирующего излучения, отличие для которой от экспериментальных данных оказалось минимальным. Отличие экспериментальных данных от теоретических на участке длин волн до 480 нм обусловлено малым уровнем полезного сигнала в этом диапазоне, что хорошо иллюстрирует рисунок 6.

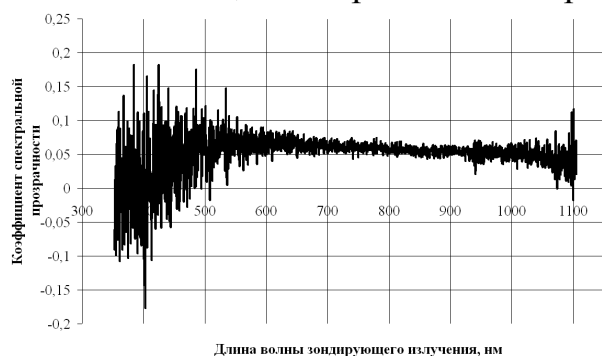
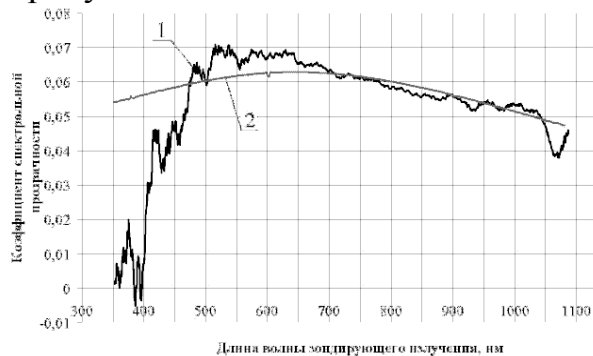


Рисунок 7 – Экспериментально полученный коэффициент спектральной прозрачности



1 – экспериментально полученные данные; 2 – теоретически полученные данные  
Рисунок 8 – Экспериментальные и теоретические коэффициенты спектральной прозрачности

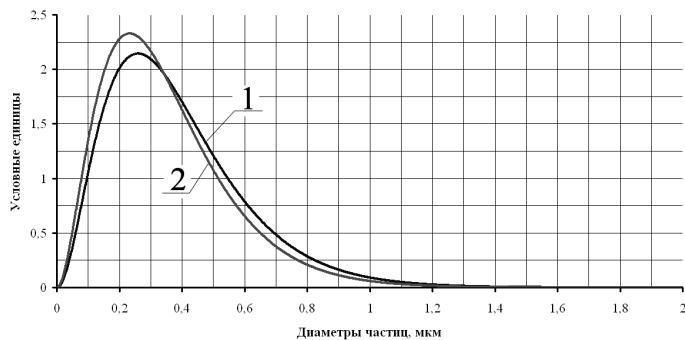


Рисунок 9 – Функции распределения частиц по размерам полученные методом ТВСМ (1) и с использованием электронной микроскопии (2)

проводился расчёт коэффициента спектральной прозрачности по формуле (4). Полученная при этом зависимость коэффициента спектральной прозрачности от длины волны приведена на рисунке 7.

К зависимости, приведённой на рисунке 7, была применена фильтрация методом скользящего среднего для исключения высокочастотных шумов, в результате чего была получена зависимость, приведённая под номером 2 на рисунке 8.

Найденной теоретической зависимости коэффициента спектральной прозрачности от длины волны (кривая 2 на рисунке 8) соответствует функция распределения частиц по размерам исследуемой среды, приведённая под номером 1 на рисунке 9. Полученный результат (кривая 1, рисунок 9) сравнивался с распределением частиц по раз-

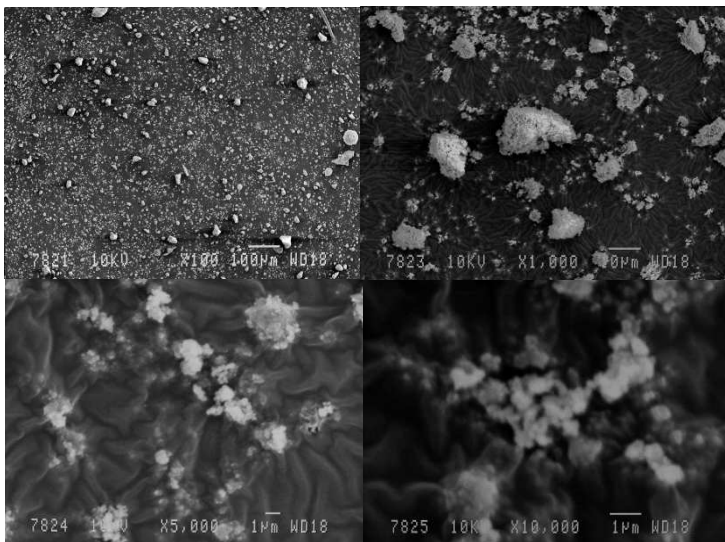


Рисунок 10 – Фотографии частиц оксида алюминия, полученные сканирующим электронным микроскопом JSM-840

мерам, представленным под номером 2 на рисунке 9, которое найдено с использованием электронной микроскопии (рисунок 10). В результате сравнения полученных данных (рисунок 9) установлено, что ошибка определения функции распределения частиц по размерам с использованием метода ТВСМ и реализующего его измерительного комплекса составила 13 %.

Концентрация исследуемой суспензии, определённая с использованием ТВСМ, составила  $0,395 \text{ кг/м}^3$ , что отличается от реального значения на 1,25 %.

Следовательно, разработанный комплекс можно использовать для точного определения концентраций гетерогенных сред.

Для проверки применимости разработанного метода в исследованиях среднедисперсных аэрозолей проведены измерения счётной функции распределения частиц по размерам среды, создаваемой генератором холодного аэрозоля «NEBULO» производства фирмы «Igeba», а также изменение размеров частиц в зависимости от расхода распыляемого вещества, в качестве которого применялась дистиллированная вода. Зависимость комплексного показателя преломления от длины волны оптического излучения для дистиллированной воды была взята в справочной литературе.

Серия экспериментов с генератором холодного аэрозоля начиналась с измерения дисперсности на минимальном расходе рабочей жидкости (5 мл/мин), в результате была получена счётная функция распределения частиц по размерам, вид которой приведён на рисунке 11 (кривая 1). Также счётная функция распределения частиц по размерам для данного расхода была измерена с помощью установки, реализующей метод малоуглового рассеяния (ММУ) (кривая 2 на рисунке 11).

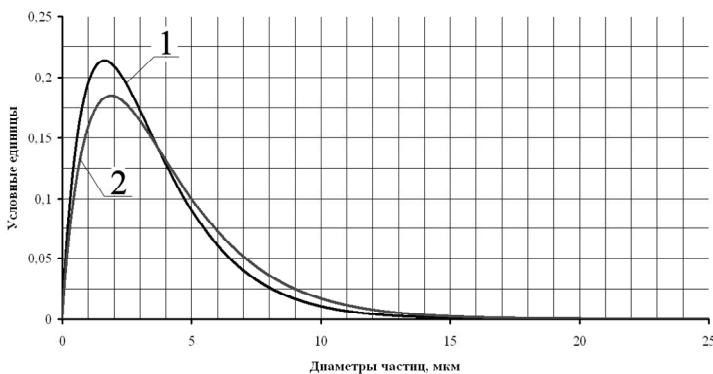
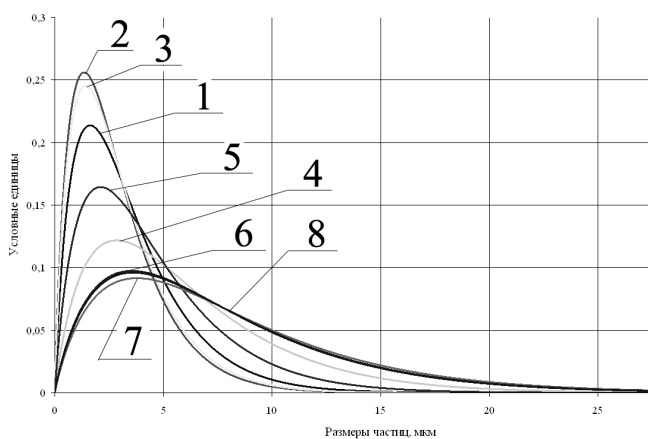


Рисунок 11 – Функции распределения частиц по размерам аэрозоля, создаваемого генератором NEBULO: 1 – определённая ТВСМ; 2 – полученная с использованием ММУ

Различие восстановления функции распределения с помощью ТВСМ относительно данных, полученных при использовании установки, основанной на ММУ, составило 15 %. Кроме погрешностей измерений, это различие объясняется ещё и тем, что ММУ при использовании зондирующего излучения с длиной



1 – 5 мл/мин; 2 – 40 мл/мин; 3 – 75 мл/мин;  
4 – 110 мл/мин; 5 – 145 мл/мин; 6 –  
180 мл/мин; 7 – 215 мл/мин; 8 – 250 мл/мин  
Рисунок 12 – Счётные функции распределе-  
ния частиц по размерам при различных зна-  
чениях расхода рабочей жидкости для гене-  
ратора холодного аэрозоля «NEBULO»

«NEBULO» представлены на рисунке 12.

С помощью разработанного измерительного комплекса проводилось исследование аэрозоля, получаемого импульсным способом при распылении дистиллированной воды и 20 % водного раствора глицерина, с целью выявления зависимости эволюции дисперсных характеристик гетерогенной среды во времени от испаряемости распыляемого вещества. Для создаваемого аэрозоля определялась дисперсность, концентрация и скорость перемещения фронта облака, а также отслеживалось изменение этих параметров во времени. Полученные функции распределения частиц по размерам в различные моменты времени для дистиллированной воды и раствора глицерина представлены на рисунках 13 и 14, соответственно.

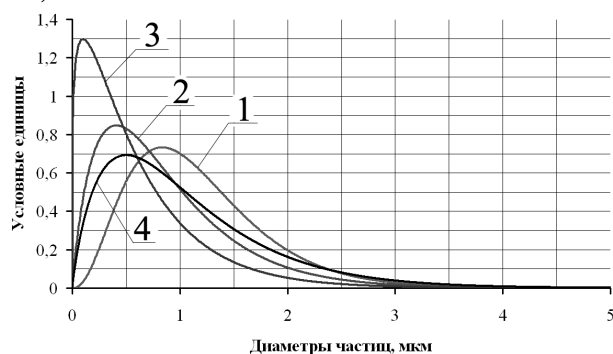


Рисунок 13 – Функции распределения час-  
тиц по размерам дистиллированной воды  
для моментов времени 10 мс (1), 4 с (2), 9 с  
(3), полученные с помощью ТВСМ и для  
момента времени 9 с (4), полученная  
с помощью ММУ

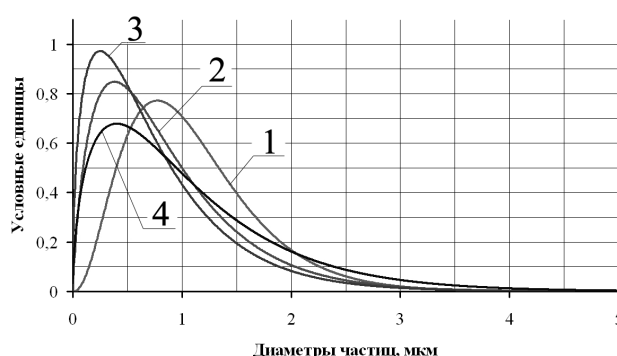


Рисунок 14 – Функции распределения час-  
тиц по размерам 20 % водного раствора гли-  
церина для моментов времени 10 мс (1), 4 с  
(2), 9 с (3), полученные с помощью ТВСМ и  
для момента времени 9 с (4), полученная  
с помощью ММУ

Полученные данные (кривые 1, 2, 3 на рисунках 13 и 14) хорошо согласуются с результатами теоретических расчётов, выполненных с учётом испарения, из чего можно сделать вывод о преобладании влияния испарения частиц на

волны 0,63 мкм менее информативен в области малых частиц ( $D \leq 1,0$  мкм), чем ТВСМ.

Далее для генератора холодного аэрозоля проводилось увеличение расхода рабочей жидкости до 250 мл/мин, и осуществлялось измерение дисперсности с помощью разработанного измерительного комплекса. Как и указано разработчиком генератора, при этом наблюдался общий рост размера капель, однако с небольшими локальными отклонениями. Счётные функции распределения частиц по размерам при различном расходе рабочей жидкости для генератора холодного аэрозоля

дисперсность аэрозольной среды, полученной импульсным способом, в начальный момент времени. Для теоретической оценки трансформации спектра размеров частиц во времени применялась физико-математическая модель, учитывающая процессы коагуляции, испарения и осаждения с использованием уравнений Смолуховского, Максвелла, Томсона.

Под номером 4 на рисунках 13 и 14 приведены функции распределения частиц по размерам исследуемой среды для 9 с, полученные с использованием ММУ. По представленным результатам видно, что ММУ в отличие от ТВСМ не достаточно информативен в области размеров частиц менее 1 мкм, однако совместное использование этих методов позволяет определять дисперсность с информацией о частицах размером от 22 нм до 100 мкм.

Изменение концентрации исследуемых аэрозолей во времени, определяемой ТВСМ, приведено на рисунке 15.

Скорость фронта облака аэрозоля определялась с использованием скоростной видеосъёмки, изменение скорости в начальный период времени создания аэрозоля приведено на рисунке 16.

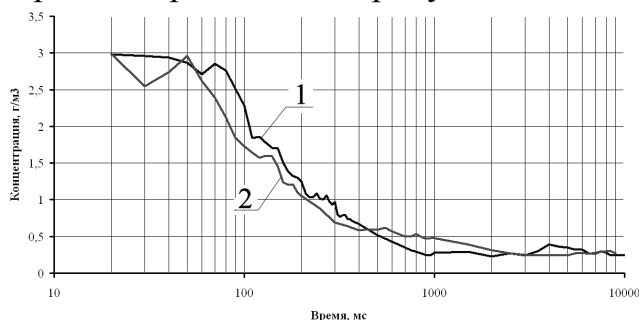


Рисунок 15 – Изменение массовой концентрации дистиллированной воды (1) и 20 %-ного раствора глицерина (2) в аэрозоле, создаваемом импульсным методом

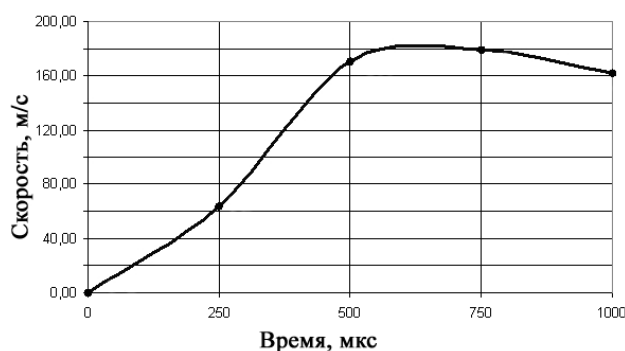


Рисунок 16 – Изменение скорости фронта аэрозольного облака

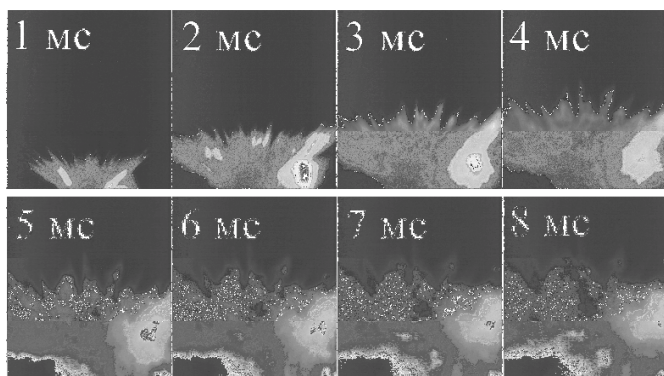


Рисунок 17 – Кинограмма образования аэрозольного облака при импульсном распылении дистиллированной воды

Динамика изменения скорости фронта, формы и размера аэрозольного облака определялась на основе анализа кинограммы процесса его образования при распылении импульсным способом дистиллированной воды, представленной на рисунке 17. Эти данные использовались при определении концентрации (рисунок 15) для начальных моментов времени, когда длина оптического пути излучения и объём, занимаемый аэрозольным облаком, не достигли своих номинальных значений.

Таким образом, можно утверждать, что добавление к распыляемому веществу слабоиспаряемой примеси приводит к меньшей трансформации спектра размеров частиц импульсно получаемого аэрозоля со сдвигом модального диаметра в область более мелких капель в момент его образования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Впервые разработан новый высокоинформативный метод ТВСМ восстановления функции распределения частиц по размерам субмикронных и средне-дисперсных аэрозолей с диапазонами размеров частиц от 22 нм до 10,5 мкм, основанный на решении серии прямых задач оптики аэрозолей.

2 Разработанный высокоселективный оптический измерительный комплекс позволяет определять дисперсность; концентрацию, предельно допустимое значение которой зависит от поглощающих свойств распыляемого материала и мощности источника оптического излучения; скорость распространения, предельно допустимое значение которой 500 м/с; форму и геометрические размеры аэрозольного облака (максимальный размер регистрируемого облака зависит от типа используемого объектива и величины пространственного разрешения) с возможностью проводить кюветные исследования, а также контролировать изменения этих величин во времени с периодом 10 мс, при этом измерения могут проводиться в автоматическом режиме с высоким временным разрешением.

3 Предложен и апробирован новый способ определения концентрации гетерогенной системы с использованием данных скоростной видеосъемки и регистрации ослабленного зондирующего излучения, погрешность которого не превышает 2 %.

4 Разработано программное обеспечение, реализующее ТВСМ и осуществляющее сбор и обработку информации от используемой аппаратуры с возможностью проводить измерения в автоматическом режиме.

5 С использованием разработанного измерительного комплекса проведена серия экспериментальных исследований по определению параметров различных гетерогенных сред. Сравнение результатов тестовых экспериментов с данными, полученными другими методами, показало корректность и работоспособность разработанного метода ТВСМ и способа определения концентрации. Погрешность определения функции распределения частиц по размерам, разработанным измерительным комплексом, не превышает 13 %.

6 Применение метода ТВСМ для определения дисперсности среды, создаваемой генератором холодного аэрозоля «Nebulo» при различных значениях расхода рабочей жидкости, показало возможность использования разработанного измерительного комплекса для исследования эволюции дисперсности гетерогенной среды.

7 Впервые получены результаты по дистанционному бесконтактному определению функции распределения частиц по размерам субмикронных аэрозолей, создаваемых импульсным способом.

8 Показана динамика изменения функции распределения частиц по размерам различных аэрозольных сред, создаваемых импульсным способом, в процессе их образования и установлена зависимость трансформации спектра размеров частиц от физических параметров распыляемого вещества.

9 Предложена схема портативного мобильного измерительного комплекса для проведения экспресс-анализа дисперсности и концентрации аэрозолей, присутствующих в производственных помещениях, локальных зонах атмосферы.

ры и использования в технологических процессах для измерения и контроля параметров многофазных сред.

Эффективность и инновационная направленность разработанного метода ТВСМ и измерительного комплекса, реализующего его, выражается в том, что по совокупному показателю качества (точность, быстродействие, информативность, себестоимость) он не имеет аналогов.

**Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях.**

#### **Статьи в журналах, рекомендованных ВАК**

1 Титов, С.С. Метод определения дисперсности субмикронных аэрозолей по их спектральной прозрачности / С.С. Титов, А.А. Павленко, О.Б. Кудряшова, Е.В. Максименко // Ползуновский вестник. – 2009. – № 3. – С. 262 – 266.

2 Титов, С.С. Экспериментальное моделирование взрывного диспергирования жидкости и порошков / С.С. Титов, Е.В. Муравлёв, Б.И. Ворожцов, А.А. Павленко, О.Б. Кудряшова, И.Р. Ахмадеев // Известия вузов. Физика. – 2008. – № 8/2. – С. 113 – 119.

#### **Публикации в других научных изданиях**

1 Титов, С.С. Генезис высокодисперсного аэрозоля: влияние слабоиспаряемой примеси на дисперсные характеристики / С.С. Титов, Б.И. Ворожцов, И.Р. Ахмадеев, О.Б. Кудряшова, Е.В. Муравлёв, А.В. Диденко, А.А. Павленко, А.Н. Ишматов // Динамика сплошной среды. Акустика неоднородных сред. – 2010. – Вып. 126. – С. 73 – 76.

2 Титов, С.С. Использование камеры скоростной видеосъёмки Видео-спринт /С/G4 в исследованиях динамических процессов / С.С. Титов, Е.В. Муравлёв // Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов: докл. Всероссийской конф., Бийск, Россия, 25 сент. – 26 сент. 2008. – Бийск, 2008. – С. 173 – 179.

3 Титов, С.С. Модернизация программного обеспечения камеры скоростной видеосъёмки с целью автоматизации процесса измерения // Информационные технологии в науке, экономике и образовании: докл. Всероссийской конф., Бийск, Россия, 16 апр. – 17 апр. 2009. – Бийск, 2009. – С. 103 – 106.

4 Титов, С.С. К вопросу решения обратной задачи оптики аэрозоля в реализации метода спектральной прозрачности // Инновационные технологии: производство, экономика, образование: докл. Всероссийской конф., Бийск, Россия, 24 сент. – 26 сент. 2009. – Бийск, 2009. – С. 261 – 267.

5 Титов, С.С. Оптический метод определения дисперсности субмикронных аэрозолей / С.С. Титов, А.А. Павленко, О.Б. Кудряшова, В.А. Архипов // Методы исследования состава и структуры функциональных материалов: докл. Всероссийской конф., Новосибирск, Россия, 11 окт. – 16 окт. 2009. – Новосибирск, 2009. – С. 332.

6 Титов, С.С. Оптическая диагностика дисперсности капель при импульсном распыливании жидкостей // Современная баллистика и смежные вопросы механики: докл. Всероссийской конф., Томск, Россия, 17 нояб. – 19 нояб. 2009. – Томск, 2009. – С. 163 – 164.

7 Titov, S.S. Physicomathematical modeling of explosion dispersion of liquid and powders / S.S. Titov, B.I. Vorozhtsov, O.B. Kudryashova, I.R. Akhmadeev, A.A. Pavlenko, E.V. Muravlev // High Energy Materials: Demilitarization, Antiterrorism and Civil Application: Proceeding of the International Conference, Biarritz, France, 5 Oct. – 7 Oct. 2009. – Biarritz, 2009. – НЕМ004.

8 Титов, С.С. Информационные технологии в оптической диагностике двухфазных сред // Информационные технологии в экономике, науке и образовании: докл. Всероссийской конф., Бийск, Россия, 1 сент. – 5 сент. 2010. – Бийск, 2010. – С. 128 – 135.

9 Titov, S.S. Physicomathematical Model the Influence of Coal Mine Dustiness on Optical Radiation Passage / S.S. Titov, O.B. Kudryashova, A.A. Pavlenko, E.V. Baryshnikova // High Energy Materials: Demilitarization, Antiterrorism and Civil Application: Abstracts of V International Workshop, Biysk, Russia, 8 Sept. – 10 Sept. 2010. – Biysk, 2010. – P. 143 – 145.

10 Титов, С.С. Численное исследование применимости математической модели метода спектральной прозрачности для решения обратной задачи светорассеяния / С.С. Титов, А.А. Павленко, В.А. Архипов, С.С. Бондарчук, О.Б. Кудряшова // Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов: докл. Всероссийской конф., Бийск, Россия, 23 сент. – 24 сент. 2010. – Бийск, 2010. – С. 180 – 186.

11 Титов, С.С. Использование математической модели метода спектральной прозрачности для оценки устойчивости решения обратной задачи светорассеяния / С.С. Титов, А.А. Павленко, С.С. Бондарчук, О.Б. Кудряшова // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: докл. Всероссийской конф., Бийск, Россия, 6 окт. – 7 окт. 2010. – Бийск, 2010. – С. 77 – 80.

12 Титов, С.С. Применение метода малоуглового рассеяния для исследования высококонцентрированных жидкокапельных аэрозолей / С.С. Титов, А.Н. Ишматов, И.Р. Ахмадеев, Б.И. Ворожцов // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: докл. Всероссийской конф., Бийск, Россия, 6 окт. – 7 окт. 2010. – Бийск, 2010. – С. 136 – 140.

13 Титов, С.С. Математическая модель влияния физических процессов в угольной пыли и влажности воздуха на ослабление оптического излучения / С.С. Титов, А.А. Павленко, О.Б. Кудряшова, Е.В. Барышникова // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред: докл. Всероссийской конф., Томск, Россия, 16 окт. – 18 окт. 2010. – Томск, 2010. – С. 136 – 142.

14 Титов, С.С. Оптическая диагностика потоков субмикронного аэрозоля / С.С. Титов, А.А. Павленко, В.А. Архипов, С.С. Бондарчук, О.Б. Кудряшова, А.Н. Ишматов // Аэрозоли Сибири. XVII Рабочая группа: тезисы докл., Томск, Россия, 23 нояб. – 26 нояб. 2010. – Томск, 2010. – С. 84.

15 Титов, С.С. Эволюция дисперсий в факеле распыла взрывного распылителя / С.С. Титов, Б.И. Ворожцов, О.Б. Кудряшова, А.Н. Ишматов // Аэрозоли Сибири. XVII Рабочая группа: тезисы докл., Томск, Россия, 23 нояб. – 26 нояб. 2010. – Томск, 2010. – С. 29.

16 Титов, С.С. Определение распределения частиц субмикронных аэрозолей по размерам методом спектральной прозрачности / С.С. Титов, А.А. Павленко, В.А. Архипов, О.Б. Кудряшова, С.С. Бондарчук // Оптические методы исследования потоков: XI Межд. науч.-технич. конференция [Электронный ресурс]: труды конференции. – Электрон. дан. – М.: МЭИ (ТУ), 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Доклад №130, 7 с. – ISBN 978-5-9902974-1-8 – № гос. регистрации 0321101669.

17 Титов, С.С. Определение дисперсных параметров частиц сажи при горении конденсированных систем / С.С. Титов, В.А. Архипов, С.С. Бондарчук, А.А. Павленко // XVII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»: сборник трудов [Электронный ресурс]. Электрон. текстовые, граф. данные. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Доклад № С28, 4 с. – ISBN 978-5-94458-118-1.

18 Титов, С.С. Оптический дистанционный метод и экспериментальные исследования дисперсных параметров субмикронных аэрозольных сред / С.С. Титов, А.А. Павленко, Б.И. Ворожцов, В.А. Архипов, С.С. Бондарчук, О.Б. Кудряшова // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: докл. Всероссийской конф., Томск, Россия 12 апр. – 14 апр. 2011. – Томск, 2011. – С. 376 – 377.

19 Титов, С.С. Алгоритм реализации метода спектральной прозрачности диагностики аэрозольных сред / С.С. Титов, В.А. Архипов, А.А. Павленко // XVII Международная научно-практическая конференция студентов и молодых учёных «Современные техника и технологии»: сборник трудов [Электронный ресурс]. Электрон. текстовые, граф. данные. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Доклад, 2 с. – ISBN 0-7803-8226-9.

20 Титов, С.С. Высокоселективный оптический интегральный метод определения дисперсности / С.С. Титов, А.А. Павленко // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: докл. Всероссийской конф., Бийск, Россия, 15 сент. 2011. – Бийск, 2011. – С. 158 – 160.

21 Титов, С.С. Оптические методы дистанционной диагностики аэрозольных сред в широком диапазоне размеров частиц / С.С. Титов, А.А. Павленко, О.Б. Кудряшова, Б.И. Ворожцов, И.Р. Ахмадеев, Е.В. Максименко, В.А. Архипов, С.С. Бондарчук // Химия, технология и применение высокоэнергетических соединений: докл. Всероссийской конф., Бийск, Россия, 13 сент. – 16 сент. 2011. – Бийск, 2011. – С. 151 – 152.

22 Титов, С.С. Программная реализация алгоритма восстановления размеров частиц из данных об ослаблении оптического излучения аэрозольной средой // Информационные технологии в экономике, науке и образовании: докл. Всероссийской конф., Бийск, Россия, 22 сент. – 23 сент. 2011. – Бийск, 2011. – С. 87 – 91.

Тираж 120 экз.

Подписано в печать 31.10.2011 г. Печать – ризография. Заказ № 2011-142

Отпечатано в типографии ОАО «ФНПЦ «Алтай»

659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1