Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН)

На правах рукописи

ЖИРНОВ АНАТОЛИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС РАСЧЁТА ДИСПЕРСНОСТИ ЧАСТИЦ В МЕТОДАХ КОНТРОЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ СРЕД

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,

веществ, материалов и изделий

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель –

доктор физико-математических наук,

доцент О.Б. Кудряшова

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ
1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ
1.1 Современные методы анализа дисперсных систем
1.2 Современные средства диагностики параметров дисперсных сред на основе
оптических методов
1.2.1 Параметры дисперсных сред
1.2.2 Лазерный измеритель дисперсности (ЛИД-2М) 40
1.2.3 Турбидиметрический измеритель параметров аэрозольных сред (ТИПАС-1)
разработки программного обеспечения
1.4 Выбор инструмента разработки 49
2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНАЯ
РЕАЛИЗАЦИЯ
2.1 Описание проблемы
2.2 Автоматизированный алгоритм обработки модулированного сигнала 58
2.3 Автоматизированный алгоритм обработки файлов спектрометра 60
2.4 Замена аналитической функции дискретной и оптимизация методов 63
2.5 Объединение обработки результатов оптических методов дискретной
функцией 67
2.6 Выбор модельных сред и расчёт фактора эффективности ослабления 73
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ
3.1 Характеристики измерительного комплекса и границы применимости 80
3.2 Аналитическая и дискретная функции распределения частиц по размерам в
методе малоуглового рассеяния 86

3.3 Аналитическая и дискретная функции распределения частиц по размерам в
турбидиметрическом высокоселективном методе
3.4 Дискретная функция распределения частиц по размерам при одновременном
использовании 2-х оптических методов
4 АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ 97
4.1 Оценка погрешностей разработанного подхода 97
4.2 Методика проведения измерений и расчётов 101
4.2.1 Основные положения 101
4.2.2 Совместная обработка результатов эксперимента 102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
Список сокращений и условных обозначений 108
Список терминов
Список литературы 112
Приложение А (справочное) Программный код расчёта фактора эффективности
ослабления
Приложение Б (справочное) Свидетельство о государственной регистрации
программы для ЭВМ № 2016661974 (копия) 126
Приложение В (справочное) Свидетельство о государственной регистрации
программы для ЭВМ № 2016615899 (копия) 127
Приложение Г (справочное) Анализ аэрозоля TiO_2 на Spraytec компании «Malvern
Instruments»
Приложение Д (справочное) Анализа аэрозоля Al_2O_3 на Spraytec компании
«Malvern Instruments»
Приложение Е (справочное) Таблица Е.1 – Параметры распределения,
полученные с использованием функции гамма-распределения частиц по размерам
для <i>TiO</i> ₂ на установке ЛИД-2М130
Приложение Ж (справочное) Таблица Ж.1 – Параметры распределения,
полученные с использованием параметрической функции распределения для <i>TiO</i> ₂
на установке ЛИД-2М

Приложение И (справочное) Таблица И.1 – Параметры распределения, полученные с использованием функции гамма-распределения частиц по размерам Приложение К (справочное) Таблица К.1 – Параметры распределения, полученные с использованием параметрической функции распределения для Приложение Л (справочное) Таблица Л.1 – Параметры распределения, полученные с использованием функции гамма-распределения частиц по размерам Приложение М (справочное) Таблица М.1 – Параметры распределения, полученные с использованием 60-ти параметрической функции распределения Приложение Н (справочное) Таблица Н.1 – Параметры распределения, полученные с использованием функции гамма-распределения частиц по размерам Приложение П (справочное) Таблица П.1 – Параметры распределения, полученные с использованием 60-ти параметрической функции распределения Приложение Р (справочное) Таблица Р.1 – Распределение диапазонов по параметрам распределения......146 Приложение С (справочное) Таблица С.1 – Результаты расчёта программой с использованием многопараметрической функцией распределения в широком диапазоне размеров частиц *Al*₂*O*₃ 148 Приложение Т (справочное) Таблица Т.1 – Результаты расчёта программой с использованием многопараметрической функцией распределения в широком Приложение У (справочное) Акт использования результатов работы в БТИ Приложение Ф (справочное) Акт использования результатов работы в ИПХЭТ СО

введение

Актуальность темы исследования. С развитием технологического прогресса происходит усовершенствование технологий производства. Появление новых веществ требует контроля, как при их производстве, так и при воздействии на окружающую среду, человека [1] и т.п. Особый интерес для исследования представляют собой дисперсные системы. Размеры частиц вещества в таких системах могут быть различны, от нескольких нанометров до сотен микрометров. К числу источников аэрозолей можно отнести: теплоэлектроцентраль, автотранспорт, промышленное производство и т.д.

Дисперсные системы обладают многими необычными физическими свойствами, которые требуют отдельного изучения и имеют большое значение на практике. Особенности газодинамики дисперсных систем обусловлены различным движением среды-носителя и частиц дисперсной фазы; необычные оптические свойства вызваны сравнимостью размеров частиц с длинами волн света и влиянием формы частиц; повышенная способность к взаимодействиям вызвана чрезвычайно развитой поверхностью частиц. Особое место среди дисперсных систем занимают аэрозоли [2, 3].

В настоящее время аэрозоли широко используются в технологических процессах пищевой промышленности, медицине, служат для борьбы с сельскохозяйственными вредителями, являются необходимым элементом в физических установках и промышленных процессах, в нанотехнологиях, используются для изготовления материалов необходимыми (заданными) или уникальными свойствами.

Изучение процесса образования и распространения аэрозолей можно использовать в различных сферах жизнедеятельности человека, таких как: медицина, пожаротушение, экологический мониторинг [4], контроль производства, адекватная оценка обстановки в случае нештатных ситуаций на производстве. Необходимы методы и приборы, позволяющие осуществлять контроль дисперсных характеристик и концентрации аэрозолей в быстроменяющейся обстановке. Реализация таких методов на практике, как правило, связана с необходимостью проведения больших объемов вычислений; усовершенствование расчетных программ остается актуальной задачей в развитии методов измерений дисперсных систем.

Повышение информативности об исследуемом аэрозоле, связанное с расширением диапазона размеров частиц аэрозоля и поиском решения в виде многопараметрической функции, является актуальной задачей в методах контроля аэрозолей.

Степень разработанности задачи. Бесконтактные оптические методы контроля аэрозолей являются перспективным направлением в исследовании дисперсных сред в тех случаях, когда необходимо исключить возмущения, вносимые в исследуемую среду. В настоящее время для контроля дисперсных сред и концентрации аэрозолей разработан ряд оптических методов. Каждый из них применим для определения параметров аэрозолей в заданном диапазоне размеров частиц. Оптические методы исследования аэрозолей основаны на теории Ми [5, 6].

В данной работе рассматриваются два основных оптических метода для исследования физических свойств аэрозолей, каждый из которых имеет пределы измерения по размерам частиц: метод малоуглового рассеяния (модификация метода реализована в виде измерительной установки) и метод спектральной прозрачности (модификация метода реализована в виде измерительной установки). Первый метод позволяет контролировать дисперсные характеристики аэрозоля с размерами частиц 1-100 мкм, второй – в диапазоне 30-6000 нм.

Модификация рассматриваемых оптических методов контроля связана с особенностями математической обработкой результатов измерений. Обычно для описания дисперсности аэрозоля используется аналитическая функция распределения [7] частиц по размерам – гамма распределение, имеющая два параметра. В более общем случае функция распределения частиц по размерам имеет произвольный вид с заданным конечным числом параметров *N*. Объем

6

вычислений возрастает в геометрической прогрессии с ростом числа искомых параметров функции распределения, что является проблемой реализации оптических методов измерений. В связи с этим необходимо использовать технологии параллельных вычислений [8].

Объект исследования.

Оптические методы контроля аэрозолей.

Предмет исследования.

Параллельные алгоритмы, автоматизация и оптимизация в оптических методах контроля аэрозолей.

Цели и задачи. Целью данной работы является совершенствование оптических методов контроля дисперсных характеристик аэрозоля за счет повышения информативности результатов при обработке экспериментальных данных, полученных различными методами, в широком диапазоне размеров частиц.

Для выполнения поставленной цели требуется решить следующие основные задачи:

- 1. анализ известных оптических методов контроля дисперсных характеристик аэрозолей и выбор перспективных;
- разработка алгоритмов обработки информации для выбранных оптических методов;
- разработка параллельных алгоритмов для ускорения обработки экспериментальных данных;
- разработка алгоритма представления функции распределения частиц по размерам в виде многопараметрической функции (для повышения точности полученных результатов);
- 5. разработка алгоритма совместной обработки результатов эксперимента, полученных выбранными оптическими методами;
- реализация разработанных алгоритмов в виде программного комплекса, обеспечивающего обработку экспериментальной информации выбранными оптическими методами.

Научная новизна. Разработка нового подхода к совместной обработке исходных данных, полученных с применением двух оптических методов по определению параметров частиц аэрозоля, позволяющей увеличить контролируемый диапазон размеров частиц и скорости обработки результатов, в частности:

- предложен новый подход к решению обратной задачи оптики аэрозолей с получением результата в виде многопараметрической функции частиц по размерам, взаимосвязано учитывающий данные о рассеянии аэрозолем излучения на малых углах и ослабления на разных длинах волн;
- разработан универсальный алгоритм сращивания функций распределения частиц по размерам, полученных с помощью различных оптических методов, при наличии общего диапазона размеров измеряемых частиц;
- разработаны новые методы математической обработки результатов оптических измерений, в частности, в плане оптимизации и параллельных алгоритмов;
- предложен новый подход прямого поиска решения в задачах оптики аэрозолей с сохранением параметров функций распределения в оперативнозапоминающее устройство (ОЗУ) компьютера, что позволяет резко (до десятков тысяч раз) ускорить обработку исходных данных;

Практическая значимость работы. Практическая значимость работы заключается в разработке комплекса программ, который будет являться одним из этапов в создании измерительных комплексов и в частности:

- создание комплекса программ для полной автоматизации расчётов при использовании установок контроля по методу малоуглового рассеяния и методу спектральной прозрачности с большим временным разрешением (50 Гц);
- возможность изучения испарения, коагуляции и осаждения аэрозолей и суспензий в быстроменяющейся обстановке в лабораторной практике (соответственно частоте регистрации данных);

- получение решения для распределения частиц по размерам в виде многопараметрической функции для реального представления состояния дисперсной среды;
- предложен новый подход прямого поиска функции распределения с сохранением исходных данных и расчётных параметров распределения в оперативно-запоминающее устройство (ОЗУ) компьютера;
- совместная обработка исходных данных, полученных выбранными оптическими методами по определению размеров частиц аэрозоля, позволяющая расширить диапазон контролируемых частиц и повысить информативность измерений исследуемых дисперсных сред;
- применение разработанного программного обеспечения в лабораторных исследованиях, возможность применения в составе промышленных приборов.

Методология работы и методы исследований.

Оптические методы контроля дисперсных сред.

Математические методы программирования и тестирование программного кода.

Статистические методы для подтверждения адекватности разработанных математических методов.

Сравнение результатов эксперимента, полученных разными методами.

Численный эксперимент.

Положения, выносимые на защиту.

- 1. новый подход и алгоритм совместной обработки результатов измерений, полученных с помощью оптических методов;
- метод поиска функции распределения частиц по размерам в виде произвольной многопараметрической функции;
- методика обработки исходных данных, полученных с использованием двух установок, реализующих выбранные оптические методы контроля дисперсных характеристик аэрозолей;

4. параллельные алгоритмы и методы оптимизации алгоритмов в оптических методах контроля дисперсных сред.

Степень достоверности и апробация результатов. Проведены эксперименты на двух модельных средах, которые сравнивались с другим наиболее близким средством измерения (оптический анализатор частиц Spraytec компании «Malvern Instruments») и проверялись методами математической статистики.

Апробация работы: основные положения диссертационной работы апробированы на 10-ти научно-технических конференциях, в том числе на 2-х международных конференциях с публикациями материалов.

Материалы работы обсуждались на 2-х международных конференциях: International Conference on Atmospheric Dust - Dust 2014, с 1 по 6 июня 2014 г., Италия, Castellaneta Marina; V Международная молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» 25-27 ноября 2015 г., г. Томск; и 8 всероссийских конференциях: III Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых И специалистов «Материалы и технологии XXI века» 18-20 сентября 2013 г., г. Бийск; Всероссийская конференция «Информационные технологии в науке, экономике и образовании» 18 декабря 2013 г., г. Бийск – г. Кизляр; XXI Рабочая группа «Аэрозоли Сибири» 25-28 ноября 2014 г., г. Томск, ИОА СО РАН; V Всероссийская научно-техническая конференция молодых учёных «Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов» 11-12 сентября 2014 г., г. Бийск; Молодежная конкурс-конференция «Фотоника и оптические технологии 2014» 14-16 апреля 2014 г., г. Новосибирск; XXII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири» 24-27 ноября 2015 г., г. Томск; VI Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых «Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов» 15-16 сентября 2016 г., г. Бийск; V Всероссийская научная молодежная школаконференция «Химия под знаком сигма: исследования, инновации, технологии» 15-20 мая 2016 г., г. Омск.

Опубликовано 6 статей в рекомендованных ВАК журналах.

Личный вклад. Автором лично получены все основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, осуществлена обработка исходных данных и интерпретация полученных данных. Разработан программный код для параллельной обработки теоретических расчётов. Реализованы алгоритмы в виде программ, автоматизирующие обработку исходной информации, алгоритмы получения решения для распределения частиц по размерам в виде многопараметрической функции, алгоритмы совместной обработки исходных данных, полученных с помощью двух оптических методов.

Структура и объем работы. Работа состоит из содержания, введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка терминов, списка использованной литературы, включающего 102 источника и 18 приложений. Работа содержит 155 страницы текста, 34 рисунка, 26 таблиц.

В первой главе охарактеризованы преимущества и недостатки контактных и бесконтактных методов анализа дисперсных систем. Охарактеризованы оптические методы анализа и контроля, основанные на эффектах взаимодействия вещества с электромагнитным излучением. Описаны основные параметры дисперсных сред, рассматриваются современные методы контроля дисперсных систем, а также приборы на их основе. Выбраны и охарактеризованы оптические методы и установки для контроля быстро-эволюционирующих аэрозолей, созданных: ударно-волновым методом [9] с применением высокоэнергетических материалов, пневматическим методом распыления, ультразвуковым методом [10]. Описаны типы, технологии параллельных вычислений. В рамках специфики задачи выбрана технология параллельных вычислений для ускорения процесса расчёта.

Вторая глава посвящена описанию двух основных оптических методов контроля аэрозольных сред, процессу автоматизации обработки исходных данных в МММУ (модифицированный метод малоуглового рассеяния) и ТВСМ (турбидиметрический высокоселективный метод). Разработан и реализован алгоритм обработки исходных данных с помощью многопараметрической

функции распределения, а также алгоритм совместной обработки исходных данных. Предложены модельные среды для проведения экспериментальных исследований с целью проверки разработанных алгоритмов и программ на основании математических расчётов с учетом комплексного показателя преломления.

В третьей главе экспериментально установлены диапазоны оптической толщины для МММУ и ТВСМ, в которых возможна совместная и раздельная обработка результатов измерений, а также диапазон длин волн, который следует использовать в ТВСМ. Проведены эксперименты на модельных средах в установках ЛИД-2М и ТИПАС-1, решение обратной задачи было получено в виде функции гамма-распределения и в виде многопараметрической функции. Проведены модельные эксперименты на оптическом анализаторе Spraytec компании «Malvern Instruments», результаты которого сравнивались с 70-ти параметрической функцией, полученной в результате совместной обработки исходных данных.

В четвертой главе приводится попарный анализ D_{32} , полученный с помощью функции гамма-распределения и многопараметрической функции для аэрозоля Al_2O_3 и TiO_2 в каждый момент времени. Оценивается соответствие вида функции распределения, D_{32} между анализатором частиц Spraytec компании «Malvern Instruments» и разработанным методом совместной обработки. Оценка соответствия вида распределения производится при помощи разработанного коэффициента корреляции, путём сравнения абсолютной разности площадей в каждом диапазоне гистограммы.

Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность своему научному руководителю, д.ф.–м.н. Кудряшовой Ольге Борисовне и консультантам д.ф.–м.н. Павленко Анатолию Александровичу, к.т.н. Титову Сергею Сергеевичу, к.т.н. Ахмадееву Игорю Радиковичу за помощь в разработке новых алгоритмов, рекомендованную литературу и ценные замечания при обсуждении результатов экспериментов, а также коллективу лаборатории физики

преобразования энергии высокоэнергетических материалов ИПХЭТ СО РАН за помощь в проведении экспериментов. Автор благодарит профессора Томского государственного университета д.ф.–м.н. Бондарчука Сергея Сергеевича за консультации по экспериментальным и теоретическим расчётам, а также за предложенные им специфичные алгоритмы оптимизации методов.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1 Современные методы анализа дисперсных систем

Дисперсные системы – системы, представляющие собой механическую смесь частиц дисперсной фазы со средой-носителем, – являются широко распространённым объектом в природе и повседневной деятельности человека. облаков и выпадение осадков, Образование формирование аэрозольной компоненты земной атмосферы, миграция дефектов в твёрдых телах, двухфазные течения в физических и промышленных установках, перенос в атмосфере различного рода промышленных и радиоактивных загрязнений – вот далеко не полный круг явлений, в которых решающую роль играют процессы, происходящие с дисперсными системами.

Обычно дисперсные системы подразделяют, исходя из агрегатного состояния частиц дисперсной фазы и среды-носителя. Ряд дисперсных систем получил отдельные названия: аэрозоли (взвесь твёрдых или жидких частиц в газовой среде, обычно в воздухе); эмульсии (жидкие частицы, обычно стабилизированные защитными оболочками, в жидкой среде); коллоидные системы (дискретные частицы, капли или пузырьки дисперсной фазы, имеющие размер хотя бы в одном из измерений от 1 нм до 100 нм); астрозоли (твердые или жидкие частицы в вакууме); суспензии (дисперсные системы, состоящие из частиц твёрдого вещества, распределённых в жидкой дисперсионной среде).

По степени дисперсности обычно выделяют следующие классы дисперсных систем: грубодисперсные системы – системы, размер частиц дисперсной фазы в которых превышает 1 мкм; ультрадисперсные системы – размер частиц менее 1мкм (их называют также высокодисперсными).

Практически все свойства частиц дисперсной системы определяются их размером. Поэтому методы измерения размеров частиц имеют большое значение для разных отраслей современной техники и технологии, а также при оценке влияния конкретных систем на экологию окружающей среды. Процедура экспериментального определения размеров частиц называется дисперсным анализом. Дисперсный анализ является обязательным методом контроля всех производственных операций, связанных с измельчением материалов и использованием порошкообразных продуктов.

В зависимости от размеров частиц, их формы, фазового состояния, концентрации и других характеристик в настоящее время используется целый ряд методов анализа дисперсного состава аэрозолей. Все эти методы можно разделить на следующие группы [11]:

- измерение размеров индивидуальных частиц (микроскопический и ультрамикроскопический анализ);
- механическое разделение частиц (фильтрационный и ситовой анализ);
- методы седиментации (седиментометрия), дробное пофракционное оседание, отмучивание, накопление осадка, отбор весовых проб, определение седиментационного градиента, измерение плотности столба суспензии;
- динамические методы промывание, продувание;
- косвенные методы, основанные на измерении зависящих от размера частиц оптических, электрических и других характеристик аэрозольных систем (фотометрия, кондуктометрия и т.д.)

Метод микроскопирования основан на визуальном изучении отдельных частиц – их числа, формы, размеров и позволяет анализировать дисперсный состав пыли или порошка. Подсчёт числа частиц и их распределение по фракциям В современных приборах осуществляется при помощи автоматических сканирующих устройств. Общее увеличение микроскопа в видимой области спектра можно изменять от 15 до 1800 крат. Повысить разрешающую способность микроскопа и наблюдать частицы меньших размеров можно применяя свет с меньшей длиной волны излучения. Создание электронного микроскопа позволило значительно расширить область визуального изучения дисперсных систем в диапазоне размеров наиболее мелких частиц. Предельный размер частиц D_{min},

которые ещё могут быть видимы раздельно в оптическом микроскопе 0,12 мкм, а в электронном 0,0006 мкм.

Ситовой анализ дисперсности твёрдых частиц основан на их механическом разделении по крупности. Материал загружается на сито с ячейками известного размера и путём вибрации сита разделяется на две части – остаток и проход. Просеивая материал через набор различных сит, можно разделить пробу на несколько фракций. Размеры частиц этих фракций ограничены размерами отверстий используемых сит. Нижняя граница размеров ячеек сит составляет около 5 мкм.

Методы седиментации основаны на зависимости скорости осаждения частиц под действием силы тяжести от их размера. Устройство для измерения размеров частиц методом седиментации называется седиментометром. В процессе седиментации измеряется зависимость массы осевших частиц от времени, т.е. функция накопления осадка. При сопоставлении результатов находится седиментометрических анализов с результатами, получаемыми другими методами, следует иметь ввиду, что размеры частиц, условно называемых диаметрами, будут совпадать только при частицах строго шарообразной формы.

Методы промывания применяются в технике уже более 100 лет. Вода поступает в первый сосуд по трубке, подключенной к вершине конуса. Расход воды постоянный. Частицы анализируемого измельчённого материала, имеющие скорость оседания меньше скорости потока в верхней, наиболее широкой части сосуда, выносятся из него и поступают в следующие сосуды. Более крупные частицы остаются в первом сосуде. Аналогичный процесс повторяется во втором и третьем сосудах. Процесс сепарации считается законченным тогда, когда в соединительных трубках течёт чистая (прозрачная) вода. После прекращения подачи воды сосуды разъединяют, и их содержимое подвергается весовому, а в случае необходимости – микроскопическому и химическому анализу. Во время анализа очень важно поддерживать постоянный расход промывающей жидкости. Жидкость должна подаваться без вихреобразования в конической части сосудов.

16

Промывающая жидкость не должна химически воздействовать на материал пробы, а её плотность должна быть меньше плотности частиц порошка. Рекомендуется, чтобы температура жидкости была постоянной и близкой к стандартным условиям, т.е. к 20 °C.

Кондуктометрический метод позволяет определять концентрацию и размеры частиц в суспензиях. Метод основан на изменении элекропроводимости электролита в момент прохождения частицы, через капилляр, соединяющий два сосуда, в которых установлены электроды. Каждая частица в суспензии увеличивает сопротивление между электродами в момент её прохождения через капилляр. При этом электрический ток в цепи уменьшается, и с сопротивления нагрузки снимается импульс напряжения, амплитуда которого пропорциональна объёму проходящей частицы. Поступающие от датчика импульсы напора усиливаются и обрабатываются с помощью ЭВМ. Распределение частиц по размерам определяется из анализа амплитуд импульсов. С помощью специальной программы проводится подсчёт числа частиц каждого размера и строится гистограмма распределения, после чего определяется счётная концентрация частиц.

Основными недостатками большинства методов можно назвать: возмущение среды в процессе измерения (нарушение структуры), изменение формы дисперсной частицы, невозможность измерения быстропротекающих процессов [12].

Существует ряд задач, в которых требуется определять параметры сред (в том числе опасных) с высоким временным разрешением (промышленное производство, научные исследования и т.д.). Бесконтактные методы [13, 14], (оптические) являются наиболее перспективными методами. Как правило, требуют сложную и дорогостоящую аппаратуру, но зачастую являются единственным решением этих задач. Поэтому мы остановимся на оптических методах [15, 16].

Оптические методы измерения относятся к методам, основанным на эффектах взаимодействия вещества с электромагнитным излучением оптического диапазона (шкалы электромагнитных волн от 10 нм до 1 мм).

В результате взаимодействия электромагнитного излучения с веществом [17-21] может измениться:

 – энергия вращения молекулы и колебательная энергия молекулы (спектрометрия комбинационного рассеяния, микроволновая, инфракрасная спектрометрия [22]);

– энергия обобщённых электронов в молекуле (спектрофотомерия, люминисцентный анализ) или локализованных на атоме валентных электронов (атомно-абсорбционная спектрометрия, атомная флюориметрия), внутренних электронов (рентгеновская спектрометрия);

 магнитный и электрический моменты ядер (методы ядерного магнитного резонанса) и электронов (методы электронного парамагнитного резонанса).

Оптический диапазон шкалы электромагнитных волн подразделяют по эффектам взаимодействий на области, следующим образом:

– дальняя инфракрасная область – 50...1000 мкм;

- средняя инфракрасная область 2,5...50 мкм;
- ближняя инфракрасная область 0,75...2,5 мкм;

видимая область – 400...750 нм;

- ультрафиолетовая область - 200...400 нм;

– дальняя ультрафиолетовая область – 10...200 нм.

Метод малых углов (ММУ) [23, 24]. Этот метод, основанный на исследовании ореола вокруг направления на источник.

Для прозрачных (m=0) крупных ($\alpha > 30$) частиц фактор эффективности рассеяния, который при этом является и фактором эффективности ослабления, стремится к постоянному значению $Q_p = Q = 2$, то есть частица рассеивает в два раза больше лучистой энергии, чем попадает на ее поперечное сечение. Значения

 Q_p (и соответственно Q) могут превышать единицу. Это означает, что частица рассеивает большую мощность, чем мощность падающего на ее геометрическое сечение излучения. Например, для капель водного аэрозоля (n = 1.33) при $\alpha = 6.5$ ($D \cong 2\lambda$) достигается максимальное значение $Q_p = Q = 3.48$. Физическая причина этого парадокса заключается в том, что облучаемая частица вызывает возмущение электромагнитного поля падающего излучения на расстоянии большем, чем ее геометрический размер. Наличие поглощения сглаживает осцилляции функции $Q(\alpha, m)$, но и для поглощающих частиц $Q(\alpha, m) \rightarrow 2$ с увеличением α . Половина рассеянного излучения приходится на дифрагированную составляющую, которая не зависит от материала частицы и рассеивается в направлении распространения зондирующего излучения в угловом конусе тем меньшем, чем больше размер частицы. Индикатриса в области малых углов рассеяния в этом случае может быть представлена в виде

$$J(\theta, \alpha) = \frac{Y_1^2(\theta, \alpha)}{\pi \theta^2}, \qquad (1)$$

где $Y_1(x)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка.

Основное уравнение метода малых углов имеет вид

$$\overline{J}(\theta) = \int_{0}^{\infty} J(\theta, \alpha) f(D) dD$$
⁽²⁾

где $\overline{J}(\theta)$ – полидисперсная индикатриса;

 $J(\theta, \alpha)$ – индикатриса рассеяния для одиночной частицы.

В работах К.С. Шифрина получено строгое обращение этого уравнения:

$$f(\alpha) = -\frac{2}{\alpha^2} \int_0^\infty P(\theta \alpha) \varphi(\theta) d\theta, \qquad (3)$$

где $\phi(\theta) = \frac{d}{d\theta} \left[\pi \overline{J}(\theta) \frac{(2\pi/\lambda)^3}{I_0} \right];$

 $P(x) = xY_1(x)Y_2(x).$

 $Y_2(x) - функция Бесселя второго рода первого порядка.$

Техническая реализация метода малых углов возможна двумя способами. С помощью конденсора формируется параллельный пучок, по всей длине которого происходит светорассеяние на частицах. Измерения проводятся в фокальной плоскости приемной линзы. В первом случае на оси системы в фокальной плоскости линзы устанавливается диафрагма с переменным диаметром отверстия; угол рассеяния в определяется диаметром отверстия и фокусным расстоянием приемной линзы. Изменяя диаметр отверстия, можно получить малоугловую «интегральную» индикатрису. Во втором случае приемник излучения с малым угловым разрешением перемещается в фокальной плоскости приемной линзы, обеспечивая тем самым измерение малоугловой «дифференциальной» индикатрисы. Пределы применимости метода малых углов по размерам частиц ограничены снизу условием корректности ($\alpha < 1$); для $\lambda = 0.55$ мкм, например, $D_{\min} \sim 2$ мкм. Со стороны больших размеров ограничение определяется техническими возможностями оптико-электронного прибора. Для крупных частиц дифрагированная составляющая индикатрисы направлена вперед в узком конусе ($\theta \sim \alpha^{-1}$) и ее трудно отделить от зондирующего пучка; на практике $D_{\max} \cong 100$ мкм.

К достоинствам метода малых углов относятся его слабая чувствительность к показателю преломления материала частиц, а также сравнительная простота схемы оптико-электронного прибора и возможность динамических измерений.

Данный метод очень требователен к точности определения индикатрисы рассеяния. Это свойственно всем обратным методам оптики аэрозолей: небольшие ошибки измерения начальных данных приводят к некорректному решению задачи восстановления.

Метод полной индикатрисы [23, 24]. Метод позволяет определять меньшие размеры частиц по сравнению с методом малых углов. Это связано с тем, что по мере увеличения частиц информация о спектре стягивается в область

малых углов рассеяния. Для крупных частиц она лежит в области совсем малых углов.

В методе полной индикатрисы используется то же основное уравнение (20), что и в методе малых углов. Полидисперсная индикатриса измеряется, в отличие от метода малых углов, в гораздо большем диапазоне углов рассеяния $\theta = \theta_{min} \div \theta_{max}$. Точное обращение уравнения возможно для случая «мягких» частиц. К.С. Шифриным получено аналитическое решение этой задачи в виде

$$f(D) = \frac{4}{\pi D^2} \left[\sum_{j=1}^N g\left(\frac{x_j}{2}\right) q_1 \left(\alpha \sin \frac{\beta_j}{2}\right) \Delta x_j + C x_N q_2 \left(\alpha \sin \frac{\beta_N}{2}\right) + \frac{B}{x_N} q_3 \left(\alpha \sin \frac{B_N}{2}\right) \right],$$
(4)

где $x_j = 4\alpha_* \sin(\beta_j/2); \ \alpha_* = 2\pi r_*/\lambda; \ r_*$ – масштаб длины;

g(x/2) – экспериментальная индикатриса, определенная в точках интервала (0, x_N), за пределами этого интервала g(x/2) может быть представлена в виде $g(x/2) = C + \frac{B}{r^2}$.

Функции q_1, q_2, q_3 имеют вид

$$q_{1}(y) = (8/y^{3} - 4/y) \sin y + (1 - 8/y^{2}) \cos y + 1/3 + q_{2}(y) = (4/y^{3} - 2/y) \sin y + 4/y^{2} \cos y - 1/3 ;$$
$$q_{3}(y) = (2/y^{3} - 1/y) \sin y - 2/y^{2} \cos y + 1/3 .$$

По оценкам К.С. Шифрина, в случае гамма-распределения частиц по размерам достаточно пяти экспериментальных точек при погрешности измерения 1% для восстановления f(D). Требуемый диапазон углов рассеяния при этом зависит от моды распределения. При $D_0 = 0.2$ мкм необходимо получить экспериментальное значение индикатрисы в диапазоне углов $\theta = 30 \div 130^{\circ}$, для $D_0 = 5$ мкм – $\theta = 1 \div 5^{\circ}$ (для длины волны зондирующего излучения $\lambda = 0.55$ мкм).

Для малых частиц необходимо измерять индикатрису в большом диапазоне углов. Минимальное значение D_0 для $\theta_{max} = 180^{\circ}$ составляет 0.175 мкм ($\lambda = 0.55$ мкм). Для продвижения в область меньших значений D_0 необходимо работать на более коротких длинах волн. При измерениях распределений частиц с большими значениями D_0 информация о распределении лежит в области малых углов рассеяния, тем более узкой, чем больше D_0 . При этом целесообразно использование метода малых углов.

Метод трудно реализовать из-за необходимости измерения в большом диапазоне углов.

Лидарный метод [23, 24]. Использование рассеяния излучения в обратном направлении ($\theta \cong 180^{\circ}$) выделяется в отдельную группу методов, ввиду возможности построения схем дистанционной диагностики аэрозоля. Большой вклад в развитие лидарных методов внесли работы Института оптики атмосферы СО РАН, г. Томск. Принцип действия лидара заключается в следующем. Короткий импульс, длительностью ~10⁻⁸ с, узконаправленного (в телесном угле ~10⁻³ рад) лазерного излучения направляется на исследуемый объект. Приемный телескоп, расположенный рядом с излучателем, собирает рассеянное в обратном направлении излучение на входе приемника излучения. По характеристикам полученного сигнала определяется расстояние *R* до исследуемого объекта.

Соотношение между рассеиваемыми характеристиками аэрозоля и регистрируемым сигналом P(R) определяется лидарным уравнением, которое в предположении однократного рассеяния и малой длительности зондирующего импульса имеет вид

$$P(R) = \frac{E}{R^2} A T_{\lambda}^2(R) \beta_{\pi}(R),$$

где $T_{\lambda}(R) = \exp\left[-\int_{0}^{R} K_{\lambda}(x) dx\right]$ – прозрачность по линии зондирования;

А – аппаратурная константа;

 β_{π} – коэффициент обратного рассеяния, который связан с коэффициентом ослабления K_{λ} с помощью лидарного отношения m_{π} соотношением $\beta_{\pi} = m_{\pi} K_{\lambda}$;

Е – энергия излучения импульса.

Если пренебречь молекулярным рассеянием и поглощением, то коэффициенты β_{π} и K_{λ} в лидарном уравнении полностью определяются характеристиками аэрозоля. Характеристики сигнала определяются двумя независимыми величинами: T_{λ} и β_{π} или m_{π} и профилем K_{λ} , поэтому в общем случае лидарное уравнение не может быть решено. Рассмотрим частные случаи, когда решение возможно:

а) если зондируемая среда достаточно прозрачна (можно принять $T(\lambda) \cong 1$), то можно определить $\beta_{\pi}(R)$.

б) для среды с постоянной микроструктурой или в более общем случае с постоянным лидарным отношением уравнение разрешается относительно m_{π} :

$$m_{\pi} = \frac{2E}{A} \frac{\int\limits_{0}^{R} P(x) x^2 dx}{1 - T_{\lambda}^2(R)}.$$

При m_{π} = const достаточно измерять прозрачность в одной точке. В случае оптически плотных сред интегрирование можно вести до R_k при $T_{\lambda}^2(R_{\kappa}) \ll 1$, тогда

$$\mathbf{m}_{\pi} = \frac{2E}{A} \int_{0}^{R_{e}} P(x) x^{2} dx,$$
$$K_{\lambda}(R) = P(R) R^{2} / 2 \int_{0}^{R_{\kappa}} P(x) x^{2} dx.$$

Таким образом, в приближении лидарного уравнения определение микроструктуры аэрозоля возможно только на основе использования зависимости от λ величин m_{π} , коэффициентов ослабления и коэффициентов обратного рассеяния. Естественно, что при определении параметров микроструктуры по

полученным зависимостям $\beta_{\pi}(\lambda)$, $m_{\pi}(\lambda)$ приходится решать обратную задачу, и все изложенные выше трудности характерны и для лидарных методов диагностики.

Данный метод больше всего подходит для диагностики больших атмосферных слоев, так как при исследовании небольших слоев обратное излучение будет очень мало и его трудно зарегистрировать.

Метод спектральной прозрачности [23, 24] основан на измерении спектрального коэффициента пропускания T_{λ} аэрозольной системы, в некотором диапазоне длин волн зондирующего излучения. Исходным для данного метода является уравнение, выражающее закон Бугера для полидисперсной системы частиц

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp\left[-\frac{\pi C_n l}{4} \int_0^\infty Q(\alpha, m) D^2 f(D) dD\right].$$
 (5)

Для случая, так называемых «мягких» частиц, модуль комплексного показателя преломления которых близок к единице $(|m| \simeq 1)$, в работах К.С. Шифрина получено аналитическое решение

Метод спектральной прозрачности применим в области, где зависимость фактора эффективности ослабления от λ наиболее сильно выражена (в области до первого максимума функции *Q*). Устойчивое решение возможно, если прозрачность (спектральный коэффициент пропускания) определена во всем интервале длин волн $0 < \lambda < \infty$. Тем не менее, если учитывать асимптотику поведения $\tau(\nu\beta)$ (например, при $\nu\beta \rightarrow 0$ взаимодействие излучения со средой

описывается в приближении Рэлея, а при $\nu\beta \rightarrow \infty$ и в приближении геометрической оптики), то требуемый интервал λ можно сузить, руководствуясь соотношениями

$$\lambda_{\min} = \beta D_0 / 2,$$

$$\lambda_{\max} = 5\beta D_0.$$

При этом в интервале $\lambda_{\min} \le \lambda \le \lambda_{\max}$ достаточно произвести порядка 20 – 30 измерений на равноотстоящих значениях λ .

Данный метод требует знание априорной информации о природе аэрозоля, которой является комплексный показатель преломления исследуемого вещества на используемых длинах волн.

Показатель преломления вещества, n – величина, равная отношению фазовых скоростей электромагнитных волн в вакууме – c и в данной среде - v рассчитывается по формуле (7).

$$n = \frac{c}{v} \tag{7}$$

Из этого следует, что показатель преломления в вакууме равен 1, а в остальных средах более единице. Для одного и того же вещества, но на разных длинах волн он разный. Также на показатель преломления влияет температура исследуемого вещества, поэтому в характеристиках, как правило, пишут температуру измерения, например, 20 °C. Для сравнения на рисунке 1, рисунке 2 соответственно представлены графики зависимости показателя преломления от длины волны для двуокиси титана (TiO_2) и оксида алюминия (Al_2O_3) при комнатной температуре.



Рисунок 1 – График зависимости показателя преломления от длины волны излучения для оксида титана (*TiO*₂)



Рисунок 2 – График зависимости показателя преломления от длины волны излучения для оксида алюминия

Несмотря на большое количество оптических методов, следует отметить, что для определения характеристик дисперсных сред (не только концентрации) подойдут турбидиметрия и нефелометрия, как показано в сводной таблице 1.

Таблица 1 — Классификация оптических методов анализа по измеряемым свойствам

Метод	Измеряемое свойство	Что определяет		
Колориметрия, фотометрия, атомно- абсорбционная спектрометрия	Экстинкция (интенсивность поглощения), длина волны	Концентрацию вещества, компоненты химического состава, содержание металлов в растворах их солей Концентрацию вещества по интенсивности флуоресценции, при ничтожном количестве		
Флуориметрия	Интенсивность флуоресценции, длина волны			
Турбидиметрия	Экстинкция	Размеры, концентрацию вещества		
Нефелометрия	Интенсивность рассеянного света	Размеры, форму и концентрацию частиц		
Поляриметрия	Вращения плоскости поляризации поляризованного света оптически активными молекулами	Концентрацию оптически активных веществ, идентификация и строение химических соединений		
Интерферометрия, рефрактометрия	Разность фаз интерферирующих пучков, показатель преломления	Оценку качества оптических поверхностей и проверки оптических систем в целом, идентификация химических соединений, количественный и структурный анализ, физико-химические параметры веществ.		
Эмиссионный спектральный анализ, пламенная фотометрия	Интенсивность излучения, длина волны	Элементный состав вещества		
Инфракрасная спектрометрия	Пропускание света, волновое число	Наличие в молекулах образца тех или иных функциональных групп и других фрагментов		

На основе рефракции были созданы приборы – рефрактометры, которые позволяют измерять показатель преломления света в среде, концентрацию веществ, а также определять состав газов при использовании газовых интерференционных рефрактометров.

Техническая реализация метода связана с использованием перестраиваемых по длине волны лазеров на органических красителях или многоволновых источников, которые позволяют покрыть требуемый диапазон длин.

1.2 Современные средства диагностики параметров дисперсных сред на основе оптических методов

В настоящее время разработано большое количество приборов и установок для контроля дисперсных характеристик. Они базируются на различных принципах взаимодействия зондирующего излучения с дисперсной средой. В таблице 2 приведен список некоторых анализаторов.

В основу работы системы Spraytec компании «Malvern Instruments» положен метод лазерной дифракции, при котором рассеянное аэрозолем (каплями спрея) излучение регистрируется углами с помощью под разными высокочувствительного кремниевого детектора – фотодиодной матрицы. При прохождении струи спрея через луч лазера [25] производится измерение углового распределения света, рассеянного частицами. Снятая таким образом индикатриса наиболее подходящей затем анализируется с использованием рассеяния оптической модели и осуществляется вычисление распределения частиц по размерам. Угловой диапазон, в котором осуществляется регистрация рассеяния [26], оптимизирован в системе Spraytec таким образом, чтобы обеспечить наилучшее разрешение для распределений по размерам полидисперсного типа. Вычисление размера частиц осуществляется с использованием запатентованного алгоритма анализа многократного рассеяния. Это обеспечивает получение корректных результатов даже в случае 98% ослабления светового луча при

прохождении через образец, что находится далеко за рабочими пределами систем, использующих метод традиционной лазерной дифракции.

Лазерный анализатор частиц *90Plus* от *«Brookhaven Instruments»* позволяет проводить измерения размеров частиц методом динамического рассеяния света. Определяет функцию распределения частиц по размера в диапазоне от 1 нм до 6 мкм, а также строит мультимодальное распределение. Анализ занимает не более 1-2 мин.

*Litesizer*TM 500 от компании «Anton-Paar» – это инструмент для определения характеристик нано - и микрочастиц в растворах. Он определяет размер частиц, дзета-потенциала и молекулярной массы путем измерения динамического светорассеяния (ДЛС), электрофоретического рассеяния света (ЭЛС), и статического рассеяния света (СЛС). Серия измерений позволяет увидеть, как размер частиц и дзета-потенциал изменяются со временем, температурой, *pH* или концентрацией. Результаты четко отображаются на одном графике разными цветами, где можно проследить динамику, в то время как все важные значения и параметры логически сведены в таблицу под графиком.

Анализатор размера частиц *LUMiSizer*® - комплексная лаборатория для исследования дисперсий. Данный прибор позволяет быстро характеризовать любое явление (расслаивание или отвердевание), рассчитать скорость распределения при центрифугировании, а также размер частиц. Многоместная аналитическая центрифуга, лежащая в основе анализатора, идеально подходит для характеристики и оптимизации свойств дисперсий. Она позволяет определять взаимодействие между частицами, сжимаемость частиц, образование хлопьев, гелей и т.п. Концентрацию, вязкость, многокомпонентность и размер частиц различных дисперсий теперь легко проанализировать.

Анализаторы *PowderShape* позволяет охарактеризовать частицы размером до 3 см, благодаря тому, что в основе лежит сканирование образцов. Данная технология также позволяет правильно охарактеризовать вытянутые частицы за счет использования статического анализа изображения, что дает возможность, измерит длину протяженной оси, а не ее проекцию как в динамическом анализе.

29

Анализаторы PowderShape применяются для характеристики гранул, металлических порошков, песка, пищевых и фармацевтических порошков, семян, абразивов и т.п.

Анализатор размеров частиц LS13320 вобрал в себя классическую теорию Ми рассеяния света и уникальную технологию регистрации дифференциальной интенсивности поляризованного света (PIDS), разработанную фирмой «Beckman *Coulter»*. Анализатор работает в диапазоне от 17 нм до 2 мм в водных и неводных средах. Для анализа субмикронных частиц используется запатентованный метод дифференциальной интенсивности рассеяния поляризованного света (PIDS). В процессе анализа образец последовательно облучают поляризованным светом на трех длинах волн (450 нм, 600 нм и 900 нм), сначала вертикально, а затем поляризованным лучом. Измеряя горизонтально интенсивность света. рассеянного образцом, с помощью детекторов, расположенных под различными углами, и анализируя разность горизонтального и вертикального излучения на каждой длине волны, получаем информацию о распределении размеров частиц в исследуемом образце. Информация, полученная методом PIDS, поступает в стандартный алгоритм обработки интенсивности рассеяния лазерного луча под разными углами и приводит к получению непрерывного распределения по размерам.

Обладая полным диапазоном измерений 0,01 – 2000 мкм, ANALYSETTE 22 NanoTec plus является универсальным лазерным прибором для эффективного и надежного определения распределения размеров частиц. Инновационная лазерная технология от *FRITSCH* позволяет при этом выбирать 5 отдельных диапазонов измерения. Для проведения измерений с максимальной гибкостью, наилучшим разрешением, превосходной чувствительностью – и отличными результатами вплоть до нанодиапазона.

Модификации лазерных анализаторов размеров частиц *LS* китайской фирмы «*OMEC Technology Co., Ltd»* предназначены для измерения дисперсных параметров (размеров частиц и функций распределения частиц по размерам) суспензий, эмульсий и порошкообразных материалов. Область применения: контроль технологических процессов и качества продукции в химической промышленности, порошковой металлургии; при производстве абразивов, керамики, цемента, глины, мела и других строительных материалов, пигментов, порошковых красок и др. Представление выходных данных результатов измерений предусмотрено в виде таблиц и распределения частиц по размерам в виде интегральных кривых и дифференциальных гистограмм.

Прибор CAMSIZER XT в своей основе использует принцип цифровой динамических изображений проекций обработки анализируемых частиц. Запатентованная система выглядит следующим образом: Диспергированные частицы попадают в анализируемую камеру, подсвеченную двумя яркими источниками LED видимого света. Тени проекций анализируемых частиц захватываются двумя цифровыми камерами. Одна из камер с высокой разрешающей способностью предназначена для определения мелких частиц, вторая камера предназначена для определения крупных частиц с хорошей статистикой и больше площадью обзора. Каждая камера подсвечивается одним из источников света с оптимизированной яркостью длиной излучаемой волны и площадью обзора. Пользователь прибора благодаря наличию дружелюбного интерфейса и адаптированного русскоязычного программного обеспечения анализирует размер и форму каждой конкретной частицы получая на экране монитора распределение пробы в режиме реального времени.

Лазерный анализатор размеров частиц *Nanotrac Wave* компании *«Microtrac»* применяется для определения размеров, формы частиц в водных и органических средах. Измерение распределения частиц в суспензиях, эмульсиях, порошках по размерам в нанометрах и коллоидных диапазонах, проводится без растворения образцов. В таблице 2 сведены обобщающие характеристики некоторых современных приборов для анализа дисперсных систем.

31

Анализатор	Оптический метод / принцип	Измеряемые характеристики	Диапазон	Измерение с высоким временным разрешением	Аэроз оль, суспе нзия
Spraytec от Malvern Instruments	Лазерная дифракция	Функция распределения, SSA, размер, концентрация	0,1- 2000 мкм	+,-	+,+
90Plus ot Brookhaven Instruments	Метод динамического рассеяния света	Функция распределения, размер, дзета- потенциал	1 нм-6 мкм	+,-	-,+
Litesizer™ 500 ot Anton-Paar	Динамическое рассеяние света, электрофоретическое рассеяние света, статическое рассеяние света	Размер, концентрация, дзета-потенциал	0,3 нм- 10 мкм	+,-	-,+
<i>LUMiSizer</i> ® от <i>TupuT</i>	Фотометрия проходящего света	Размер частиц, концентрация, вязкость	10 нм- 1000 мкм	-,-	-,+
Анализатор порошков PowderShape от ТириТ	Статический анализ изображений	Функция распределения, размер частиц	20 мкм-3 см	-,-	-,-
COULTER LS от Beckman Coulter	Лазерная дифракция, дифференциальная интенсивность рассеяния поляризованного света	Функция распределения, размер частиц	17 нм- 2000 мкм	-,-	-,+
ANALYSETTE 22 NanoTec	Статическое лазерное рассеяние, обратное рассеяние	Распределение частиц, размер частиц,	0,01- 2000 мкм	+,-	-,+
OMEC Technology Co., Ltd	Лазерная дифракция	Распределение частиц, размер частиц	0,2-150 мкм	+,-	-,+
CAMSIZER от Retsch Technoloy	Анализ динамических изображений	Форма, размер, число и плотность частиц	1-600 мкм	+,-	+,+
Nanotrac Wave от Microtrac Inc	Динамическое светорассеяния	Распределение частиц, размер, форма, дзета- потенциал	0,8-6500 нм	+,-	-,+
ЛИД-2М Лазерная дифракция		Распределение частиц, размер частиц, концентрация	1-100 мкм	+,+	+,+
ТИПАС-1	Фотометрия проходящего света	Распределение частиц, размер частиц, концентрация	30 нм-6 мкм	+,+	+,+

Таблица 2 – Современные оптические методы и приборы на их основе

Большинство приборов имеют главный недостаток – они предназначены только для лабораторных исследований. Исходя из таблицы 2 и дополнительного обзора для определения требуемых параметров (размера частиц, концентрации, удельной площади поверхности, высоким временным разрешением) дисперсных систем созданных взрывными, ударно-волновыми, пневматическими [10, 11, 27] они будет неприемлемы, вследствие их загрязнения и выдачи некорректных результатов анализа или выхода из строя.

Такого недостатка лишены установки, разработанные в ИПХЭТ СО РАН. Эти установки позволяют определять дисперсные характеристики аэрозольных сред и суспензий в жестких условиях (внелабораторных). Рассмотрим более подробно каждую из них, предварительно охарактеризовав параметры дисперсных систем.

1.2.1 Параметры дисперсных сред

Одной из основных характеристик дисперсной фазы является размер частиц [28, 29]. Монодисперсные системы, которые состоят из частиц одинакового размера, встречаются в природе очень редко, и когда они образуются, то существуют в течение короткого промежутка времени. Например, некоторыми естественными фактически монодисперсными средами являются: высоко расположенные облака, споры ликоподия, споры гриба дождевика. В настоящее время созданы и искусственные монодисперсные среды, например латексные шарики, которые служат для проверки анализаторов дисперсности.

Дисперсные системы, состоящие из частиц различных размеров, называются полидисперсными. Как правило, в природе и в технических устройствах встречаются только полидисперсные системы. Если рассмотреть через лупу или микроскоп опилки, песок или другие порошки, то можно обнаружить частицы разных размеров. При образовании дождевых капель в результате конденсации и коагуляции при столкновении друг с другом, а также при дроблении в воздушном потоке образуется полидисперсная система. Для описания размеров частиц в монодисперсной системе достаточно указать единственное число – размер отдельной частицы (например, диаметр или радиус для сферических частиц). Для полидисперсных систем этого оказывается недостаточно. Описать полидисперсную систему можно, например гистограммой – зависимостью количества частиц n_i в *i*-м интервале, отнесённого к длине этого интервала ΔDi , от размера частиц. На рисунке 3 приведена гистограмма распределения.



Рисунок 3 – Гистограмма распределения

Гистограмма представляет собой совокупность смежных прямоугольников. Площадь каждого прямоугольника равна числу частиц, размеры которых попадают в данный интервал. Общая площадь гистограммы равна общему числу частиц в измеренном образце. Если интервалы размеров частиц ΔD_i становятся очень малыми, то гистограмма будет приближаться к плавной кривой, которая может быть аппроксимирована некоторой функциональной зависимостью. Содержание частиц различных размеров в полидисперсной системе полностью определяется заданием её дифференциальной функции счетного f(D) или массового g(D) распределения [30] описывается соответственно формулами (8), (9).

При этом,

$$df(D) = f(D)dD \tag{8}$$

– доля количества частиц, диаметры которых лежат в диапазоне (*D*,*D*+d*D*);

$$dg(D) = g(D)dD \tag{9}$$

– доля массы (или объема) частиц, диаметры которых лежат в диапазоне (*D*,*D*+d*D*). Дифференциальные функции распределения имеют смысл плотности распределения вероятности, то есть, нормированы на единицу и определяются выражениями (10), (11):

$$\int_{0}^{\infty} f(D)dD = 1$$
(10)

$$\int_{0}^{\infty} g(D)dD = 1$$
(11)

Выражения (10) и (11) означают, что вероятность того, что диаметры или массы частиц лежат в диапазоне $(0, \infty)$, равна единице (или 100%). Если размерность диаметра частиц [D]=мкм, то размерность дифференциальных $[f] = [g] = мкм^{-1}$. Практически функций распределения все природные И искусственно получаемые аэрозоли с унимодальной (одновершинной) функцией могут быть описаны помощью распределения с двух аналитических зависимостей: обобщенного гамма-распределения (ОГР) и логарифмически нормального распределения (ЛНР) [24]. Обобщенное гамма-распределение определяется формулой (12)

$$f(D) = aD^{\alpha} \exp(-bD^{\beta}).$$
(12)

где а – нормирующий множитель;

b, α , β – параметры распределения (*a*>0, α >–1, β >0). При значении параметра β =1 обобщенное гамма–распределение переходит в гамма– распределение (ГР), определяемое формулой 7:

$$f(D) = aD^{\alpha} \exp^{-bD}$$
(13)

Выражение для логарифмически нормального распределения (ЛНР) имеет выражение (14):

$$f(D) = aD^{-1} \exp[-b \cdot \ln^2(\beta D)], \qquad (14)$$

где *a* > 0 – нормирующий множитель;

b, β – параметры распределения.

Нормирующие множители для этих распределений находятся из условия нормировки (4, 5) путем численного интегрирования [31-33]. Наряду с функцией распределения для описания дисперсных сред широко используются осредненные характеристики [30], большинство из которых определяется выражением (15):

$$\boldsymbol{D}mn = \begin{pmatrix} \int_{0}^{\infty} D^{m} f(D) dD \\ \int_{0}^{\infty} D^{n} f(D) dD \\ \int_{0}^{\infty} D^{n} f(D) dD \end{pmatrix}^{\frac{1}{m-n}},$$
(15)

где *m*, *n* – целые числа, означающие порядок момента функции распределения. Наиболее распространенными из них являются следующие средние диаметры:

 D_{10} – среднеарифметический;

 D_{20} – среднеквадратический;

*D*₃₀ – среднекубический (среднеобъемный);

*D*₃₂ – средний объемно-поверхностный;

*D*₄₃ – среднемассовый.
(13)

И

логарифмически нормального распределения (14), получим формулы для нахождения средних размеров частиц (таблица 3).

Таблица 3 –	- Аналитические	выражения	средних	размеров	частиц	через	парамет	тры
распределен	ния							

Параметр	ГР	ЛНР
D_{10}	$\frac{1+\alpha}{b}$	$\frac{\exp^{\frac{1}{4b}}}{\beta}$
D ₃₂	$\frac{3+\alpha}{b}$	$\frac{\exp^{\frac{5}{4b}}}{\beta}$
D ₄₃	$\frac{4+\alpha}{b}$	$\frac{\exp^{\frac{7}{4b}}}{\beta}$

Одной из характеристик дисперсности порошка является его удельная площадь поверхности S_{yo} , определяемая как отношение суммарной поверхности частиц к их массе [30]. Для частиц сферической формы диаметром D величина S_{yo} рассчитывается по формуле (16):

$$S_{y\partial} = \frac{\int\limits_{0}^{\infty} \pi D^2 f(D) dD}{\int\limits_{0}^{\infty} \rho_{yacmuy} \frac{\pi D^3}{6} f(D) dD} = \frac{6}{\rho_{yacmuy}} \frac{\int\limits_{0}^{\infty} D^2 f(D) dD}{\int\limits_{0}^{\infty} D^3 f(D) dD} , \qquad (16)$$

где ρ_{uacmuu} - плотность материала частиц.

В соответствии с выражением для средних размеров (15), получим формулу (17) для определения удельной площади поверхности полидисперсной системы:

$$S_{y\partial} = \frac{6}{\rho_{yacmuy} D_{32}}$$
(17)

Для монодисперсных систем с частицами диаметром *D* удельная площадь поверхности определяется формулой (18):

$$S_{y\partial} = \frac{6}{\rho_{yacmuy}D} \tag{18}$$

Исходя из формулы (17) можно сказать, что с увеличением дисперсности или уменьшением размера частиц возрастает удельная площадь поверхности.

Концентрация дисперсных частиц также является одной из важнейших характеристик, от которой зависит поведение дисперсной системы в различных физико-химических процессах. Различают счетную Cn, объемную C_V и массовую Cm концентрацию частиц:

Сп – количество частиц в единице объема двухфазной среды;

Ст – суммарная масса частиц в единице объема двухфазной среды;

*С*_{*V*} – суммарный объем частиц в единице объема двухфазной среды.

В таблице 4 приведены соотношения между счетной *Cn*, массовой *Cm* и объемной C_V концентрациями частиц ($m_{vacmuq} = V_{vacmuq} \cdot \rho_{vacmuq} - Macca частицы;$

Р_{частиц} – плотность материала частицы).

Вид концентрации	Cn	Ст	Cv
Cn	Cn	$\frac{C_m}{m_{uacmuu}} = \frac{6C_m}{\pi D^3 \rho_{uacmuu}}$	$\frac{6C_V}{\pi D^3}$
Ст	$\frac{C_n \pi D^3 \rho_{_{yacmuy}}}{6}$	Cm	C v $ ho_{_{yacmuy}}$
Cv	$\frac{C_n\pi D^3}{6}$	$rac{C_m}{ ho_{\scriptscriptstyle {vacmuy}}}$	Cv

Таблица 4 – Соотношения между концентрациями для монодисперсных сред

Соотношения между *Сп*, *Ст*, *Сv* можно распространить и на полидисперсные системы, состоящие их частиц разных размеров (таблица 5). Для

таких систем дисперсный состав характеризуется дифференциальной функцией счетного распределения частиц по размерам f(D).

Вид концентрации	Cn	Ст	Cv
Cn	Cn	$\frac{Cm}{\frac{\pi\rho_{uacmuu}}{6}\int\limits_{0}^{\infty}D^{3}f(D)dD}$	$\frac{C_V}{\frac{\pi}{6}\int\limits_0^\infty D^3f(D)dD}$
Ст	$\frac{C_n \pi \rho_{uacmuu}}{6} \int_0^\infty D^3 f(D) dD$	Cm	C v $ ho_{_{\!$
Cv	$\frac{C_n\pi}{6}\int_0^\infty D^3f(D)dD$	$rac{C_m}{ ho_{\scriptscriptstyle 4acmuu}}$	Cv

Таблица 5 – Соотношения между концентрациями для полидисперсных сред

Также в настоящее время выведена формула (19) для определения массовой концентрации полидисперсной системы [34]:

$$C_m = \frac{\tau \cdot \rho_{yacmuy} \cdot D_{32}}{1, 5 \cdot l \cdot Q(D_{32}, \lambda, m(\lambda))},$$
(19)

где т – экспериментально измеренная величина оптической толщины;

 $Q(D_{32},\lambda,m(\lambda))$ – расчетное значение усредненного фактора эффективности ослабления;

l – оптическая длина зондирования;

λ – длина волны зондирующего излучения;

m(λ) – комплексный показатель преломления [35] материала частиц.

1.2.2 Лазерный измеритель дисперсности (ЛИД-2М)

Рассмотрим существующую измерительную установку ЛИД-2М [24], которая позволяет определять параметры аэрозольных сред в диапазоне от 1-100 мкм (рисунок 4). Она основана на модифицированном методе малоуглового рассеяния, где регистрируется малоугловая индикатриса рассеяния.



Рисунок 4 – Принципиальная схема установки ЛИД-2М

Математическая модель метода основана на предположении о равномерности распределения концентрации и размеров частиц в аэрозольном облаке, тогда уравнение для интенсивности рассеянного потока излучения на плоскость Д, примет вид, определяемый формулами (20), (21), (22):

$$I(y_i) = \frac{\pi SC_n}{4} \int_{0}^{z} [I_0(x)B(x,y_i)F(x)]dx, \qquad (20)$$

где
$$F(x) = \int_{0}^{\infty} Q_{paccesnus}(D,\theta(x))D^2f(D)dD;$$
 (21)

$$I_o(x) = I_0 \exp^{-C_n x Q_{ocn}} -$$
интенсивность падающего в (22)

точку х излучения;

x – расстояние от границы «1» рассеивающего слоя до точки *P*;

*Q*_{осл} – фактор эффективности ослабления излучения;

*Q*_{рассеяния} – фактор эффективности рассеяния излучения.

Рассеянное излучение от одной частицы для области малых углов θ в предположении сферичности частиц определяется в виде аналитической зависимости (23):

$$Q_{pacceяния}(\rho,\theta) = \frac{\rho^2}{4\pi} \cdot \left[\frac{2J_1(\theta\rho)}{\theta\rho}\right]^2$$
, где (23)

 $J_1(\theta \rho)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка [36] [37];

 $\rho = \frac{\pi D}{\lambda}$ – параметр Ми;

 θ – угол рассеяния;

D – диаметр частиц;

λ – длина волны зондирующего излучения.

Множитель, учитывающий по закону Бугера ослабление рассеянного излучения, определяется соотношением (24):

$$B(x, y_i) = \exp^{\left[-C_n Q_{ocn} \frac{z - x}{\cos \theta(x, y_i)}\right]}$$
(24)

где *z* – длина оптического пути;

у_і – номер фотодиода;

 l_1 – расстояние от лазера до первой границы слоя рассеяния;

*l*₂ – расстояние от границы рассеяния до фотоприемника; *C_n* – счётная концентрация частиц; *S* – площадь поперечного сечения луча лазера;

$$\theta(x, y_i) = arctg\left(\frac{y_i}{l_2 - x}\right)$$
 – вычисление угла рассеяния.

В качестве базовой функции распределения частиц по размерам принято гамма-распределение, определяемое формулой (25):

$$f(D) = aD^{\alpha}e^{-bD} \tag{25}$$

Определение f(D) по измеренной индикатрисе рассеяния $I_{3\kappa c}(y_i)$ сводится к перебору параметров { α , b} распределения и вычислению функционала (26):

$$\Omega = \min_{\alpha,b} \left\{ \sum_{i=1}^{n} \left| I_{\scriptscriptstyle \mathfrak{s}\kappa cn} \left(y_{i} \right) - I_{\scriptstyle meop} \left(y_{i} \right) \right| \right\},$$
(26)

где $I_{_{3\kappa cn}}(y_i)$ (i = 1, 2, ..., n) – измеренные значения индикатрисы рассеяния для дискретных положений на плоскости;

 $I_{meon}(y_i)$ – рассчитанные значения по формуле (20).

Из всех перебранных теоретических функций распределения, истинной считается та, которой соответствует минимальное значение Ω, т.е. когда экспериментальной индикатрисе рассеяния наиболее точно соответствует теоретически рассчитанная.

1.2.3 Турбидиметрический измеритель параметров аэрозольных сред (ТИПАС-1)

Измерительная установка ТИПАС-1 (рисунок 5) основана на использовании турбидиметрического высокоселективного метода (модификация метода спектральной прозрачности) и позволяет определять дисперсные характеристики от 30 нм до 6000 нм [38]. Основная формула (32) для расчёта по данному методу получена путем преобразования формул (27), (28), (29) МСП [23, 39].



1 – сферическое зеркало; 2 – галогенная лампа; 3 – система линз; 4 – диафрагмы; 5 – светозащитный тубус; 6 – световод; 7 – приёмник излучения; 8 – исследуемая среда

Рисунок 5 – Принципиальная схема установки ТИПАС-1

$$I(\lambda_i) = I_0(\lambda_i) \exp\left[-\frac{\pi C_n l}{4} \int_0^\infty Q\left(\frac{\pi D}{\lambda_i}, m(\lambda_i)\right) D^2 f(D) dD\right]$$
(27)

$$\ln\left(\frac{I_0(\lambda_i)}{I(\lambda_i)}\right) = \frac{\pi C_n l}{4} \int_0^\infty Q\left(\frac{\pi D}{\lambda_i}, m(\lambda_i)\right) D^2 f(D) dD$$
(28)

Для решения задачи восстановления функции распределения частиц по размерам используется экспериментальная информация об оптических плотностях, определяемых выражением (29),

$$\tau_{\lambda_i}^{\scriptscriptstyle SKCN} = \ln \frac{I_0(\lambda_i)}{I(\lambda_i)}$$
(29)

после чего через формулу (30) находятся отношения оптических плотностей для различных длин волн:

$$k_{\lambda_i}^{\mathfrak{s}\kappa cn} = \frac{\tau_{\lambda_i}^{\mathfrak{s}\kappa cn}}{\tau_{\lambda_1}^{\mathfrak{s}\kappa cn}}.$$
(30)

Далее априорно вводится функция распределения частиц по размерам в виде гамма-распределения через выражение (31):

$$f(D) = aD^{\alpha} \exp^{-bD}$$
(31)

На следующем этапе через выражение (32) рассчитываются отношения теоретически полученных оптических плотностей в соответствии с уравнением Фредгольма для различных длин волн:

$$k_{\lambda_{i}}^{meop} = \frac{\tau_{\lambda_{i}}^{meop}}{\tau_{\lambda_{1}}^{meop}} = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} Q\left(\frac{\pi D}{\lambda_{i}}, m(\lambda_{i})\right) D^{2}f(D) dD}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} Q\left(\frac{\pi D}{\lambda_{1}}, m(\lambda_{1})\right) D^{2}f(D) dD},$$
(32)

где фактор эффективности ослабления зондирующего излучения рассчитывается в соответствии с теорией Ми.

На последнем этапе находится суммарное отклонение расчётных данных от экспериментальных для выбранной функции распределения частиц по размерам через формулу (33):

$$\Omega = \min_{\alpha, b} \left\{ \sum_{i=1}^{N} \left| k_{\lambda_i}^{\scriptscriptstyle \mathfrak{IKCN}} - k_{\lambda_i}^{\scriptscriptstyle meop} \right| \right\},\tag{33}$$

после чего выбирается тот вид функции распределения частиц по размерам, для которого функционал Ω имеет наименьшее значение, т.е. когда значения теоретически рассчитанных отношений оптических плотностей максимально приближаются к экспериментально полученным.

Реализация этих оптических методов имеет свои недостатки [40, 41]. В данном случае они следующие:

1. продолжительная обработка результата эксперимента (минуты и часы);

2. возможные ошибки (человеческий фактор) из-за недостаточной автоматизации процесса;

3. недостаточное временное разрешение для исследования генезиса дисперсного потока;

4. два не связанных между собой метода измерений, которые пересекаются в общей области определения параметров (≈1-6 мкм);

5. привязка обработки результатов измерений только к одному виду функции распределения (гамма-распределение), которое является унимодальным (одновершинным): $f(D) = aD^{\alpha}e^{-bD}$ – два параметра: α и b. (при подборе решения в виде гистограммы параметров больше).

Решение п.1 возможно с использование параллельных алгоритмов и технологий параллельного вычисления. Устранить п.2 и 3 позволит разработка новых алгоритмов обработки исходных данных. Для решения недостатков (4, 5) предлагается использовать дискретную функцию распределения частиц по размерам, которая также позволит объединить обработку результатов экспериментов по этим методам на математическом уровне. Реализация представляется в виде программного комплекса.

Регистрация зондирующего излучения в установке ЛИД-2М осуществляется посредством фотоприёмников [42, 43], сигналы с которых поступают на вход

усилителя [44] и далее на АЦП [45] персонального компьютера. Специальная программа управления АЦП формирует файл с данными в бинарном формате. чтобы Для того была возможность исследования дисперсных сред В быстроменяющейся обстановке за приемлемое время требуется разработать алгоритм, который позволит в сформированном АЦП файле автоматически распознавать время регистрации, число каналов АЦП, частоту сбора данных, время снятия фона, начало регистрации сигнала и конец регистрации (уровень сигнала слабо отличается от фона). В результате этого, нужно разработать автоматизированный алгоритм обработки информации с АЦП. В силу того, что теоретические расчёты индикатрис рассеяния (14) занимают много времени, то будет целесообразно их ускорить. Технологический прогресс позволит это осуществить за счёт использования технологий параллельных вычислений.

В качестве исходной информации в установке ТИПАС-1 служит набор файлов спектрометра, каждый из которых содержит информацию о длине волны и интенсивности. Первый файл содержит спектр фонового сигнала (при прохождении излучения через дисперсионную среду без исследуемых частиц). Чтобы автоматически производить анализ спектров, требуется разработать автоматизированный алгоритм обработки файлов спектрометра. В силу того, что расчёт фактора эффективности ослабления (приложение А) требует значительных вычислительных ресурсов, то неотъемлемой частью является ускорение расчетов за счет методов оптимизации.

Чтобы отказаться от привязки обработки результатов функции гаммараспределения следует использовать дискретную функцию распределения, причем, чем больше будет параметров распределения, тем точнее будет выполнен расчёт. В свою очередь это позволит объединить оба метода на математическом уровне в их общей области определения параметров исследуемой среды, что ещё не было реализовано. Таким образом получиться расширить диапазон измерений, в результате чего он станет равным от 30 нм до 100 мкм. Здесь стоит отметить, что увеличение параметров дискретной функции распределения частиц по размерам очень сильно увеличивает время расчётов и в данном случае

невозможно обойтись без параллельных алгоритмов, которые ранее не применялись в данных оптических методах.

Таким образом, в программный комплекс [46] можно свести следующие функции: автоматизацию и оптимизацию оптических методов; реализацию дискретной функции распределения; ускорение расчетов за счёт использования технологии параллельных вычислений; реализацию алгоритма объединённой обработки исходных данных по этим методам на математическом уровне.

1.3 Типы параллелизма, технологии параллельных вычислений и средства разработки программного обеспечения

Параллельное программирование применяется тогда. когда для последовательной программы требуется уменьшить время ее выполнения, или когда последовательна программа, в виду большого объема данных, перестает помещаться в память одного компьютера. Направление развития в области высокопроизводительных вычислений как раз направлено на решение этих двух задач: создание мощных вычислительных комплексов с большим объемом стороны и разработка оперативной памяти С одной соответствующего программного обеспечения (ПО), с другой. Для реализации параллельных аппаратное и соответствующее вычислений требуется ему программное обеспечение [47-49].

В последние годы производители оказались перед необходимостью искать замену этому традиционному источнику повышения быстродействия. Из-за фундаментальных ограничений при производстве интегральных схем уже невозможно рассчитывать на увеличение тактовой частоты процессора как средство получения дополнительной производительности от существующих архитектур. Ограничения на потребляемую мощность и на тепловыделение, а также быстро приближающийся физический предел размера транзистора заставляют исследователей и производителей искать решение в другом месте.

Тем временем суперкомпьютеры [50, 51], оставаясь в стороне от мира потребительских компьютеров, на протяжении десятков лет добивались производительности сходными методами. Производительность повышения применяемых в них процессоров росла столь же быстрыми темпами, как в персональных компьютерах. Однако, помимо впечатляющего повышения быстродействия одного процессора, производители суперкомпьютеров нашли и источник роста общей производительности - увеличение другой числа процессоров. Самые быстрые современные суперкомпьютеры насчитывают десятки и сотни тысяч процессорных ядер, работающих согласованно. В 2005 году, столкнувшись с ростом конкуренции на рынке и имея не так много вариантов выбора, ведущие производители СРИ стали предлагать процессоры с двумя вычислительными ядрами вместо одного. В последующие годы эта тенденция продолжилась выпуском СРU с тремя, четырьмя, шестью и восьмью ядрами. Эта так называемая мультиядерная революция знаменовала колоссальный скачок в развитии рынка потребительских компьютеров.

Недавние разработки ведущих производителей микросхем, таких как *NVIDIA*, со всей очевидностью показали, что будущие микропроцессоры и крупные высокопроизводительные системы (*HPC*) будут гибридными (гетерогенными) [50]. В их основу будут положены компоненты двух основных типов в разных пропорциях:

• мультиядерные и многоядерные центральные процессоры: количество ядер будет и дальше возрастать из-за желания поместить все больше компонентов на один кристалл, не упираясь в барьер мощности, памяти и параллелизма на уровне команд;

• специализированное оборудование и массивно-параллельные ускорители.

Все вычислительные комплексы и компьютеры делятся на три группы архитектуры:

• системы с распределенной памятью. Каждый процессор имеет свою память и не может напрямую доступ к памяти другого процессора. Разрабатывая

программы подобных систем программист в явном виде должен задать всю систему коммуникации (Передача сообщений – *Message Passing*). Библиотеки: *MPI*, *PVM*, *Shmem* (*Cray only*).

• системы с общей (разделяемой) памятью. Процессор может напрямую обращаться в память другого процессора. Процессоры могут работать на одной шине (SMP). Разделяемая память может быть физически распределенной, но тогда стоимость доступа к удаленной памяти может быть очень высока и это должен учитывать разработчик ПО.

Подходы к разработке ПО: POSIX Threads, OpenMP, механизм передачи сообщения.

• комбинированные системы. В кластерах могут объединяться компьютеры различной конфигурации.

Специфика решаемой задачи должна учитывать тип параллелизма. Существует несколько типов параллелизма:

• на уровне задач – вычислительная задача разбивается на несколько относительно самостоятельных подзадач и каждый процессор загружается своей собственной подзадачей.

• уровень данных – параллелизм заключается в применении одной и той же операции к множеству элементов данных.

• на уровне инструкций. Наиболее низкий уровень параллелизма, осуществляемый на уровне параллельной обработки процессором нескольких инструкций (*MMX*, *SSE*, *SSE2*, *SSE3* и т.д.).

Для разработки, отладки и написания кода [52] оптимально использовать интегрированную среду разработки (*IDE*). К современным средствам разработки ПО можно отнести: *IntelliJ IDEA*, *NetBeans*, *Eclipse*, *Qt Creator*, *Geany*, *Embarcadero RAD Studio*, *Code::Blocks*, *Xcode* или *Microsoft Visual Studio*, *Visual Basic*, *Borland Delphi*, *Dev-C++* и пр.

Многоядерные системы в настоящее время содержат от 2-х до 22 вычислительных ядер и более на одном кристалле/корпусе процессора [53]. Количество процессоров может быть равно до 8-ми [54]. Основными технологиями программирования многопоточных приложений на этих многопроцессорных и многоядерных системах служат *ореnMP* и *MPI*.

В настоящее время активно развивается технология на основе массивнопараллельных ускорителей. В этой технологии используется графический процессор в роли вычислителя [55, 56]. Основными реализациями выступают: *CUDA*, *DirectCompute*, *OpenCL*, *OpenACC*, *AMD FireStream*, *C++ AMP*. Эти технологии выходят вперёд из-за соотношения производительности к цене системы вычисления, но в тоже время они ориентированы на конкретный класс решаемых задач.

1.4 Выбор инструмента разработки

В силу специфики задачи (один вычислительный узел, многократные измерения, автономность проведения анализа дисперсности) исключается работа с вычислительным кластером. Для решения поставленных задач рационально будет использовать высокопроизводительный многопроцессорный и/или многоядерный сервер, либо персональный суперкомпьютер на базе графического вычислителя.

В связи с тем, что данные методы требуют значительные ресурсы вычислительной системы для теоретических расчётов, адекватным решением представляется использование технологии параллельных вычислений. Расчёт формулы (14) требует реализацию параллелизма на уровне данных, который позволяет организовать технология *NVIDIA CUDA* [55], [57, 58] поэтому для решения поставленной задачи была выбрана программно-аппаратная архитектура *NVIDIA CUDA*, обладающая достаточным быстродействием. Она поддерживает языки программирования, такие как *C*, *C*++ [58], [59-61], *Fortran* и открытые стандарты, например, директивы *оpenACC*.

В качестве *IDE*, которая поддерживает эту технологию, была выбрана *Microsoft Visual Studio 2012* в редакции *Professional*, позволяющая создавать *x64* приложения [62]. На рисунке 6 представлена программно-аппаратная реализация

технологии *CUDA*, которая может работать в операционных системах семейства *Windows*, *Linux* и *MacOS* [63, 64].



Рисунок 6 – Программно-аппаратная реализация технологии CUDA

Эта комплексная программно-аппаратная реализация позволит выполнить ускорение вычислений за счёт параллельных алгоритмов и тем самым уменьшить время формул для теоретических расчётов. Она позволит устранить пункты 2, 3 недостатков, за счёт использования новых алгоритмов обработки исходных данных, которые передают АЦП L-783 фирмы ООО «Л Кард» и спектрометр S125-2048/14 производства фирмы *«Solar TII»*. В ней удастся реализовать алгоритм многопараметрической функции распределения частиц по размерам и алгоритм объединения методов на математическом уровне [65].

Выводы по главе 1.

1. Рассмотрены оптические методы контроля дисперсных характеристик и концентрации аэрозолей и их программно-аппаратные реализации. В качестве наиболее перспективных для измерений в условиях быстроменяющейся обстановке, генерации и эволюции мелкодисперсных аэрозольных сред выбраны модификации метода спектральной прозрачности и метода малых углов, реализованные в виде установок ЛИД-2М и ТИПАС-1 (разработки ИПХЭТ СО РАН).

2. Изучены недостатки реализации указанных оптических методов и установок на их основе, предложены пути преодоления этих недостатков.

3. Рассмотрены технологии параллельных вычислений и среды разработки приложений для их реализации. Впервые предложено и обосновано использование параллельных вычислений для обработки результатов измерений в установках, реализующих модификации методов спектральной прозрачности и малых углов для измерения дисперсных характеристик и концентрации частиц в условиях быстроменяющейся обстановки.

2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

2.1 Описание проблемы

Метод спектральной прозрачности, метод малых углов и метод полной индикатрисы являются частными случаями решения уравнения Фредгольма I рода (34), [23], [66]:

$$\int_{a}^{b} R(D, y) f(D) dD = \varphi(y), \qquad (34)$$

где R(D, y) – ядро уравнения;

f(D) – функция распределения частиц по размерам;

 $\varphi(y)$ – экспериментально определяемая функция (индикатриса рассеяния или оптическая плотность).

Во всех этих задачах функция f(D) явно выражается через интеграл от $\varphi(y)$ и некоторое несложное ядро в каждом случае своё. Для МСП ядро уравнения (35) представляет собой фактор эффективности ослабления, а для ММУ – фактор эффективности рассеяния.

Установка ТИПАС-1 позволяет определять параметры дисперсных сред в диапазоне от 30 нм до 6 мкм. Она основана на ТВСМ, который является модификацией МСП (35):

$$\ln\left(\frac{I_0(\lambda_i)}{I(\lambda_i)}\right) = \frac{\pi C_n l}{4} \int_0^\infty Q\left(\frac{\pi D}{\lambda_i}, m(\lambda_i)\right) D^2 f(D) dD$$
(35)

Главным отличием ТВСМ от МСП является то, что в ТВСМ используются отношения на разных длинах волн. Это позволяет избавиться от определения концентрации частиц, за счёт сокращения в числителе и знаменателе коэффициента $\frac{\pi C_n l}{4}$. В результате необходимо найти отношения на разных длинах волн как для теоретических расчётов по формуле (36):

 $k_{\lambda_{i}}^{meop} = \frac{\tau_{\lambda_{i}}^{meop}}{\tau_{\lambda_{1}}^{meop}} = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} Q\left(\frac{\pi D}{\lambda_{i}}, m(\lambda_{i})\right) D^{2}f(D) dD}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} Q\left(\frac{\pi D}{\lambda_{1}}, m(\lambda_{1})\right) D^{2}f(D) dD},$ (36)

так и для экспериментальных по формуле (37):

$$k_{\lambda_i}^{\mathfrak{skcn}} = \frac{\tau_{\lambda_i}^{\mathfrak{skcn}}}{\tau_{\lambda_1}^{\mathfrak{skcn}}},$$
(37)

где
$$au_{\lambda_i}^{\scriptscriptstyle SKCN} = \ln \frac{I_0(\lambda_i)}{I(\lambda_i)}.$$

Фактор эффективности ослабления $Q\left(\frac{\pi D}{\lambda_i}, m(\lambda_i)\right)$ зависит от параметра Ми

и от комплексного показателя преломления частиц. Комплексный показатель преломления $m(\lambda_i) = n(\lambda_i) - ik(\lambda_i)$ состоит из действительной части – показателя преломления частиц и мнимой части – показателя поглощения частиц, которые зависят от длины волны. Для определения фактора эффективности ослабления требуется априорная информация о $m(\lambda_i)$. Для Al_2O_3 на рисунке 7 представлены графики зависимости показателей преломления и поглощения от длины волны при комнатной температуре, которые рассчитаны по формулам (38), (39):

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \lambda^2 \left(\frac{1.024}{\lambda^2 - 0.003776} + \frac{1.058}{\lambda^2 - 0.01225} + \frac{5.281}{\lambda^2 - 321.4}\right)} \cdot 0,996364$$

$$k(\lambda) = 0.002 \left(0.06\lambda^2 + 0.7\lambda + 1\right) \cdot 0,007391.$$
(38)
(39)



Рисунок 7 – Графики зависимости комплексного показателя преломления от длины волны для Al_2O_3

Из рисунка 7 видно, что для диапазона длин волн от 300 нм до 1500 нм поглощение отсутствует, а преломление практически постоянно и равно 1,75.

Фактор эффективности ослабления рассчитывается через рекуррентные соотношения (40) [67]:

$$Q\left(\frac{\pi D}{\lambda_{i}}, m(\lambda_{i})\right) = \frac{2}{\left(\frac{\pi D}{\lambda_{i}}\right)^{2}} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}\left(a_{n}+b_{n}\right),$$
(40)

где коэффициенты Ми рассчитываются через формулы (41-47)

$$a_{n}\left(\frac{\pi D}{\lambda_{i}},m(\lambda_{i})\right) = \frac{\left[\frac{A_{n}\left(\frac{\pi Dm(\lambda_{i})}{\lambda_{i}}\right)}{m(\lambda_{i})} + \frac{n}{\left(\frac{\pi D}{\lambda_{i}}\right)}\right] \operatorname{Re}\left[\xi\left(\frac{\pi D}{\lambda_{i}}\right)\right] - \operatorname{Re}\left[\xi_{n-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda_{i}}\right)\right]}{\operatorname{Re}\left[\frac{A_{n}\left(\frac{\pi Dm(\lambda_{i})}{\lambda_{i}}\right)}{m(\lambda_{i})} + \frac{n}{\left(\frac{\pi D}{\lambda_{i}}\right)}\right]}\xi_{n}\left(\frac{\pi D}{\lambda_{i}}\right) - \xi_{n-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda_{i}}\right)},$$
(41)

$$b_{n}\left(\frac{\pi D}{\lambda_{i}},m(\lambda_{i})\right) = \frac{\left[m(\lambda_{i})A_{n}\left(\frac{\pi Dm(\lambda_{i})}{\lambda_{i}}\right) + \frac{n}{\left(\frac{\pi D}{\lambda_{i}}\right)}\right]\operatorname{Re}\left[\xi\left(\frac{\pi D}{\lambda_{i}}\right)\right] - \operatorname{Re}\left[\xi_{n-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda_{i}}\right)\right]}{\left[\xi_{n-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda_{i}}\right) + \left(\frac{\pi Dm(\lambda_{i})}{\lambda_{i}}\right)\right]},$$
(42)

$$\begin{bmatrix} m(\lambda_i)A_n\left(\frac{\pi Dm(\lambda_i)}{\lambda_i}\right) + \frac{n}{\left(\frac{\pi D}{\lambda_i}\right)} \end{bmatrix} \xi_n\left(\frac{\pi D}{\lambda_i}\right) - \xi_{n-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda_i}\right) \\ A_0\left(\frac{\pi Dm(\lambda_i)}{\lambda_i}\right) = ctg\left(\frac{\pi Dm(\lambda_i)}{\lambda_i}\right),$$
(43)

$$\xi_{-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda_i}\right) = \cos\left(\frac{\pi D}{\lambda_i}\right) - i\sin\left(\frac{\pi D}{\lambda_i}\right),\tag{44}$$

$$\xi_0 \left(\frac{\pi D}{\lambda_i}\right) = \sin\left(\frac{\pi D}{\lambda_i}\right) + i\cos\left(\frac{\pi D}{\lambda_i}\right),\tag{45}$$

$$\xi\left(\frac{\pi D}{\lambda_i}\right) = \frac{2n-1}{\left(\frac{\pi D}{\lambda_i}\right)} \xi_{n-1}\left(\frac{\pi D}{\lambda_i}\right) - \xi_{n-2}\left(\frac{\pi D}{\lambda_i}\right),\tag{46}$$

$$A_{n}\left(\frac{\pi Dm(\lambda_{i})}{\lambda_{i}}\right) = -\frac{n}{\left(\frac{\pi Dm(\lambda_{i})}{\lambda_{i}}\right)} + \left[\frac{n}{\left(\frac{\pi Dm(\lambda_{i})}{\lambda_{i}}\right)} - A_{n-1}\left(\frac{\pi Dm(\lambda_{i})}{\lambda_{i}}\right)\right]^{-1}.$$
(47)

В конечном расчёте мнимая часть комплексных коэффициентов [68] Ми отбрасывается. Расчет фактора эффективности ведется до тех пор, пока не выполнится условие (48):

$$\left[\sum_{n=1}^{N} (2n+1) \operatorname{Re}(a_{n}+b_{n})\right] \cdot 10^{-8} > (2N+1) \operatorname{Re}(a_{N+1}+b_{N+1})$$
(48)

и его значение на последующем шаге не будет отличаться от предыдущего на величину 10⁻⁸.

Границей по концентрации служит величина между затуханием опорного спектра (через дисперсионную среду без дисперсной фазы) и спектра сигнала

(через дисперсионную среду с дисперсной фазой), которая определяется исходя из аппаратурных возможностей. Форма опорного спектра и спектра сигнала определяет размеры частиц. В случае, когда размер частиц более 6 мкм перестаёт изменяться форма спектра. При оценке минимального и максимального диаметров частиц, измеряемых ТВСМ, использовались предположения, что если размеры частиц много меньше длины волны излучения ($D \le 0,06\lambda$), то имеет место рэлеевское рассеяние, а если размер частиц много больше длины волны (

 $D > \frac{30\lambda}{\pi}$), то взаимодействие излучения с частицей определяется законами геометрической оптики [21, 69]. Здесь λ – длина волны зондирующего излучения. В данном случае приёмником служит спектрометр S125-2048/14 фирмы «Solar TII», в котором регистрируется 2048 длин волн.

Установка ЛИД-2М основана на модификации метода малоуглового рассеяния и позволяет определять параметры дисперсных сред в диапазоне от 1 мкм до 100 мкм. В качестве источника зондирующего излучения используется гелий-неоновый лазер *HRP050* фирмы *Thorlabs Inc* (США) с длиной волны 632,8 нм. Приемником излучения служит линейка кремниевых фотодиодов ФД-24К с чувствительной площадкой порядка 50 мм² в количестве 7 штук. Площадка позволяет регистрировать отклонение от прямолинейного луча под углами $0.3^{\circ} \div 20^{\circ}$. Аппаратурная реализация определяет также ограничение ПО концентрации. Минимальное количество рассеивающих частиц определяет минимальную концентрацию метода. Пределы применимости метода малых углов по размерам частиц ограничены снизу условием корректности $\frac{\pi D}{\lambda_i} < 30$, т.е. когда

частицы настолько малы, что значения напряжений на всех фотодиодах примерно одинаково. Для верхнего предела размеров частиц ограничение определяется техническими возможностями оптико-электронного прибора, т.е. рассеяние направлено вперёд [34] в узком конусе и напряжение есть только на фотодиоде прямолинейного луча. При данной технической реализации D_{максимальное} ≈ 100 мкм.

Если представить оба метода на графике по диапазону определяемых параметров, то схематически получится график, представленный на рисунке 8.



Рисунок 8 – Границы определения параметров ММУ и ТВСМ на основе функции распределения

На рисунке 8 видно, что у обоих методов имеется общая область определения дисперсных параметров – от 1 мкм до 6 мкм. Эта область позволяет обрабатывать исходные данные с обоих методов сразу, а замена функции гаммараспределения на многопараметрическую адекватнее опишет вид (форму) распределения [70, 71]. Этот подход является совершенно новым, он позволит объединить два метода на математическом уровне и тем самым расширить границы определения дисперсных характеристик сред. Таким образом, в эксперименте можно определять характеристики, как для субмикронных, так и микронных дисперсных сред.

Для того чтобы получать данные о дисперсных характеристиках сред с высоким временным разрешением в расширенном диапазоне (от 30 нм до 100 мкм) требуется решить ряд задач.

Во-первых, разработать и реализовать алгоритм для автоматической обработки исходных данных, получаемых с АЦП в МММУ. Разработать и

реализовать алгоритм для автоматической обработки исходных данных, получаемых со спектрометра в ТВСМ.

Во-вторых, разработать и реализовать алгоритм многопараметрической функции распределения частиц по размерам для данных методов с целью более адекватного отражения распределения и возможности объединения методов. Оптимизировать теоретические расчёты с помощью программно-аппаратной технологии *NVIDIA CUDA*.

В-третьих, разработать и реализовать алгоритм объединённой обработки исходных данных на математическом уровне.

2.2 Автоматизированный алгоритм обработки модулированного сигнала

В установке ЛИД-2М для регистрации значений рассеяния используются фотодиоды, полученный сигнал передаётся на АЦП L-783, который использует шину РСІ компьютера. После источника излучения (гелий-неоновый лазер 632,8 нм) используется модуляция сигнала [72, 73]. Она предназначена для того, чтобы минимизировать погрешность регистрации индикатрисы рассеяния. На рисунке 9 представлены графики немодулированного сигнала с 8-ю каналами регистрации.



1 – сигнал на прямое прохождение луча лазера; 2 – первый канал на рассеяние; 3 – второй канал на рассеяние; 4 – третий канал на рассеяние; 5 – четвёртый канал на рассеяние; 6 – пятый канал на рассеяние; 7 – шестой канал на рассеяние; 8 – седьмой канал на рассеяние
 Рисунок 9 – График немодулированного сигнала с АЦП

Этот график показывает, что в данный момент времени основное рассеяние приходиться на самый малый угол отклонения от прямого пучка, т.е. можно предположить, что рассеивающие частицы достаточно крупные. Для обработки результатов в соответствии с методом используется модулированный сигнал (рисунок 10), который позволяет получить значение индикатрисы без рассеяния дисперсной средой и с рассеянием практически в один момент времени.



1 –сигнал на прямое прохождение луча лазера; 2 – первый канал на рассеяние; 3 – второй канал на рассеяние; 4 – третий канал на рассеяние; 5 – четвёртый канал на рассеяние; 6 – пятый канал на рассеяние Рисунок 10 – График модулированного сигнала с АЦП

Для того чтобы автоматически распознавать значения интенсивности на разных каналах, был разработан специальный алгоритм автоматизированной обработки результатов эксперимента, получаемых с АЦП [74-76], который позволил сократить время обработки исходного файла (тысячи точек, в зависимости от времени сбора) до нескольких секунд [73]. В его основе лежит поиск середины экстремумов для канала на прямое прохождение луча лазера. Это в свою очередь позволяет определить значения интенсивности на остальных каналах. Формула, (49) необходимая для вычисления амплитуды рассеяния на разных каналах:

$$I_{pacceяния} = I_{_{\mathcal{HC}n}}(y_i) = CUГHAЛ - ФОН$$
 (49)

где ФОН – состоит из шума фотоприёмников, некоторого значения интенсивности от усилителя, внешнего освещения и пр.; СИГНАЛ – включает в себя фон, шум и полезный сигнал при рассеянии средой луча лазера. На рисунке 11 представлены пять нормированных индикатрис рассеяния при использовании пяти каналов рассеяния.



Рисунок 11 – Пять индикатрис рассеяния при использовании пяти углов рассеяния

Результаты обработки сохраняются в оперативную память компьютера для их дальнейшего использования, в данном случае это значения $I_{_{3ксn}}(y_i)$. В общем случае данные содержат нормированные значения амплитуд всех каналов приёма в определенные моменты времени.

2.3 Автоматизированный алгоритм обработки файлов спектрометра

В установке ТИПАС-1 в качестве приёмника излучения используется спектрометр S125-2048/14, который позволяет регистрировать спектр [77] от ультрафиолетовой области до ближней инфракрасной области (352,771 нм –

1105,565 нм). На рисунке 12 представлен спектр галогенной лампы, используемой в качестве источника зондирующего излучения.



Рисунок 12 - Спектр галогенной лампы

В реализации метода снимаются два спектра: $I_0(\lambda_i)$ – спектр прохождения через кювету с дисперсионной жидкостью или воздухом (опорный спектр); $I(\lambda_i)$ – спектр прохождения через кювету с суспензией или аэрозолем. Для того чтобы исследовать дисперсные среды в условиях быстроменяющейся обстановке, требуется снимать $I(\lambda_i)$ с достаточно высокой частотой. Метод использует 30 длин волн (после оптимизации) в диапазоне от 575,835 нм до 1012,153 нм. Спектрометр сохраняет спектр в виде отдельного файла, в котором даны длины волн и значения интенсивность для каждой из них. Всего спектр содержит 2048 длин волн. В целях ускорения процесса вычислений необходимо исходные данные со спектрометра (файлы) загружать в оперативную память для их использования в дальнейших расчётах.

В связи с этим был разработан алгоритм автоматизированной обработки файлов [78] спектрометра с последующей коррекцией данных для расчёта по методу, который позволил сократить время подготовки всех исходных данных до нескольких секунд, в то время как раньше требовалось несколько минут для одного файла. На рисунке 13 приведена укрупнённая блок-схема автоматизированного алгоритма обработки данных со спектрометра.



Рисунок 13 – Блок-схема программы многофайловой обработки и подготовки исходных данных

Основной трудностью является проверка соответствия длин волн и оптической толщины/коэффициента спектральной прозрачности, а также реализация многофункциональности алгоритма в целом. Этот алгоритм позволяет выполнять следующие функции:

- загружать файл спектра $I_0(\lambda_i)$ в ОЗУ;
- загружать файлы спектров $\tau_{\lambda_i}^{\mathfrak{skcn}}$ в ОЗУ;
- находить оптическую толщину $\tau_{\lambda_i}^{\mathfrak{s}\kappa cn}$;
- находить отношения оптических плотностей $k_{\lambda_i}^{\mathfrak{skcn}}$;
- отбирать необходимые длины волн.

Программа осуществляет многофайловую запись текстовых файлов [78] в ОЗУ компьютера и их дальнейшее преобразование для ТВСМ. На данный алгоритм было получено свидетельство государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ (приложение Б).

2.4 Замена аналитической функции дискретной и оптимизация методов

Оба рассмотренных метода используют аналитическую функцию распределения частица по размерам. Это унимодальная функция гаммараспределения (31), имеющая два параметра: α , β и нормирующий множитель (50).

$$a = \frac{1}{\int\limits_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^{\alpha} \exp^{-bD} dD}$$
(50)

Для определения среднего объёмно-поверхностного диаметра частиц используется выражение (51):

$$D_{32} = \frac{\alpha + 3}{\beta} \tag{51}$$

В новом подходе предлагается заменить функцию (25), (31) на многопараметрическое дискретное распределение для более адекватного описания дисперсности аэрозольной среды в условиях быстроменяющейся обстановки, особенно стадии формирования облака. Этот на подход подразумевает, что чем больше будет параметров дискретной функции, тем точнее будет определяться функция распределения частиц по размерам.

Многопараметрическую функцию можно представить в виде (52):

$$f(D) = \begin{cases} A_{1} \mod D \leq D_{1}; \\ A_{2} \mod D_{1} < D \leq D_{2}; \\ A_{3} \mod D_{2} < D \leq D_{3}; \\ A_{i} \mod D_{i-1} < D \leq D_{i}; \\ \dots \\ 1 - \sum_{i}^{N} A_{i} \mod D > D_{N}, \end{cases}$$
(52)

где $A_1, ..., A_i$ – параметры функции распределения;

N – число столбцов (параметров) распределения.

Тогда *D*₃₂ для *N*-параметрической функции распределения находится по формуле (53)

$$D_{32} = \frac{A_1 D_1^3 + A_2 D_2^3 + \dots + A_i D_i^3 + \left(1 - \sum_{i=1}^{N} A_i\right) D_{i+1}^3}{A_1 D_1^2 + A_2 D_2^2 + \dots + A_i D_i^2 + \left(1 - \sum_{i=1}^{N} A_i\right) D_{i+1}^2}$$
(53)

Программный код дискретной функции распределения частиц по размерам с расчетом среднего объёмно-поверхностного диаметра частиц аналогичен для обоих методов.

При увеличении числа параметров распределения и уменьшении шага перебора резко возрастает длительность расчётов и увеличивается точность, поэтому в дальнейшем была реализована параллельная версия данного алгоритма. Результаты анализа времени расчета от числа параметров для МММУ представлены в таблице 6.

Время расчётов, мин	Число параметров	Шаг перебора
0,015	5	10
0,167	5	5
72,69	5	1
1,48	10	10
158,33	10	5
67405660,55	10	1
30,00	15	10
22007,45	15	5
00	15	1

Таблица 6 – Анализ времени расчётов в МММУ без оптимизаций

Разработка параллельного алгоритма при реализации дискретной функции распределения в этих методах представляет значительную трудность в силу того, что численное интегрирование представляет рекурсию [79], [80], а в ТВСМ ещё добавляется расчёт коэффициентов Ми, который также представляет рекурсию.

В связи с этим было принято проводить ещё дополнительную оптимизацию в других участках кода. Для МММУ удалось сократить время выполнения программы за счёт сворачивания циклов [81] по диаметру частиц, длине оптического пути и по номеру фотодиода в один цикл и созданию для него параллельного алгоритма [71]. На этот алгоритм было получено свидетельство государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ [82] (приложение В). Преобразование и упрощение выражений также позволило ускорить время работы программы для этого метода. Совокупность описанных способов позволили ускорить время выполнения программы примерно в 4-5 раз для 5-ти параметрической функции распределения. Ускорение расчётов по ТВСМ производилась различными способами, в них входили как стандартные, которые предлагают авторы [83], [84], так и специальные, в рамках конкретной задачи: сокращение числа длин волн, расчёт фактора эффективности ослабления заранее и пр. Основными стоит отметить следующие:

- 1. сокращение количества используемых длин волн;
- 2. расчёт факторов эффективности ослабления заранее;
- 3. расчёт всех видов функций распределения только 1 раз (устранение зависимости времени расчёта от количества исходных файлов);
- 4. оптимизация интегрирования [85], [86];
- 5. изменение количества и типов переменных;
- 6. оптимизация компилятора и компоновщика IDE;
- 7. уменьшения числа ветвлений;
- 8. группировка данных по одинаковым типам в памяти;
- 9. удаление операций приведения типов;

Перечисленные способы оптимизации (исключая пункт 2, вследствие несоизмеримости времени расчёта) позволили ускорить время выполнения кода программы для ТВСМ примерно 6-7 раз.

Для обоих методов проводилось и анализировалось большое количество способов уменьшения времени работы программы, а также вся оптимизация проводилась с замером времени выполнения кода [57, 87], чтобы можно было оценить достаточно точно разницу в разных вариантах. Для параллельного кода использовался специальный анализатор времени выполнения участка программы, рекомендуемый разработчиками *NVIDIA CUDA*. Анализ скорости работы последовательного кода производился стандартной встроенной функцией языка C++ clock().

После проведения предварительной обработки результатов исходных данных было выявлено, что 5-ти параметрической функции распределения недостаточно для удовлетворительных результатов по точности распределения. В связи с этим было принято решение о глобальной оптимизации на увеличения числа параметров, которое было достигнуто за счёт применения формулы (52) в поддиапазонах, найденных на первом шаге. После этого было установлено, что 25-ти параметрическая функция распределения даёт примерно одинаковые результаты с функцией гамма-распределения в обоих методах. Итоговое время расчёта для 60-ти параметрической функции распределения в ТВСМ и 50-ти параметрической в МММУ составляет до 10 минут независимо от количества исходных данных.

2.5 Объединение обработки результатов оптических методов дискретной функцией

Помимо уточнения результатов измерения дисперсности есть вторая цель – замена унимодальной функции распределения дискретной. Математическое обобщение рассматриваемых методов позволит качественно обобщать экспериментальную информацию об оптических свойствах дисперсных сред и существенно расширит методологию интерпретации получаемых данных.

Замена в обоих методах аналитической гамма-функции дискретной позволяет произвести объединение результатов измерений на математическом уровне. Это становится возможным благодаря наличию общей области определения параметров от ~ 1 мкм до 6 мкм. Дискретную функцию распределения при одновременном использовании двух методов схематически можно представить как на рисунке 14.



Рисунок 14 – Схематическое представление дискретной функции распределения при совместном использовании методов

Для объединения результатов обработки двух методов на математическом уровне разработан специальный алгоритм. Необходимым условием объединения должно быть наличие одного или более параметров распределения в общей области, которые не выходят за границы этого диапазона. Также желательно равномерное разбиение диапазонов для каждого метода.

Алгоритм объединения строится на предположении одинаковой концентрации в общей области определения параметров. Если ввести обозначения C_{T2} – массовая концентрация для ТВСМ в общей области, а C_{y2} – массовая концентрация для МММУ в общей области, то должно выполняться условие (54):

$$C_{T2} = C_{V2} \tag{54}$$

Для пояснения введём долнительные обозначения:

 g_{T1} – массовая дискретная функция распределения ТВСМ в диапазоне от 30 нм до 1 мкм;

 g_{T2} – массовая дискретная функция распределения ТВСМ в диапазоне от 1 мкм до 6 мкм;

g^{y2} – массовая дискретная функция распределения МММУ в диапазоне от
 1 мкм до 6 мкм;

В^{V3} – массовая дискретная функция распределения МММУ в диапазоне от 6 мкм до 100 мкм;

Ст1 – массовая концентрация частиц ТВСМ в диапазоне от 30 нм до 1 мкм;

Суз – массовая концентрация частиц МММУ в диапазоне от 1 мкм до 100 мкм;

 $C_T = C_{T1} + C_{T2}$ – массовая концентрация ТВСМ от 30 нм до 6 мкм;

 $C_{y} = C_{y_2} + C_{y_3}$ – массовая концентрация МММУ от 1 мкм до 100 мкм. Схематически введённые обозначения можно представить как на рисунке 15.



Рисунок 15 – Распределение областей методов после введения обозначений

Тогда массовые функции распределения можно записать в виде (55):

$$g_{T1} = \int_{30\mu M}^{100\mu K} g_i(D) dD,$$

$$g_{T2} = \int_{10\mu K}^{6\mu K} g_i(D) dD,$$

$$g_{V2} = \int_{10\mu K}^{6\mu K} g_i(D) dD,$$

$$g_{V3} = \int_{6\mu K}^{100\mu K} g_i(D) dD.$$
(55)

Концентрации, соответственно, будут определены следющими выражениями:

$$C_{T1} = g_{T1} \cdot C_T,$$

$$C_{T2} = g_{T2} \cdot C_T,$$

$$C_{V2} = g_{V2} \cdot C_V,$$

$$C_{V3} = g_{V3} \cdot C_V,$$
(56)

Важно, что в пересекающейся области каждый метод определяет одну и ту же массу дисперсных частиц, а значит и концентрацию частиц (57), то есть:

$$C_T \cdot g_{T2} = C_Y \cdot g_{Y2} \tag{57}$$

Тогда из выражения (57) можно выразить g_{T2} :

$$g_{T2} = \frac{C_V \cdot g_{V2}}{C_T}, \text{ или}$$
(58)

g^{y₂} по формуле (59):

$$g_{V2} = \frac{C_T \cdot g_{T2}}{C_V}.$$
 59)

В данном случае нет принципиальной разницы, какое из выражений (58, 59) использовать для дальнейших расчетов. Рассмотрим вариант расчетов с использованием выражения (58). В результате получается ненормированная функция распределения частиц по размерам во всей области определения в виде

элементов: g_{T1} , $\frac{C_{V} \cdot g_{V2}}{C_{T}}$ и g_{V3} . Сумма этих трёх элементов определяет нормировочный коэффициент (60):

$$a = \frac{1}{\sum \left(g_{T1+} \frac{C_{Y} \cdot g_{Y2}}{C_{T}} + g_{Y3}\right)}.$$
 (60)

Элементы искомой функции распределения частиц по размерам будут определены выражениями (61-63):

$$\frac{g_{T1}}{a},$$
(61)
$$\frac{\left(\frac{C_{V} \cdot g_{V2}}{C_{T}}\right)}{a},$$
(62)
$$\frac{g_{V3}}{a}$$
(63)

Сумма этих элементов равна 1 или 100%, из этого вытекает выражение (64):

$$\frac{g_{T1}}{a} + \frac{\left(\frac{C_V \cdot g_{V2}}{C_T}\right)}{a} + \frac{g_{V3}}{a} = 1,$$
(64)

тогда результирующую дискретную функцию распределения для объединённого диапазона можно записать в виде (65):

$$G(D) = \begin{cases} a \cdot g_1 & npu & 30_{HM} \le D \le D_1 \\ a \cdot g_2 & npu & D_1 < D \le D_2 \\ \dots & & \\ a \cdot g_n & npu & D_{n-1} < D \le 100_{MKM} \end{cases}$$
(65)

Каждый из элементов (61-63) может состоять из множества элементов, которые были определены на первом этапе решения задачи, поэтому эти подэлементы также должны быть разделены на нормирующий коэффициент *a*.

Алгоритм расчёта дискретной функцией распределения частиц по размерам, концентрации, *D*³² и *SSA* с математически-объединённой обработкой представлен в блок-схеме на рисунке 16.




Рисунок 16 – Блок-схема программы объединённой обработки данных эксперимента

2.6 Выбор модельных сред и расчёт фактора эффективности ослабления

Как было уже сказано выше, основными ограничениями методов являются размер и концентрация частиц. Если размер частиц выходит за границы метода, то эти частицы не учитываются при обработке исходных данных. Для совместной обработки эмпирических данных следует использовать такую среду, чтобы в ней присутствовали частицы обоих диапазонов методов с концентрацией, не

73

превышающей максимальную границу и выше минимальной чувствительности. Кроме того, желательно использовать слабо поглощающую среду, с коэффициентом поглощения не более единицы, в силу того, что для ТВСМ с увеличением поглощения постепенно уменьшается диапазон определяемых параметров по диаметру частиц. В связи с этим было принято решение использовать мелкодисперсные порошки двуокиси титана TiO_2 . и оксида алюминия Al_2O_3 .

Для оценки дисперсности были проведены эксперименты на аэрозолях этих порошков, которые распылялись импульсным методом и исследовались с помощью оптического анализатора *Spraytec* компании *Malvern Instruments*. В результате было установлено, что аэрозоль TiO_2 имеет дисперсность от 185 нм до 54,12 мкм (приложение Г) и от 736 нм до 39,81 мкм для Al_2O_3 (приложение Д) в некоторый момент времени.

Стоит заметить, что можно исследовать различные дисперсные системы, главное чтобы априори был известен комплексный показатель преломления материала частиц и дисперсионной среды на используемых длинах волн. При расчётах нужно учитывать: если частицы находятся не в вакууме или воздухе, то следует пользоваться выражением для длины волны (66):

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{m_0},\tag{66}$$

где λ_0 – длина волны в воздухе;

*m*⁰ – показатель преломления среды, в которой находятся частицы [89].

Из этого следует, что например, частицы золота (m=0,57 - 2,45i при $\lambda = 550$ нм) в воде ($n_0 = 1,333$) при проведении опытов в жёлтом свете ($\lambda = 550$ нм) для расчётов следует принять показатель преломления 0,43 - 1,83i и длину волны 412 нм. [88].

Как показывают авторы [23, 34] от 20-ти до 30-ти длин волн достаточно для восстановления функции распределения частиц по размерам [89]. В результате использования априорной информации о комплексном показателе преломления

частиц в ТВСМ была составлена таблица 7, данные для которой были взяты из [90].

Mo	Длина	Показатель пре.	ломления	Показатель					
JNG	волны, мкм	TiO ₂	Al ₂ O ₃	поглощения					
1	2	2 3 4							
1	0,575835	2,6238	1,7688						
2	0,590909	2,6117	1,7680						
3	0,606156	2,6006	1,7672	_					
4	0,621225	2,5907	1,7664	_					
5	0,636501	2,5816	1,7657	_					
6	0,651605	2,5733	1,7651	-					
7	0,66671	2,5658	1,7645	-					
8	0,681869	2,5588	1,7639	-					
9	0,696982	2,5524	1,7633	-					
10	0,712015	2.5466	1,7628						
11	0,727036	2,5412	1,7623	0,0000					
12	0,742188	2,5361	1,7618	_					
13	0,75735	2,5314	1,7613						
14	0,772512	2,5270	1,7609	_					
15	0,787515	2,5229	1,7605	_					
16	0,802501	2,5191	1,7601	_					
17	0,817477	2,5156	1,7597						
18	0,832452	2,5123	1,7593						
19	0,847427	2,5091	1,7589						
20	0,862402	2,5062	1,7586						
21	0,877377	2,5034	1,7582						

Таблица 7 — Данные о комплексном показателе преломления на определённых длинах волн для TiO_2 и Al_2O_3 .

1	2	3	4	5
22	0,892352	2,5008	1,7579	
23	0,907327	2,4983	1,7576	
24	0,922302	2,4960	1,7572	
25	0,937277	2,4938	1,7569	
26	0,952252	2,4917	1,7566	0,0000
27	0,967227	2,4897	1,7563	
28	0,982203	2,4878	1,7560	
29	0,997178	2,4860	1,7557	
30	1,012153	2,4843	1,7554	

Продолжение таблицы 7

Сведения о комплексном показателе преломления для оксида алюминия рассчитывались по формулам (38), (39), которые были сведены в таблицу 7.

Предварительный анализ границ применимости в ТВСМ по диаметру частиц был основан на расчёте и построении графиков зависимости фактора эффективности ослабления для меньшей (575,835 нм) и большей (1012,153 нм) используемых длин волн. Метод применим в области, где зависимость фактора эффективности ослабления от длины волны наиболее сильно выражена (в области

первого максимума функции $Q\left(\frac{\pi D}{\lambda_i}, m(\lambda_i)\right)$) [34]. Из рисунка 17 можно сделать

вывод, что у Al_2O_3 для большей длины волны граница определения по диаметру частиц немного больше, чем для меньшей и находится около 3-4 мкм, так как дальше график становится слабо зависим от размера частиц.



Рисунок 17 – Фактор эффективности ослабления для *Al₂O₃* для двух длин волн

Для TiO_2 также были построены зависимости фактора эффективности ослабления от длины волны и диаметра частиц (рисунок 18). Графики показывают, что верхняя граница по диаметру частиц у двуокиси титана меньше чем у оксида алюминия и составляет около 0,5-1 мкм, но на практике порядка 2-3 мкм.



Рисунок 18 – Фактор эффективности ослабления для *TiO*₂ для двух длин волн

Диапазон концентрации частиц и оптической толщины для каждого метода определяется исходя из технической реализации и возможности самих методов, которые подробно рассматриваются в разделе 3.1.

Выводы по главе 2.

1. подробно рассмотрены источники и приёмники зондирующего излучения в оптических методах, а также формат представления исходных данных;

2. разработан алгоритм, реализованный в виде программы для автоматической обработки исходных данных в МММУ;

3. разработан алгоритм, реализованный в виде программы для автоматической обработки исходных данных в ТВСМ;

4. реализован алгоритм для поиска решения в виде многопараметрической функции распределения частиц по размерам для указанных оптических методов;

5. разработан и реализован алгоритм объединения (сращивания) результатов обработки эмпирических данных для МММУ и ТВСМ;

6. выбраны модельные среды для проведения экспериментов и проверки результатов математической модели.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1 Характеристики измерительного комплекса и границы применимости

Разработанные методы и установки позволяют определять дисперсные характеристики сред с погрешностью [91, 92] не более 15% на всём диапазоне по диаметру частиц. Для того чтобы исключить наличие дополнительных ошибок измерения [93, 94] требуется определить границы работы установок по оптической толщине (концентрации). В условиях многократного рассеяния использование МММУ приемлемо в случае, когда для оптической толщины дисперсной среды выполняется условие:

$$\tau(\lambda_i) = \ln\left(\frac{I_0(\lambda_i)}{I(\lambda_i)}\right) < 1,5$$
(67)

В качестве источника излучения в установке ЛИД-2М используется гелийнеоновый лазер с длиной волны 632,8 нм, а в качестве приемников – линейка фотодиодов. Сигнал, регистрируемый с линейки обрабатывается АЦП [95] L-783 фирмы ООО «Л Кард», который имеет следующие характеристики (таблица 8).

Управление и настройка АЦП осуществляется посредством программного обеспечения «*LGraph2*», внешний вид которого представлен на рисунке 19.

Тип платы	L-783						
	16 дифференциальных или 32 с						
Количество каналов	общей землей						
Разрядность АЦП	12 бит						
Диапазоны входного сигнала	±5B, ±2.5B, ±1.25B, ±0.625B						
Напряжение синфазного сигнала	±10 В (не зависит от диапазона)						
Разрядность, рассчитанная по	Gain=1 11.9 бит						
отношению сигнал/шум на	Gain=2 11.9 бит						
заземленном входе PGA при макс.	Gain=4 11.9 бит						
частоте АЦП	Gain=8 11.8 бит						
Разрядность, рассчитанная по							
отношению сигнал/(шум+гармоники)							
полученная при оцифровке	Gain=1 11.6 бит						
синусоидального сигнала частотой 10							
кГц с амплитудой 4.9 В при макс.							
частоте запуска АЦП							
Время преобразования	0.3 мкс						
Входное сопротивление при	Не мещее 1 Мом						
одноканальном вводе							
Максимальная частота преобразования	2857 кГц						
Samara Brohob	Входной ток не более 20 мА на вход						
Эащита входов	и 80 мА на сумму входов						
Интегральная нелинейность	Make 1 M3P						
преобразования	Muke. 1 19151						
Дифференциальная нелинейность	Make 1 M3P						
преобразования	Muke. 1 19151						
Время установления аналогового							
тракта при максимальном перепаде	макс. 0.25 мкс (точность 0.1%)						
напряжения (точность установления							
аналогового тракта в %)							
Межканальное прохождение на							
частоте сигнала 10 кГц, коэффициенте	-62 дБ						
усиления _1' и макс. частоте запуска							
АЦП							
Смещение нуля без калибровки	макс. 3 МЗР						

Таблица 8 – Параметры аналогового тракта



Рисунок 19 – Внешний вид окна программы «*LGraph2*» при записи исходных данных на установке ЛИД-2М

После того, как выполнены все необходимые настройки, в ПО «*LGraph2*» происходит регистрация и запись файлов исходных данных. Файлы данных передаются в специально разработанное программное обеспечение для расчёта характеристик исследуемой среды.

Настройка параметров спектрометра и регистрация спектра излучения в установке ТИПАС-1 происходит посредством ПО *«PSI Line»*. Для правильного определения характеристик (параметров) сред в установке требуется провести проверку спектрометра S125-2048/14 на выполнимость закона Бугера-Бера [96-98] и линейность матрицы приёмника излучения. Проверка закона производилась в соответствии с методикой [98, 99]. В качестве экспериментальной среды было выбрано молоко, которое разбавлялось 20 раз, чтобы измерить спектр на разных концентрациях. Сначала регистрировался спектр $I_0(\lambda_i)$, прошедший через кювету

82

с дистиллированной водой. Следующим этапом была регистрация 20-ти спектров при разных концентрациях $I_1(\lambda_i)...I_{20}(\lambda_i)$, после чего производился расчёт по формуле (68)

$$\tau(\lambda_i) = LN\left(\frac{I_0(\lambda_i)}{I_1(\lambda_i)\dots I_{20}(\lambda_i)}\right),\tag{68}$$

с помощью, которой вычислялась оптическая толщина исследуемой среды. Расчёты осуществлялись для всех длин волн спектрометра. В результате построения графиков в диапазоне длин волн от 352,771 нм до 1105,565 нм с некоторым интервалом были выбраны те, для которых достаточно чётко прослеживалась линейная зависимость [98]. На рисунке 20 показано, что линейная зависимость спектрометра начинается, примерно, от значений τ от 0,4 до 2,5 для длин волн λ =575,8 нм и λ =1012,1 нм.



1 — длина волны 575,5 нм; 2 — длина волны 1012,1 нм Рисунок 20 — Логарифмическая шкала зависимости оптической толщины от концентрации частиц раствора молока

В результате проведенного эксперимента можно утверждать, что спектрометр в диапазоне длин волн от 575,5 нм до 1012,1 нм работает в линейном режиме при оптической толщине 0,4... 2,5.

Для проверки работы матрицы спектрометра S125-2048/14 производства фирмы *«Solar TII»* на линейность был проведён следующий эксперимент. Для его проведения использовалась галогенная лампа в качестве многоволнового источника излучения. В качестве уменьшения мощности излучения использовались нейтральные светофильтры марок HC-1, HC-6. Методика проведения эксперимента и расчётов следующая [98].

1. Регистрируется спектр *I*₀, который получен без использования светофильтров;

2. Регистрируется спектр *I*_{нс-1}, который получен при использовании светофильтра марки HC-1;

3. Регистрируется спектр *I*_{нс-6}, который получен при использовании светофильтра марки HC-6;

4. Регистрируется спектр $I_{\text{hc-1}}+I_{\text{hc-6}}$, который получен при одновременном использовании светофильтров марки HC-1 и HC-6;

5. Выполняется расчёт оптической толщины по формуле (69):

$$\tau_{HC-1} = LN\left(\frac{I_0}{I_{HC-1}}\right) \tag{69}$$

для всего набора длин волн;

6. Выполняется расчёт по формуле (70):

$$\tau_{HC-6} = LN\left(\frac{I_0}{I_{HC-6}}\right) \tag{70}$$

для всего набора длин волн;

7. Выполняется расчёт по формуле (71):

$$\tau_{HC-1+HC-6} = LN\left(\frac{I_0}{I_{HC-1}+I_{HC-6}}\right)$$
(71)

для всего набора длин волн, где *I* _{нс-1} и *I*_{нс-6}, спектры, зарегистрированные при прохождении через оба светофильтра сразу.

8. Производится сравнение результатов $\tau_{HC-1+HC-6}$ и $\tau_{HC-1} + \tau_{HC-6}$.

Эта проверка позволит понять, какие длины волн можно использовать для дальнейших расчётов по ТВСМ. На рисунке 21 представлен результат данного эксперимента. Все расчёты по формулам выполнялись в программе *«MS Excel»*.



Рисунок 21 – Графики зависимости оптической толщины от длины волны синий – $\tau_{Hc-1} + \tau_{Hc-6}$; красный – $\tau_{Hc-1+HC-6}$

Графики на рисунке 21 показывают, что приемник излучения спектрометра стабилен практически на всем диапазоне длин волн, так как нет значительных выбросов на синем графике. Небольшое отклонение прослеживается на границах его диапазона работы. В большинстве случаев это связано с чувствительностью матрицы спектрометра и характеристиками самого источника электромагнитного излучения.

Подводя итог проведённым экспериментам можно сделать заключение, что в ТИПАС-1 при использовании диапазона длин волн от 575,5 нм до 1012,1 нм рекомендуется использовать оптическую толщину среды в диапазоне от 0,4... 2,5.

В МММУ верхняя граница определяется значением 1,5, а нижняя – значением оптической толщины, больше нуля, т.е. выражением:

$$\tau(\lambda_i) = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) > 0 \tag{72}$$

На практике это значение немного выше и составляет 0,04-0,05. Из этого следует, что при совместном проведении измерении следует брать диапазон оптической плотности от 0,4 до 1,5.

3.2 Аналитическая и дискретная функции распределения частиц по размерам в методе малоуглового рассеяния

Для проверки реализованного алгоритма дискретной функции распределения был проведен модельный эксперимент с аэрозолем *TiO*₂, который распылялся с помощью ударно-волнового метода в камере объёмом 1 м³ [71]. Решение искалось в виде унимодальной и многопараметрической функций. В приложении Е представлены результаты обработки с использованием гаммафункции. Результаты этого же эксперимента обрабатывались с использованием 50-ти параметрической функции распределения и представлены в приложении Ж. Таблицы приложений Е и приложения Ж показывают, что в обоих вариантах обработки значения D_{32} близки друг к другу и разница не превышает 15% (2,0 мкм) для каждой точки по времени. Это связано с тем, что параметры «А5-A10» имеют незначительный вклад в общее распределение, которое не превышает 25% от всего распределения. Для всех моментов времени приложения Ж прослеживается мульмодальное распределение, которое должным образом не может быть описано функцией гамма-распределения. На рисунке 22 пик аналитической функции приходится примерно на 4 мкм, а сам график смещён немного вправо по сравнению с гистограммой. Это очевидно связано с тем, что нужно описать вклад последующих параметров за «А1» в общее распределение.



Рисунок 22 Многопараметрическая (слева) и функция гамма-распределения (справа) частиц по размерам для *t*=60,0 с

Аналогичный эксперимент и расчёты были произведены для Al_2O_3 . В приложении И представлены результаты обработки исходных данных функцией гамма-распределения. Результаты этого же эксперимента обрабатывались с использованием 50-ти параметрической функции распределения и представлены в приложении К. На рисунке 23 представлены обе функции распределения для первой точки по времени *t*=60,17 с. Здесь, так же как и в эксперименте с *TiO*₂ стоит отметить небольшой сдвиг вправо гамма-функции, вследствие влияния параметров «А5» - «А10».



Рисунок 23 Многопараметрическая (слева) и функция гамма-распределения (справа) частиц по размерам для *t*=60,17 с

87

В рассмотренных вариантах обработки видно, что значения D_{32} близки друг к другу и разница не превышает 3,5 мкм для каждой точки по времени. Приложение К показывает, что для всех времён, кроме двух последних прослеживается не одномодальное распределение, которое не может быть описано функцией гамма-распределения. На рисунке 24 для сравнения приведены аналитическая и многопараметрическая функции распределения частиц по размерам для последней точки по времени, где происходит их совпадение по форме.



Рисунок 24 Многопараметрическая (слева) и функция гамма-распределения (справа) частиц по размерам для *t*=599,8 с

В данном случае 50-ти параметрическая функция распределения фактически идеально описывается гамма-распределением.

Как видно из двух проведённых выше экспериментов, обработка исходных данных в МММУ в случае использования многопараметрической функции и в случае использования функции гамма-распределения частиц по размерам дает хорошее согласие по среднему значению, но может отличаться формой распределения частиц по размерам. Минимальное отклонение теоретических данных от экспериментальных (20) показано в последнем столбце таблиц соответствующих приложений. Меньшие значения Ω для 50-ти параметрической функции распределения свидетельствуют о более точном подборе вида распределения.

Ранее проводились эксперименты с порошком АСД-4, который распылялся пневматическим методом и обрабатывался 5-ти параметрической функцией распределения. Эти результаты хорошо согласуются с проведёнными выше и представлены в работах [71, 77].

Таким образом, можно сделать вывод, что предложенный подход, алгоритм и программа обработки исходных данных в методе малоуглового рассеяния позволяет точнее получить функцию распределения частиц дисперсной среды по размерам.

3.3 Аналитическая и дискретная функции распределения частиц по размерам в турбидиметрическом высокоселективном методе

Проверка реализованного алгоритма получения дискретной функции распределения частиц по размерам осуществлялась аналогично тому, как это было сделано в МММУ (п. 3.2). В качестве модельной среды для анализа дисперсности использовался аэрозоль Al_2O_3 [101], который распылялся импульсным методом в камере объёмом 1 м³. Спектры $I_0(\lambda_i)$, $I(\lambda_i)$ при прохождении излучения через воздух и Al_2O_3 представлены на рисунке 25 графиками синего и красного цвета соответственно.



Рисунок 25 – Спектры излучения $I_0(\lambda_i)$ и $I(\lambda_i)$ Al_2O_3

График оптической плотности для спектров выше представлен на рисунке 26.



Рисунок 26 – График зависимости оптической плотности от длины волны для Al_2O_3

Обработка исходных данных осуществляется в соответствии с алгоритмом ТВСМ. В приложении Л представлены результаты обработки в виде функции гамма-распределения частиц по размерам.

Результаты этого же эксперимента обрабатывались с использованием 60-ти параметрической функции распределения и представлены в приложении М.

Оба варианта обработки демонстрируют значения D_{32} , близкие друг к другу. Таблица М.1 показывает, что для времён t=1,0 с; t=1,3 с; t=2,0 с; t=2,3 с; t=3,0 с; t=3,3 с прослеживается мультимодальное распределение (рисунок 27), а во всех остальных случаях мономодальное (рисунок 28).



Рисунок 27 Многопараметрическая (слева) и функция гамма-распределения (справа) частиц по размерам для *t*=1,0 с



Рисунок 28 Многопараметрическая (слева) и функция гамма-распределения (справа) частиц по размерам для *t*=0,6 с

Значения *D*₃₂ для всех моментов времени при этом отличаются незначительно, и лежат в пределах 10%.

Аналогичный эксперимент и расчёты были проведены для аэрозоля TiO_2 . На рисунке 29 графиком синего цвета представлен спектр $I_0(\lambda_i)$ при прохождении излучения через воздух, а спектр $I(\lambda_i)$ – графиком красного цвета.



Рисунок 29 – Спектры излучения $I_0(\lambda_i)$ и $I(\lambda_i)$ для TiO_2





Рисунок 30 – График зависимости оптической плотности от длины волны для *TiO*₂

Дальнейшая обработка результатов эксперимента осуществляется в соответствии с алгоритмом ТВСМ. В приложении Н представлены результаты

обработки с получением результата в виде функции гамма-распределения частиц по размерам. Результаты этого же эксперимента обрабатывались с использованием 60-ти параметрической функции распределения и представлены в приложении П. Таблица П.1 показывает, что для времён t=1,6 с; t=2,0 с; t=2,6 с; t=3,0 с; t=3,3 с прослеживается не гамма распределение (рисунок 31), а во всех остальных случаях одномодальное (рисунок 32).



Рисунок 31 Многопараметрическая (слева) и функция гамма-распределения (справа) частиц по размерам для *t*=1,6 с



Рисунок 32 Многопараметрическая (слева) и функция гамма-распределения (справа) частиц по размерам для *t*=0,3 с

Во всех моментах времени размер D_{32} отличается незначительно и лежит в пределах 5%.

Таким образом, можно сделать вывод, что предложенный алгоритм и программа обработки исходных данных по ТВСМ в случае использования многопараметрической функции и в случае использования функции гаммараспределения частиц по размерам дает хорошее согласие между собой по среднему объёмно-поверхностному диаметру частиц дисперсной среды D_{32} , но может отличаться формой распределения [71, 100, 101]. Минимальное отклонение теоретических данных от экспериментальных показано в последнем столбце таблиц Л.1, М.1, Н.1 и П.1. Меньшие значения Ω для 60-ти параметрической функции распределения свидетельствуют о более точном подборе вида распределения.

3.4 Дискретная функция распределения частиц по размерам при одновременном использовании 2-х оптических методов

Для проверки разработанного алгоритма объединения результатов измерения оптических методов и программы расчёта многопараметрической функции распределения частиц по размерам в широком диапазоне, концентрации и удельной площади поверхности частиц использовались ранее проведенные исходные данные с аэрозолями TiO_2 и Al_2O_3 . Эти исходные данные содержат в себе информацию об индикатрисах рассеяния и спектрах поглощения с обеих установок. Объединение методов можно осуществлять при нормировках (58, 59), тогда функция распределения будет состоять из 70 или 108 параметров распределения, но при этом результаты расчётов будут одинаковые. В данном случае расчёт осуществлялся по формуле (58).

Данные обрабатывались отдельно разработанной программой, в которой реализован алгоритм объединения. Она позволяет рассчитывать 50 параметров для МММУ и 60 параметров для ТВСМ. Сращивание методов осуществлялось в диапазоне от 1 до 3 мкм. На всём диапазоне от 30 нм до 100 мкм производился расчёт с 70-ти параметрической функцией распределения частиц по размерам, вследствие того, что нормировка осуществлялась выражением (58). Диапазоны распределения приведены в приложении Р.

После обработки эмпирических данных *Al*₂*O*₃ разработанной программой были получены результаты, представленные в приложении С.

Из таблицы приложения С.1 видно, что функции распределения не имеют унимодальный характер, однако как показано в строках с моментами времени 0,3 с, 0,6 с, 1,6 с вид распределения крайне близок к гамма распределению. Полученные результаты хорошо согласуются с данными оптического анализатора *Spraytec* компании *«Malvern Instruments»*.

После обработки исходных данных TiO_2 разработанной программой были получены результаты, представленные в приложении Т. Из таблицы Т.1 приложения видно, что функции распределения не имеют строгого унимодального вида, однако к виду гамма-распределения очень близки следующие моменты времени: 0,3; 0,6; 1,6; 2,0; 2,6. Полученные результаты хорошо согласуются с данными оптического анализатора *Spraytec* компании *«Malvern Instruments»*.

Выводы по главе 3.

проведён краткий анализ оборудования в установке ЛИД-2М;

• проведён экспериментальный анализ границ использования спектрометра по оптической толщине и диапазону длин волн в установке ТИПАС-1;

• определены границы применения при совместном использовании экспериментальных установок;

• проведены модельные эксперименты на аэрозолях Al₂O₃ и TiO₂, а также их анализ при обработке исходных данных с использованием аналитической и дискретной функций распределения частиц по размерам в МММУ;

• проведены модельные эксперимент на аэрозолях *Al₂O₃* и *TiO₂*, а также их анализ при обработке исходных данных с использованием аналитической и дискретной функций распределения частиц по размерам в TBCM;

• проведена обработка исходных данных при совместном использовании двух методов на аэрозолях Al_2O_3 и TiO_2 .

4 АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

4.1 Оценка погрешностей разработанного подхода

Чтобы оценить значения D_{32} при использовании функции гаммараспределения и многопараметрической функции распределения в проведенных экспериментах с Al_2O_3 и TiO_2 использовалась оценка по *t*-критерию Стьюдента [102]. Выбор этого критерия связан с тем, что он позволяет анализировать зависимые выборки, а также критерий достаточно устойчив при отклонениях от нормального распределения. Для сравнения результатов экспериментов требуется попарная оценка D_{32} по времени, которая будет рассчитываться по следующему алгоритму:

1. Вычисляем среднюю разность выборки по формуле

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i,j=1}^{n} (x_i - x_j)}{n},$$
(73)

где
$$\sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i)$$
 - сумма разностей парных вариант;

n – число парных наблюдений (здесь n=10, так как анализируются 10 моментов времени).

2. Определяем стандартное отклонение (среднеквадратическое отклонение выборки)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left[\left(x_i - y_i \right) - \bar{x_i} \right]^2}{N - 1}}$$
(74)

3. Вычисляем стандартную ошибку среднего

$$\mu = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \tag{75}$$

4. Вычисляем *t* расчётное:

$$t_{pacuemone} = \frac{\bar{x}}{\mu}$$
(76)

5. Вычисляем число степеней свободы.

$$df = N - 1 \tag{77}$$

На последнем этапе определяем достоверность различий, сравнивая $t_{pacuëmhoe}$ и $t_{madonuчhoe}$. В случае, если $t_{pacuëmhoe}$ входит в критическую область $(-\infty; -t_{madonuчhoe}) \cup (t_{madonuчhoe}; +\infty)$, то гипотеза о равенстве средних отвергается, иначе принимается с вероятностью ошибки первого рода исходя из таблицы *t*критерия Стьюдента. Во всех расчетах использовался уровень значимости $\alpha = 0.05$, а число степеней свободы df = 9.

Чтобы оценить сходство функций распределения пришлось предварительно преобразовать диапазоны распределения оптического анализатора *Spraytec* и 70ти параметрической функции распределения к одному общему диапазону, в котором стало 20 параметров. После этого производилась оценка по формуле:

$$r_{xy} = \left[1 - \frac{1}{2} \sum_{x,y=1}^{20} \left| f_x(D) - f_y(D) \right| \right] \cdot 100\%$$
(78)

где $f_x(D) - функция,$ полученная совместной обработкой;

 $f_{y}(D) - функция, полученная Spraytec;$

х – номер столбца полученный совместной обработкой;

у – номер столбца полученный Spraytec.

Оценка тесноты связи приведена в таблице 9 и оценивается по шкале Чеддока.

Теснота связи	Значение коэффициента корреляции
Слабая	0,1-0,3
Умеренная	0,3-0,5
Заметная	0,5-0,7
Высокая	0,7-0,9
Весьма высокая	0,9-1

Таблица 9 Шкала Чеддока для классификации силы связи

Анализировались *D*₃₂ приложений Е и Ж, И и К, Л и М, Н и П, С, Т.

В установке ЛИД-2М для *TiO*₂ исходя из *D*₃₂ данных приложений Е и Ж получились следующие результаты (таблица 10).

Таблица 10 Анализ D_{32} аэрозоля TiO_2 полученного импульсным методом на установке ЛИД-2М

<i>t</i>	t	Гамма-функция, <i>D</i> ₃₂	50-ти параметрическая
^и расчётное	^и табличное	(среднее)	функция, <i>D</i> ₃₂ (среднее)
-1,67	2,26	11,9	12,2

В установке ЛИД-2М для *Al₂O₃* исходя из *D₃₂* данных приложений И и К получились следующие результаты, представленные в таблице 11.

Таблица 11 Анализ D_{32} аэрозоля Al_2O_3 полученного импульсным методом на установке ЛИД-2М

+	+	Гамма-функция, D ₃₂	50-ти параметрическая
^L pacчётное	^и табличное	(среднее)	функция, <i>D</i> ₃₂ (среднее)
-0,67	2,26	9,0	9,3

В установке ТИПАС-1 для *Al₂O₃* исходя из *D₃₂* данных приложений Л и М получились результаты, приведённые в таблице 12.

Таблица 12 Анализ D_{32} аэрозоля Al_2O_3 полученного импульсным методом на установке ТИПАС-1

t	t	Гамма-функция, <i>D</i> ₃₂	60-ти параметрическая
^и расчётное	^и табличное	(среднее)	функция, <i>D</i> ₃₂ (среднее)
0,87	2,26	2,2	2,2

В установке ТИПАС-1 для *TiO*₂ исходя из *D*₃₂ данных приложений Н и П получились следующие расчёты (таблица 13).

Таблица 13 Анализ D_{32} аэрозоля TiO_2 полученного импульсным методом на установке ТИПАС-1

t	t	Гамма-функция, <i>D</i> ₃₂	60-ти параметрическая
^и расчётное	^и табличное	(среднее)	функция, <i>D</i> ₃₂ (среднее)
-2,13	2,26	1,8	1,8

Оценка обработки в широком диапазоне размеров частиц при использовании исходных данных с обеих установок проводилась по D_{32} и виду функций распределения, значения которых сравнивались с результатами *Spraytec* компании «*Malvern Instruments*», приведёнными в приложении С и приложении Т. В таблице 14 приведены результаты анализа для D_{32} .

Таблица 14 Анализ D_{32} аэрозолей Al_2O_3 и TiO_2 полученных с использованием совместного метода обработки и *Spraytec* компании «*Malvern Instruments*»

Al	V_2O_3	TiO_2								
t pacчётное	t _{табличное}	t _{pacчётное}	t _{табличное}							
-2,12	2,26	-1,91	2,26							

В таблице 15 приводится сравнение вида функций распределения для обоих экспериментов на основании рассчитанного коэффициента корреляции Пирсона.

Для всех экспериментов $t_{pacuëmhoe}$ находится между диапазонов $(-\infty; -2,262) \cup (2,262; +\infty)$, поэтому нулевая гипотеза $H_0: a_x = a_y$ о равенстве средних не отвергается, на уровне значимости 0,05. Во всех расчётах коэффициент корреляции Пирсона имеет тесноту связи от заметной до близкой к функциональной.

Таблица 15 Анализ видов функции распределения аэрозолей Al_2O_3 и TiO_2 полученных с использованием совместного метода обработки и Spraytec компании «Malvern Instruments»

Draws	Al_2O_3	TiO ₂						
Время, сек	Коэффициент корреляции, <i>r</i> _{xy}	Коэффициент корреляции, <i>r</i> _{xy}						
0,3	82,95	0,98						
0,6	73, 58	0,98						
1,0	85,78	0,98						
1,3	71,30	0,98						
1,6	77,26	0,82						
2,0	72,14	0,81						
2,3	72,37	0,94						
2,6	83,16	0,73						
3,0	71,72	0,73						
3,3	70,87	0,84						

4.2 Методика проведения измерений и расчётов

4.2.1 Основные положения

Чтобы определять дисперсные характеристики аэрозольных сред необходимо описать последовательность действий при обработке исходных данных, но сначала следует условиться что:

• установлены предварительные настройки оборудования, соответствующие программной реализации (в ЛИД-2М: коэффициенты усиления, поправочные коэффициенты, длина оптического пути, число каналов приема, путь к файлам эксперимента, расстояние до фотоприёмников; в ТИПАС-1: путь к

файлам эксперимента, длина оптического пути, путь к файлу с информацией о комплексном показателе преломления материала исследуемых частиц);

• оптическая плотность для МММУ и ТВСМ выше уровня чувствительности и ниже максимальной границы;

• определяемые частицы не взаимодействуют (реагируют) с дисперсионной средой;

• материал определяемых частиц достаточно прозрачен для ТВСМ, иначе граница применения метода сужается.

4.2.2 Совместная обработка результатов эксперимента

Получение исходных данных, а также их обработка осуществляется в соответствии со следующим алгоритмом:

1. включается установка ЛИД-2М (лазер, блок усилителей, ПК);

2. включается установка ТИПАС-1 (спектрометр, блок питания, блок источника излучения);

3. не менее 15 минут следует выдержать до проведения экспериментов, для прогрева источников зондирующего излучения;

4. запускается программа *LGraph2* и производится её настройка (если требуется);

5. запускается программа *Psi_Line v4.62* и производится её настройка (если требуется);

6. производится распыления исследуемого образца с регистрацией программой *LGraph2*, где обязательным моментом является предварительное снятие фона в течение нескольких секунд до распыления;

7. производится распыления исследуемого образца с регистрацией спектров затухания программой *Psi_Line v4.62*, где обязательным этапом является снятие опорного спектра (спектр без дисперсной фазы);

8. формируется файл *Complex.txt* для внесения априорной информации о комплексном показателе преломления;

9. файлы с исходной (экспериментальной) информацией размещаются по пути, указанному в программе обработки;

10. запускается программа «*mmmu_tvsm.exe*» для обработки исходных данных, если осуществляется раздельная обработка, то запускается соответственно программа «*mmmu.exe*» или «*tvsm.exe*»);

11. в программе задается, с какой точки времени эксперимента и с каким шагом будет осуществляться расчёт параметров среды в широком диапазоне (только при совместной обработки);

12. программа осуществляет расчёт дисперсных характеристик исследуемой среды в соответствии с алгоритмом совместной (раздельной) обработки;

13. программа выдаёт результат анализа шестью файлами в формате «*.csv»: счётные и массовые функции распределения частиц по размерам для ЛИД-2М; ТИПАС-1; совместная обработка. В каждом файле имеются: «время, сек» - относительное время регистрации экспериментальных точек; «A1», «A2», «A3».... «A_n» - параметры распределения; «D32, мкм» - значения среднего объёмного-поверхностного диметра частиц в микрометрах; «Cm, г/м3» - итоговая массовая концентрация частиц в г/м³; «SSA, м2/г» - удельная площадь поверхности частиц в м²/г.

На рисунке 33 показана часть файла «RESULT_FD_ITOG.csv» с совместной обработкой исходных данных для *TiO*₂.

1	A	B	C	D	E	F		G	H	I	J	K	L	М	N	0	P	Q	R	S	1	ſ	U	V	W	χ	Ŷ	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AJ	AK	AL I	BS BT	BU	BV
1 3	ительное врем	IS A1	A2	2 A3	A4	A5	A	j .	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A1	8 A14	A15	A16	A17	A18	A1	9 A.	20 A	21	A22	A23	A24	A25	A26	A27	A28	A29	A30	A31	1 A3	A36	AEA	70 D32_FD_ITOG, мкм	Cm_FD_ITOG, r/m3	SSA_FD_ITOG, m2/i
2	0,333333	3 0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	()	0 0),98	0	0	0	0,002	0,014	0	0	9E-04	1 0	0	0	0,004	0	0 28,04295	21,48982	0,082109
3	0,666667	7 0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	()	0 0),97	0	0	0	0,005	0,018	0	0	0	0	0	0	0,004	0	0 27,22374	<mark>5,98678</mark> 3	0,086014
4	1	L 0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	()	0 0),87	0	0	0	0,013	0,085	0	0	0,006	i 0	0	0	0,023	0	0 28,0675	3,858502	0,081997
5	1,333333	3 0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	()	0 0),92	0	0	0	0,013	0,055	0	0	0		0	0	0,01	0	0 27,33087	<mark>6,825482</mark>	0,085482
6	1,666667	7 0	0	0	0	0	0,	294	0,34	0,34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	()	0 0),02	0	0	0	5E-04	0,002	0	2E-04	1 0	4E-0	4 0	0	0	0	0 17,3265	10,33186	0,085504
7	2	2 0	0	0	0	0	0,	096	0,58	0,29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	()	0	0	0,033	0,004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 5,331513	18,58188	0,277873
8	2,333333	3 0	0	0,7	6 0	0,0	ļ	0	0	0	0	0	0	0,09	0	0,11	. 0	0	0	0	()	0	0	0	0	0	2E-06	2E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0 18,02324	3,16652	0,082198
9	2,666667	7 0	0	0	0	0	(),2	0,45	0,25	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	()	0	0	0	0	0	6E-05	4E-04	0	0	3E-05	5 1E-0	4 0	0	0	0	0 18,06991	5,570045	0,081986
10	3	3 0	0	0	0	0	0,	174	0,3	0,39	0	0	0	0	0	0	0	0,043	0	0	0,0	137 0,	,04 (),01	0	0	0	4E-05	3E-04	0	0	2E-05	5 8E-0	5 0	0	0	0	0 18,05522	22,82072	0,082053
11	3,333333	3 0	0	0	0	0	0	,27	0,09	0,18	0,225	0,1	0	0	0	0	0	0,02	0	0,0	2 0,0	02 0,	,04	0	0	0	0	1E-05	4E-05	5E-06	5 3E-06	5 0	8E-0	6 0	0	0	0	0 17,21564	4,533728	0,086054

Рисунок 33 – Результат работы программы при математическом объединение МММУ и ТВСМ

103

Весь диапазон разбит на 70 параметров, при этом с параметра A1 по A20 работает ТВСМ, а с параметра A23 по A70 работает МММУ. В ТВСМ каждый диапазон равен 50 нм, а в МММУ почти все по 1 мкм.

Результаты работы использовались в учебном процессе БТИ АлтГТУ (приложение У) и при выполнении тематик в ИПХЭТ СО РАН (приложение Ф).

В перспективе разработанный программный комплекс может обрабатывать исходные данные с объединённой установки (на физическом уровне), вариант которой представлен на рисунке 34.



Рисунок 34 – Принципиальная схема работы установки с использованием двух методов измерений

Выводы по главе 4.

• проанализировано равенство средних значений *D*₃₂ при аппроксимации функцией гамма-распределения и разработанной многопараметрической функцией с помощью *t*-критерия Стьюдента;

• проанализировано равенство средних значений *D*₃₂ разработанной многопараметрической функцией с расширенным диапазоном и оптическим

анализатором Spraytec компании «Malvern Instruments» с помощью tкритерия Стьюдента;

• проведена оценка сходства вида функций распределения разработанной многопараметрической функцией с расширенным диапазоном и оптическим анализатором *Spraytec* компании *«Malvern Instruments»* с помощью коэффициента корреляции Пирсона;

• изложена методика выполнения измерений при совместной и раздельной обработке исходных данных с установок ЛИД-2М и ТИПАС-1;

• предложен вариант объединения установок на физическом уровне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы разработан объединенный метод обработки результатов измерений дисперсных характеристик и концентрации частиц аэрозоля на основе данных, полученных модифицированными методами малых углов и спектральной прозрачности.

Объединение двух оптических методов измерений позволило существенно расширить диапазон размеров измеряемых частиц (от 30 нм до 100 мкм), что является прорывным результатом в области измерений дисперсных характеристик аэрозольных сред. Автоматизация всех этапов обработки результатов измерений проводилась с использованием разработанных оригинальных алгоритмов параллельных вычислений, что было необходимо ввиду большого объема вычислений.

Предложенные новые алгоритмы реализованы в виде программного комплекса, полностью автоматизирующего процесс измерений. Практическая значимость данной реализации заключается в существенном повышении скорости обработки результатов от часов до нескольких секунд и исключении ошибок оператора, а также в повышении точности расчетов.

Основными выходными данными программного комплекса являются функция распределения частиц по размерам, концентрация частиц аэрозоля и удельная площадь поверхности частиц. Функция распределения частиц по размерам ищется в виде многопараметрической дискретной функции, что позволяет определять её более точный вид. До сих пор этого не было реализовано в данных оптических методах.

В перспективе развития методов обработки результатов измерений предлагается создание в рамках программного комплекса базы данных о физических характеристиках сред (комплексный показатель преломления на различных длинах волн), что позволит расширить возможности метода. Сохранение всех функций распределений в базу данных позволит не проводить предварительные теоретические расчёты до начала экспериментов, что дает возможность анализировать дисперсные характеристики частиц аэрозолей в реальном времени.

Возможно увеличение числа параметров распределения, но при дальнейшей оптимизации методов.

Сокращение/условное	Детальная расшифровка
АЦП	Аналого-цифровой преобразователь
НС	Нейтральный светофильтр
ПО	Программное обеспечение
IDE	Комплекс программных средств, предназначенный для разработки программного обеспечения.
$m(\lambda_i)$	Комплексный показатель преломления частиц, который зависит от длины волны и записывается в виде: $j - i\xi$, где j – действительная часть (показатель преломления материала частиц); I – мнимая часть (показатель поглощения материала частиц; ξ – мнимая единица $(\sqrt{-1})$
$Q\!\!\left(\!rac{\pi D}{\lambda_i},\!m\!\left(\lambda_i ight) ight)$	Фактор эффективности ослабления
TBCM	Турбидиметрический высокоселективный метод
ММУ	Метод малых углов
МММУ	Модифицированный метод малых углов
МСП	Метод спектральной прозрачности
D	Диаметр частиц
$\frac{\pi D}{\lambda_i}$	Параметр Ми
D ₃₂	Средний объёмно-поверхностный диаметр частиц
ОЗУ	Оперативно-запоминающее устройство компьютера (оперативная память)
$ au_{\lambda_i}$	Оптическая толщина на определённой длине волны, равная отношению $LN\left(\frac{I_0}{I}\right)$

Список сокращений и условных обозначений
λ	Длина волны
эксп	Экспериментальные расчеты
теор	Теоретические расчёты
лид	Лазерный измеритель дисперсности
ТИПАС	Турбидиметрический измеритель параметров аэрозольных сред
CPU	Центральное процессорное устройство
GPU	Графический процессор
l	Длина оптического пути
Re	Действительная часть комплексного числа
PCI	Шина периферийных компонентов
SSA	Удельная площадь поверхности
ЛНР	Логарифмически нормального распределения
ГР	Гамма-распределение

Список терминов

многопараметрическая функция распределения: Функция распределения, в которой используется более двух параметров распределения;

бимодальная (мультимодальная) функция распределения: Функция распределения, в которой имеется два и более максимумов;

счётная (численная, частичная) концентрация частиц: Число отдельных частиц в единице объема дисперсной систем $v = \frac{N}{V} \left[\frac{1}{m^3} \right]$, где V – общий объём

дисперсной системы; N – число частиц дисперсной фазы;

массовая концентрация частиц: Суммарная масса частиц в единице объёма;

С++: Высокоуровневый объектно-ориентированный, компилируемый, статистически типизированный язык программирования общего назначения;

фон: Значение собственной интенсивности сигнала фотоприёмников с интенсивностью зондирующего излучения, проходящего через дисперсионную среду;

шум: Собственная интенсивность сигнала фотоприёмников, без внешнего воздействия;

сигнал: Значение собственной интенсивности сигнала фотоприёмника совместно с интенсивностью дисперсной системы при зондирующем излучении;

дисперсная фаза: Мелкие твёрдые, жидкие или газообразные частицы;

дисперсионная среда: Твёрдая, жидкая или газообразная среда;

дисперсная система: Совокупность двух и более числа фаз химически невзаимодействующие между собой;

параллельный алгоритм: Реализованный по частям алгоритм на множестве различных вычислительных устройств и последующим объединением полученных результатов для получения корректного результата; *CUDA:* Программного-аппаратная архитектура параллельных вычислений от компании NVIDIA, позволяющая существенно увеличить вычислительную производительность благодаря использованию GPU;

параллелизм данных: Форма параллелизма, при которой одна операция выполняется сразу над всеми элементами массива данных;

опорный спектр: Спектр, полученный спектрометром при прохождении зондирующего излучения через дисперсионную среду;

модуляция: Способ, управляющий амплитудой, фазой, частотой и поляризацией потока в пространстве;

Список литературы

- Машиностроение. Энциклопедия [Текст] / В.В. Клюев [и др.]; под ред.
 В.В Клюева. Т Ш-7. М.: Изд-во: «Машиностроение» 1996. 464 с.
- Пискунов, В.Н. Теоретические модели кинетики формирования аэрозолей. Монография. [Текст] / В.Н. Пискунов. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2000. – 209 с.
- Рыжонков, Д.И. Наноматериалы [Электронный ресурс] : учебное пособие / Д. И. Рыжонков, В. В. Лёвина, Э. Л. Дзидзигури. – 3-е изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 365 с.
- 4. Якунина, И.В. Методы и приборы контроля окружающей среды.
 Экологический мониторинг : учебное пособие [Текст] / И.В. Якунина, Н.С. Попов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 188 с.
- Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. Annalen der Physik, Vierte Folge, Band 25, 1908, No. 3, p 377–445.
- D. Kühlke Optik: Grundlagen und Anwendungen Mit Abbildungen, Tabellen, Beispielen und Aufgaben mit Lösungen, Wissenschaftlicher Verlag: Harri Deutsch GmbH, Frankfurt am Main, 2011.
- Коваленко, И.Н. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие. [Текст] / И.Н. Коваленко, А.А. Филиппова – 2-е изд., перераб. и доп. – М: Высш. школа, 1982. – 256 с.
- Копысов, С. П. Промежуточное программное обеспечение параллельных вычислений. [Текст] / С. П. Копысов, А.К. Новиков. – Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет». 2012. 140с.
- Фейнман, Р. Фейнмановские лекции по физике. Т. 4. Кинетика. Теплота. Звук [Текст] / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс, перевод Ефремов А.В., Копылов Г.И., Симонов А.Ю., Хрусталев О.А. Изд-е 3е, М.: Мир. Редакция литературы по физике, 1976, 258 с.

- Киселев, Е.С. Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля: Учебное пособие [Текст] / Е.С. Киселев. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 186 с.
- Коузов П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов [Текст] / П.А. Коузов. – 3-е изд. перераб. – Л.: Химия, 1987. – 264 с.
- Физика быстропротекающих процессов [Текст] / А. Штенцель [и др.]; под ред. Н.А. Златина, Т. 1, М: Мир, 1971. – 342 с.
- 13. Титов С.С., Павленко А.А., Архипов В.А., Ахмадеев И.Р., Бондарчук С.С., Мецлер Э.А., Жирнов А.А. Бесконтактные дистанционные методы определения параметров гетерогенных сред // «Химия под исследования, инновации, знаком сигма»: технологии: тезисы докладов V Всероссийской научной молодежной школыконференции, Омск, ИППУ СО РАН, 15-20 мая 2016. – Омск: Изд-во ИППУ СО РАН, 2016. С. 75-76.
- 14. Sharpe, R.S. Research techniques in nondestructive testing, Ed. Academic press, London and New York, 1970.
- Шифрин, К.С. Рассеяние света в мутной среде [Текст] / К.С. Шифрин.
 М: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1951.
- Мухачева, Е.С. Коллоидная химия. Шпаргалка [Текст] / Е.С. Мухачева, Е.С. Оробейко, С.В. Егоров. Саратов: Научная книга, 2009. 310 с.
- Фейнман, Р. Фейнмановские лекции по физике. Т. З. Излучение.
 Волны. Кванты [Текст] / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс, перевод Ефремов А.В., Копылов Г.И., Симонов А.Ю., Хрусталев О.А. Изд-е 3е, М.: Мир. Редакция литературы по физике, 1976, 235 с.
- Физико-химические методы анализа [Текст] / А.К. Бабко [и др.]; М.: Высшая школа, 1968. – 334 с.

- Крешков, А.П. Курс аналитической химии. Качественный анализ [Текст] / А.П. Крешков, А.А. Ярославцев. – 3-е изд., стереотипное. – М: Химия, 1968. – 312 с.
- 20. Соколовский, А.Е. Физико-химические методы анализа: Тексты лекций по дисциплине «Аналитическая химия и физико-химические методы анализа» для студентов химико-технологических специальностей заочной формы обучения [Текст] / А.Е. Соколовский, Е.В. Радион. Минск.: БГТУ, 2007. 128 с.
- Ландсберг, Г.С. Оптика. Учебн. пособие: Для вузов [Текст] / Г.С. Ландсберг. 6-е изд., стереот. М.: Физматлит, 2003. 848 с.
- Смит, А. Прикладная ИК-спектроскопия [Текст] /: Пер. с англ. Б.Н. Тарасевича – М.: Мир, 1982. – 328 с.
- 23. Теоретические и прикладные проблемы рассеяния света [Текст] / Под ред. Б.И. Степанова и А.П. Иванова. Минкс: Наука и техника, 1971. 487 с..
- 24. Ахмадеев, И.Р. Метод и быстродействующая лазерная установка для исследования генезиса техногенного аэрозоля по рассеянию луча в контролируемом объеме [Текст]: дис. канд. техн. наук: 01.04.01 защищена 26.06.2008 / Ахмадеев Игорь Радикович. – Бийск, 2008. – 86 с.
- 25. Справочник по лазерам [Текст] / Под ред. А.М. Прохорова. В 2-х томах. Т.1 М: Советское радио, 1978. 504 с.
- Электрические измерения неэлектрических величин [Текст] / А.М.
 Туричин [и др.] 5-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергия, 1975. 576 с.
- Пажи, Д.Г. Основы техники распыливания жидкостей [Текст] /. Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. – М.: Химия, 1984. – 265 с.
- 28. Green, H. and W. Lane, Particulate clouds: Dust, Smokes and Mists. London, 1972.
- 29. Фукс, Н.А. Успехи механики аэрозолей [Текст] / Н.А. Фукс. М.: Академия наук СССР, 1961. 147 с.

- Архипов, В.А. Движение аэрозольных частиц в потоке : учеб. пособие [Текст] / В.А. Архипов, А.С. Усанина. – Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2013. – 92 с.
- 31. Библиотека алгоритмов 151 б-200 б: Справочное пособие [Текст] / М.И. Агеев. М.: Радио и связь, 1981. 184 с.
- 32. Библиотека алгоритмов 101 б-150 б: Справочное пособие [Текст] / М.И.Агеева. М: Радио и связь, 1978. 142 с.
- Колдаев, В.Д. Численные методы и программирование: учебное пособие [Текст] / Под ред. проф. Л.Г. Гагариной. М.: ИД «ФОРУМ»; ИНФРА-М, 2009. 336 с.
- 34. Архипов, В.А. Оптические методы диагностики гетерогенной плазмы продуктов сгорания: учеб. пособие [Текст] / В.А. Архипов, С.С. Бондарчук. – Томск: Томский государственный университет, 2010. – 265 с.
- 35. Фейнман, Р. Фейнмановские лекции по физике. Т. 7. Физика сплошных сред [Текст] / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс, перевод Ефремов А.В., Копылов Г.И., Симонов А.Ю., Хрусталев О.А. Изд-е 2е, М.: Мир. Редакция литературы по физике, 1977. – 288 с.
- Зубов, В.И. Функции Бесселя: Учебно-методическое пособие [Текст] /
 В.И. Зубов. М.: МФТИ, 2007. 51 с.
- 37. Абрамовиц, М. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами [Текст] / Под ред. М. Абрамовица, И. Стиган, перевод с анг. под редакцией В.А. Диткина и Л.Н. Кармазиной. – М.: Наука, 1979. – 832 с.
- 38. Титов, С.С. Турбидиметрический высокоселективный метод и быстродействующий измерительный комплекс определения параметров нестационарных многофазных сред [Текст]: дис. канд. техн. наук: 01.04.01 защищена 08.12.2011 / Титов Сергей Сергеевич. – Бийск 2011. – 153 с.

- Методы светорассеяния в анализе биологических сред [Текст] / В.Н.
 Лопатин [и др.]; М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 384 с.
- 40. Жирнов А.А., Ахмадеев И.Р., Павленко А.А., Кудряшова О.Б. Модифицированный метод малоуглового рассеяния: проблемы и пути решения // Информационные технологии в науке, экономике и образовании: материалы Всероссийской научно-практической конференции, г. Бийск г. Кизляр, БТИ АлтГТУ, 18-19 декабря 2013 г. Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2013. С. 45-47.
- 41. Жирнов А.А., Титов С.С., Кудряшова О.Б. Автоматизация определения дисперсных характеристик аэрозоля в оптических измерениях // Аэрозоли Сибири: тезисы докладов XXI Рабочей группы, г. Томск, ИОА СО РАН, 25-28 ноября 2014 г. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2014. – С. 81.
- 42. Гусев, В.Г. Электроника: Учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов [Текст] / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1991. 622 с.
- 43. Датчики измерительных систем: В 2-х книгах. Кн. 1 [Текст] / Ж. Аш [и др.]; Пер. с франц. под ред. А.С. Обухова. М.: Мир, 1992. 480 с.
- 44. Информационно-измерительная техника и электроника: учебник [Текст] / Г.Г. Раннев [и др.]; под ред. Г.Г. Раннева. 3-е изд., стереотип. М.: Академия, 2009. 512 с.
- 45. Информационно-измерительная техника и технологии [Текст] / Г.Г.
 Раннев [и др.]; под ред. проф. Г.Г. Раннева. М.: Высшая школа, 2002. –
 450 с.
- 46. Жирнов А.А., Павленко А.А., Кудряшова О.Б. Программный комплекс расчёта параметров конденсированных частиц в методах диагностики процессов образования и распространения аэрозольных сред // Материалы и технологии XXI века: доклады III Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов,

г. Бийск, ОАО ФНПЦ «Алтай», 18-20 сентября 2013 г. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2013. - С 19-23.

- 47. Боресков, А.В. Основы работы с технологией CUDA [Текст] / А.В.
 Боресков, А.А. Харламов. М.: ДМК Пресс, 2010. 232 с.
- Непейвода, Н.Н. Основания программирования [Текст] / Н.Н. Непейвода, И.Н. Скопин. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. – 868 с.
- 49. Баканов, В.М. Параллельные вычисления: Учебное пособие [Текст] / В.М. Баканов. М.: МГУПИ, 2006. 124 с.
- 50. Сандерс, Дж. Технология СUDA в примерах: введение в программирование графических процессоров [Текст] / Дж. Сандерс, Э. Кэндрот; Пер. с англ. А.А. Слинкина, научный редактор А.В. Боресков. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 232 с.
- 51. Гергель, В.П. Высокопроизводительные вычисления для многоядерных многопроцессорных систем. Учебное пособие [Текст] / В.П. Гергель. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2010. 421 с.
- Лафоре, Р. Объектно-ориентированное программирование в C++.
 Классика Computer Science [Текст] / Р. Лафоре. 4-е изд. СПб.: Питер, 2008. – 928 с
- 53. Компания STSS российский производитель широкого спектра высокотехнологичного компьютерного и серверного оборудования, поставщик современных ИТ-решений для корпоративных клиентов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.stss.ru/products/workstations/tesla/WX240T4.4-008LH.html дата обращения 11.07.2016.
- 54. Компания STSS российский производитель широкого спектра высокотехнологичного компьютерного и серверного оборудования, поставщик современных ИТ-решений для корпоративных клиентов [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

http://www.stss.ru/products/servers/Q-series/QX8516T4.2.html дата обращения 11.07.2016.

- 55. Казённов, А.М. Основы технологии CUDA [Текст] / А.М. Казённов // Компьютерные исследования и моделирования. 2010. – Т.2, № 3. – С. 295–308.
- 56. Приложения для вычисления на GPU [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.nvidia.ru/object/gpu-computing-applications-ru.html дата обращения 11.07.2016.
- 57. Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA: Учеб. пособие [Текст] / А.В. Боресков [и др.]. М.: Издательство Московского университета, 2012. 336 с.
- 58. CUDA и вычисления на GPU [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.nvidia.ru/object/cuda-parallel-computing-ru.html дата обращения 15.06.2016 г.
- Хортон, Айвор. Visual C++ 2010: полный курс [Текст] / А. Хортон., Пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2011. – 1216 с.
- 60. Зиборов, В.В., MS Visual C++ 2010 в среде .NET. Библиотека программиста [Текст] / В.В. Зиборов. СПб.: Питер, 2012. 320 с.
- 61. Фаронов, В.В., Delphi. Программирование на языке высокого уровня: Учебник для вузов [Текст] / В.В. Фаронов. – СПб.: Питер, 2005. – 640 с.
- 62. Shane, C., CUDA Programming A Developer's Guide to Parallel Computing with GPUs. Ed. Morgan Kaufmann, 2013.
- 63. CUDA Toolkit Download [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://developer.nvidia.com/cuda-downloads (дата обращения 13.07.2016);
- 64. Стахнов, А.А. Linux [Текст] / А.А. Стахнов. 4-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 752 с.
- 65. Титов С.С., Павленко А.А. Архипов В.А., Бондарчук С.С., Ахмадеев И.Р., Мецлер Э.А., Жирнов А.А. ОРТІСАL METHODS AND

ALGORITHMS FOR DETERMINATION OF FINE AEROSOL PARAMETERS // Dust 2014: Book of Abstracts International Conference on Atmospheric Dust, Италия, Castellaneta Marina (TA), 1-6 июня 2014 г. – Italy, Digilabs Pub., Bari, 2014. – С. 417.

- Березин, И.С. Методы вычислений, т. II [Текст] / И.С. Березин, Н.П. Жидков. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. – 620 с.
- 67. Дейрменджан, Д Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами [Текст] / Д. Дейрменджан; Под ред. К.Я. Кондратьева, пер. с англ. О.И. Смоктия. М.: МИР, 1971. 167 с.
- Золотых, Н.Ю. Комплексные числа: Учебное пособие [Текст] / Н.Ю.
 Золотых. З-е изд. Нижний Новгород: Издательство Нижегородского государственного университета, 2007. – 56 с.
- Борн, М Основы оптики [Текст] / М. Борн, Э. Вольф. 2-е изд., Перевод с англ. С.Н. Бреуса [и др.]; под ред. Г.П. Мотулевич. М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука» 1973. 720 с.
- 70. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии [Текст]
 / А.А. Агафонов [и др.]; под ред. В.Г. Радзиевского. М.: Радиотехника, 2006. – 424 с.
- 71. Жирнов, А.А. Параллельные вычисления в методе малоуглового рассеяния / А.А. Жирнов, И.Р.Ахмадеев, О.Б. Кудряшова // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2015. – № 8. – С. 46-50.
- 72. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях [Текст] / В.Ф. Кравченко [и др.]; под ред. В.Ф. Кравченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 544 с.
- 73. Жирнов А.А., Кудряшова О.Б. Алгоритм автоматизированной обработки модулированных сигналов, регистрируемых в оптических

методах измерения // Фотоника и оптические технологии: материалы Молодежной конкурс-конференции, г. Новосибирск, Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 14-16 апреля 2014 г. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. – С. 52.

- 74. Поскачей, А.А. Оптико-электронные системы измерения температуры
 [Текст] / А.А. Поскачей, Е.П.Чубаров. 2-е изд., перераб. и доп. М.:
 Энергоатомиздат, 1988. 248 с.
- 75. Жирнов А.А., Ахмадеев И.Р., Кудряшова О.Б. Автоматизация обработки результатов метода малоуглового рассеяния // Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов: доклады V Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, г. Бийск, ИПХЭТ СО РАН, 11-12 сентября 2014 г. Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2014. С. 194-198.
- 76. Жирнов, А.А. Разработка автоматизированного алгоритма обработки файлов эксперимента и его применение в модифицированном методе малоуглового рассеяния [Текст] / А.А. Жирнов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – №1. – С. 85-88.
- 77. Жирнов, А.А. Модификация турбидиметрического высокоселективного метода для измерения быстропротекающих процессов / А.А. Жирнов, С.С. Титов, О.Б. Кудрящова // Информационно-управляющие системы. 2016. № 3. С. 95-99.
- Прохоренок, Н.А. Программирование на C++ в Visual Studio 2010 Express. Глава 12. Ввод и вывод данных [Текст] / Н.А. Прохоренок. – Самара: СамИздат, 2010. – 80 с.
- 79. Малышкин, В.Э. Параллельное программирование мультикомпьютеров [Текст] / В.Э. Малышкин, В.Д. Корнеев. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2006. 439 с.

- Антонов, А.С. Параллельное программирование с использованием технологии OpenMP: учебное пособие [Текст] / А.С. Антонов. – М.: МГУ, 2009 – 77 с.
- Левин М.П. Параллельное программирование с использованием ОрепМР: учебное пособие [Текст] / М.П. Левин. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 118 с.
- 82. Определение параметров распределения частиц дисперсной среды по размерам в модифицированном методе малоуглового рассеяния: свидетельство № 2016615899 / авторы Кудряшова О.Б., Жирнов А.А.; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» ; заявл. 07.04.2016 ; опубл. 02.06.2016, заявка № 2016613349.
- Касперски, К. Техника оптимизации программ. Эффективное использование памяти [Текст] / К. Касперски. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 464 с.
- 84. Макконнелл, С. Совершенный код. Мастер-класс [Текст] / С. Макконнелл. Пер. с англ. М.: Издательско-торговый дом «Русская редакция»; СПб.: Питер, 2005. 896 с.
- Корниенко, В.С. Численные методы [Текст] / В.С. Корниенко;
 Волгоград: Волгогр. гос. с.-х. акад., 2010. 84 с.
- Ильина, В.А. Численные методы для физиков-теоретиков. I [Текст] / Ильина В.А., Силаев П.К. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. – 132 с.
- Прохоренок, Н.А. Программирование на C++ в Visual Studio 2010 Express. Глава 7. Работа с датой и временем [Текст] / Н.А. Прохоренок. – Самара: СамИздат, 2010. – 17 с.
- Ван де Хюлст, Г. Рассеяние света малыми частицами [Текст] / Г. ван де Хюлст. Пер. с англ. Т.В. Водопьянова, под ред. В.В. Соболева. – М: Изд-во иностранной литературы, 1961. – 537 с.

- 89. Жирнов А.А., Кудряшова О.Б. Численный метод и алгоритм в решении задачи восстановления функции распределения частиц аэрозоля по размерам // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики: материалы V Международной молодежной научной конференции, г. Томск, ТГУ, 25-27 ноября 2015 г. Томск: Изд-во ТГУ, 2015. С. 72-73.
- 90. Polyanskiy, M. Refractive index database [Электронный ресурс] / Mikhail Polyanskiy. Режим доступа: http://refractiveindex.info/?shelf=main&book=SiO2&page=Gao дата обращения 17.06.2016 г.
- 91. Критченкова А.М. Введение в технику эксперимента [Текст] / А.М.
 Критченкова. М.: Вторая школа, 2014. 18 с.
- 92. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений [Текст]
 / П.В. Новицкий, И.А. Зограф 2-е изд., перераб. и доп. Л.:
 Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1991. 304 с.
- 93. Селиванов, М.Н. Качество измерений: Метрологическая справочная книга [Текст] / М.Н. Селиванов, А.Э. Фридман, Ж.Ф. Кудряшова – Л.: Лениздат, 1987. – 295 с.
- 94. Гуревич, М.М. Фотометрия (теория, методы и приборы) [Текст] / М.М. Гуревич. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 272 с.
- 95. Электронные приборы и устройства на их основе: Справочная книга [Текст] / Ю.А. Быстров [и др.]. М.: ИП РадиоСофт, 2002 656 с.
- 96. Зуев, В.Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере [Текст] / В.Е. Зуев. М.: Радио и связь, 1981. 288 с.
- 97. Зуев, В.Е. Оптика атмосферного аэрозоля [Текст] / В.Е. Зуев, М.В. Кабанов. Л: Гидрометеоиздат, 1987. 255 с.
- 98. Загоруйко, А.С. Проверка линейности и построение характеристик фотодетекторов при помощи светофильтров с неизвестным

пропусканием [Текст] / А.С. Загоруйко, Ю.В. Троицкий // Автометрия. – 1982. – №2. – С. 93-94.

- 99. Границы применимости высокоселективного турбидиметрического метода / А.А. Жирнов [и др.] // Ползуновский вестник. – 2016. – Т.1, №4. – С. 55-58.
- 100. Ягодников Д.А. Экспериментальное исследование дисперсности конденсированных продуктов сгорания аэровзвеси частиц алюминия / Д.А. Ягодников, Е.И. Гусанченко // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, №2. С. 33-41.
- 101. Жирнов А.А., Титов С.С., Кудряшова О.Б. Многопараметрическая функция распределения частиц по размерам в турбидиметрическом высокоселективном методе // Аэрозоли Сибири: тезисы докладов XXII Рабочей группы, г. Томск, ИОА СО РАН, 24-27 ноября 2015 г. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2015. – С. 64.
- 102. Теория статистики: Учебник [Текст] / Г.Л. Громыко [и др.]; под. ред. проф. Г.Л. Громыко, 2-е издание, перераб. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2005. – 476 с.

Приложение А

(справочное)

Программный код расчёта фактора эффективности ослабления

```
/*-----Загружаем из файла предварительно рассчитанные значения КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ
ПРЕЛОМЛЕНИЯ (начало) -----*/
      int count=0;
      char buffer3[25];
      float DeistwitChast=0;
      float MnimayaChast=0;
      complex<double>mass[35];
      ifstream infile3("D:\\TVSM-experiment\\KOMPLEXraschet\\Complex 30 Al203.txt");
      while (!infile3.eof())
      {
             infile3.getline(buffer3, 25);
             size_t sizeSTROKI1=strlen(buffer3);
             for (int i=0; i<=sizeSTROKI1; i=i+1) // Преобразовываем "," в "." чтобы можно
было записать в массив float
                    {
                          if (buffer3[i]==',')
                                 buffer3[i]='.';
                    }
             sscanf_s(buffer3, "%f %f", &DeistwitChast, &MnimayaChast); // Разделяем строку на 2
числа
             count=count+1;
             mass[count]=complex<double> (DeistwitChast/1.333, -MnimayaChast/1.333); // для
измерения в кювете с водой
      }
      infile3.close();
      cout<<count<<endl; // всего 31
      /*-----Загружаем из файла предварительно рассчитанные значения КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ
ПРЕЛОМЛЕНИЯ (конец) -----*/
/*-----Находим ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ значения оптической толщины для всех длин волн (начало)-----
----*/
             double *TAU teoriya = new double[10000000];
             int Q=0; // Индексация массива
             int N=0;
             double nextQ=0.0;
             double QoslableniyaITOG=0.0;
             double SummQ_=0.0;
             double left2 = 0.022; //
             double right2 = 6.022; //
             double step2 = 0.01; //
             int numSteps2 = (right2-left2)/step2;
                    for (int i=1; i<count; i=i+1) // Рассчитываем для 30 длин волн
      {
                                 Q=Q+1;
                                 complex<double> massComplex=mass[i]; // =mass[i]
Мнимая часть должна быть со знаком "-"
                                 double D2=left2;
                                 double summINTEGRAL2=0.0;
                                 for (int q=1; q<=numSteps2; q=q+1) // Вычисление интеграла
                                       double parMI=(M_PI*D2)/(lambdaITOG[i]/1.333); // для
измерения в кювете с водой
                                       double nKomplex=1.0;
                                        complex<double> ArPre=(pow(tan(parMI*massComplex), -
1));
                                        complex<double> ksirPREPRE(cos(parMI),-sin(parMI));
                                        complex<double> ksirPRE(sin(parMI),cos(parMI));
```

complex<double> ksirPOS=(2*nKomplex-1)*ksirPRE/parMIksirPREPRE; // (Ksi1 расчитан) complex<double> ArPos=pow(nKomplex/(parMI*massComplex)-ArPre,-1)-nKomplex/(parMI*massComplex); // (A1 расчитано) complex<double>a r=((ArPos/massComplex+nKomplex/parMI)*real(ksirPOS)real(ksirPRE))/((ArPos/massComplex+nKomplex/parMI)*ksirPOS-ksirPRE); // (а1 расчитан) complex<double>b r=((ArPos*massComplex+nKomplex/parMI)*real(ksirPOS)real(ksirPRE))/((ArPos*massComplex+nKomplex/parMI)*ksirPOS-ksirPRE); // (b1 расчитан) ArPre=ArPos; // (ANminus1 = A1) ksirPREPRE=ksirPRE; ksirPRE=ksirPOS; double sumQ=(2*nKomplex+1)*(real(a_r)+real(b_r)); // Рассчитываем первый сумму певого члена последовательности do { nKomplex=nKomplex+1; ksirPOS=(2*nKomplex-1)*ksirPRE/parMIksirPREPRE;// (Ksi1 расчитан) ArPos=pow(nKomplex/(parMI*massComplex) -ArPre,-1)-nKomplex/(parMI*massComplex); // (A1 pacчитано) ArPre=ArPos; a r=((ArPos/massComplex+nKomplex/parMI)*real(ksirPOS)real(ksirPRE))/((ArPos/massComplex+nKomplex/parMI)*ksirPOS-ksirPRE); // (al pacчитан) b r=((ArPos*massComplex+nKomplex/parMI)*real(ksirPOS)real(ksirPRE))/((ArPos*massComplex+nKomplex/parMI)*ksirPOS-ksirPRE);// (b1 расчитан) if ((pow(real(an)-0.5,2)+pow(imag(an)-0.0,2)<=(0.001+pow(0.5,2))) || (pow(real(bn)-0.5,2)+pow(imag(bn)-0.0,2)<=(0.001+pow(0.5,2)))) // 0.0001 - Погрешность при попадании коэффициентов в линию окружности ksirPREPRE=ksirPRE; ksirPRE=ksirPOS; next0 = (2*nKomplex+1)*(real(a r)+real(b r)); // Сумма без первого члена (nKomplex-1) SummQ = sumQ*0.0000001;sumQ=sumQ+nextQ; // Сумма первого + остальные члены } else printf("Коэффициенты Ми вышли за пределы единичной окружности: %.5lf, %.5lf\n ",pow(real(an)-0.5,2)+pow(imag(an)-0.0,2),pow(real(bn)-0.5,2)+pow(imag(bn)-0.0,2)); while (SummQ <nextQ);</pre> QoslableniyaITOG=(2.0*sumQ)/(parMI*parMI); summINTEGRAL2=summINTEGRAL2+(QoslableniyaITOG*D2*D2*pow(D2,alfa)*exp(b*D2))*step2; // D2=D2+step2; } // Закончен цикл по D TAU_teoriya[Q]=summINTEGRAL2; // }

Приложение Б

(справочное) Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661974 (копия)

POCCINIICICASI DELLEPAILUSI

斑斑斑斑

密

密

密

樹

密

찕

密

斑

密

密

斑

斑

譾

盗

諁

撥 路

密语

斑斑

斑

叔

招

招路

路路

路路

资

语

斑

器

路

招

锑

撥

诩

招

招

资

密

撥

撥

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016661974

Программа для расчета коэффициента спектральной прозрачности

Правообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (RU)

Авторы: Кудряшова Ольга Борисовна (RU), Жирнов Анатолий Алексеевич (RU), Ворожцов Сергей Александрович (RU)

> Заявка № 2016619571 Дата поступления 08 сентября 2016 г. Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 26 октября 2016 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

-1'elless

Г.П. Ивлиев

网络路路路路

盗

密

密

密

密

密

密

斑

密

璨

斑

斑

斑

容容

路路路

镕

璨

斑

密密密密路

斑

樹

斑

諁

斑

斑

斑

斑

斑

斑

斑

斑

斑

斑

扭

撥

斑

Приложение В

(справочное)

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016615899 (копия)

POCCHINCKAN DELLEPAILINN

路路路路路路

褶

招

沒

봆

냆

嶽

斑

招

첪

斑

斑

諁

諁

滋

挠

斑

巍

嶽

嶽

撬

滾

盛姿

资

运运运运运

斑

资

譈

囟

斑

図

路路路路路路路路

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016615899

Определение параметров распределения частиц дисперсной среды по размерам в модифицированном методе малоуглового рассеяния

Правообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (RU)

Авторы: Кудряшова Ольга Борисовна (RU), Жирнов Анатолий Алексеевич (RU)

遊園遊園

茲

密

斑

斑

樹

密

密

密

斑

数

密

密

密

諁

密

斑

斑

斑

斑

斑

斑

斑

斑

斑

斑

南

密

路路路路

密

崧

密

密

密

密

斑

密

路路路

盗

路路

Заявка № 2016613349 Дата поступления 07 апреля 2016 г. Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 02 июня 2016 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев 1'ellere

Приложение Г

(справочное)

Анализ аэрозоля TiO₂ на Spraytec компании «Malvern Instruments»



2.15

88.89

1.48

46.42

99.98

0.02

1000.00

100.00

0.00

Приложение Д

(справочное)

Анализа аэрозоля Al₂O₃ на Spraytec компании «Malvern Instruments»



10 Sep 2011 - 11:46:54

Particle Size Distribution Al2O3_261016.smea\Exp 001 - 10 Sep 2011\Импульсный метод 1 3.psd Sample : Импульсный метод Start+46 (s)



Size (µm)	%N<	% N	Size (µm)	%N<	% N	Size (µm)	% N <	% N
0.117	0.00	0.00	2.51	64.27	8.27	54.12	100.00	0.00
0.136	0.00	0.00	2.93	71.66	7.39	63.10	100.00	0.00
0.158	0.00	0.00	3.41	78.10	6.44	73.56	100.00	0.00
0.185	0.00	0.00	3.98	83.54	5.45	85.77	100.00	0.00
0.215	0.00	0.00	4.64	88.00	4.45	100.00	100.00	0.00
0.251	0.00	0.00	5.41	91.50	3.51	116.59	100.00	0.00
0.293	0.00	0.00	6.31	94.16	2.66	135.94	100.00	0.00
0.341	0.00	0.00	7.36	96.11	1.94	158.49	100.00	0.00
0.398	0.00	0.00	8.58	97.47	1.37	184.79	100.00	0.00
0.464	0.00	0.00	10.00	98.40	0.93	215.44	100.00	0.00
0.541	0.00	0.00	11.66	99.01	0.61	251.19	100.00	0.00
0.631	0.00	0.00	13.59	99.40	0.39	292.87	100.00	0.00
0.736	0.01	0.01	15.85	99.65	0.25	341.46	100.00	0.00
0.858	1.63	1.62	18.48	99.80	0.15	398.11	100.00	0.00
1.00	8.20	6.58	21.54	99.89	0.09	464.16	100.00	0.00
1.17	17.31	9.10	25.12	99.94	0.05	541.17	100.00	0.00
1.36	27.24	9.94	29.29	99.97	0.03	630.96	100.00	0.00
1.58	37.29	10.05	34.15	99.98	0.02	735.64	100.00	0.00
1.85	46.95	9.66	39.81	99.99	0.01	857.70	100.00	0.00
2.15	55.99	9.04	46.42	99.99	0.00	1000.00	100.00	0.00

Приложение Е

(справочное)

Габлица Е.1 – Параметры распределения, полученные с использованием функ	ции
гамма-распределения частиц по размерам для <i>TiO</i> 2 на установке ЛИД-2М	

Номер п/п	Время измерения,	Наименование параметра		D ₃₂ ,	<i>Ст</i> , г/м ³	Оптическая	SSA, M^{2}/Γ	Ω
11/11	с	α	b	MIKW		толщина	WI / I	
1	60,0	1,2	0,31	13,5	6,75	0,38	0,10	0,12
2	120,1	1,1	0,31	13,2	4,82	0,28	0,11	0,11
3	180,0	1	0,31	12,9	4,91	0,29	0,11	0,13
4	240,0	0,9	0,31	12,5	4,15	0,25	0,11	0,12
5	300,0	0,8	0,31	12,2	4,02	0,25	0,12	0,12
6	360,0	0,7	0,31	11,9	3,82	0,24	0,12	0,13
7	420,1	0,5	0,31	11,2	3,81	0,26	0,13	0,13
8	480,1	0,5	0,31	11,2	3,58	0,24	0,13	0,15
9	543,3	0,7	0,31	11,9	1,00	0,06	0,12	0,10
10	599,2	0,6	0,41	8,7	0,70	0,06	0,16	0,09

Приложение Ж

(справочное)

Таблица Ж.1 – Параметры распределения, полученные с использованием параметрической функции распределения для *TiO*₂ на установке ЛИД-2М

Howen	Время	Наименование параметра / Диапазон, мкм								
п/п	измерения,	A1	A2-A4	A5	A6	A7	A8			
	c	1-2	2-8	8-10	10-12	12-14	14-16			
1	60,0	0,76		0,04	0,15	0,01	0			
2	120,1	0,76		0,04	0,16		0,01			
3	180,0	0,76		0,04	0,17	0	0			
4	240,0	0,76		0,04	0,17	0				
5	300,0	0,855	0	0,045	0,08		0,01			
6	360,0	0,855		0,045	0,075	0,015				
7	420,1	0,855		0,045	0,08	0,01	0			
8	480,1	0,855		0,045	0,08	0,01				
9	543,3	0,855		0,045	0,08	0,01				
10	599,2	0,855		0,045	0,09	0,005	0,005			

Номер	Наимен	Наименование параметра /						
п/п	Д	иапазон, м	IKM	D ₃₂ ,	Cm,	Оптическая	SSA,	0
	A9	A10	A11-A50	мкм	г/м ³	плотность	м ² /г	22
	16-18	18-20	20-100					
1	0,01	0,03		13,7	6,78	0,38	0,10	0,04
2		0,03		13,5	4,88	0,28	0,10	0,04
3		0,03		13,3	5,01	0,29	0,11	0,04
4	0	0,03		13,3	4,35	0,25	0,11	0,04
5		0,01		11,9	3,85	0,25	0,12	0,04
6		0,01	0	11,7	3,69	0,24	0,12	0,04
7	0,005	0,005		11,4	3,76	0,26	0,12	0,04
8	0,005	0,005		11,4	3,53	0,24	0,12	0,04
9	0	0,01		11,7	0,96	0,06	0,12	0,04
10		0		10,4	0,81	0,06	0,14	0,04

Продолжение таблицы Ж.1

Приложение И

(справочное)

Таблица И.1 – Параметры распределения, полученные с использованием функции гамма-распределения частиц по размерам для Al_2O_3 на установке ЛИД-2М

Номер	Время измерения,	Наименование параметра		D ₃₂ ,	<i>Ст</i> , г/м ³	Оптическая	SSA,	Ω
п/п	c	α	b	МКМ		плотность	М-/Г	
1	60,17	1,4	0,31	14,1	2,60	0,14	0,10	0,10
2	120,2	0,8	0,31	12,2	1,76	0,11	0,12	0,12
3	180,1	0,5	0,31	11,2	1,33	0,09	0,13	0,16
4	240,3	0,4	0,31	10,9	1,06	0,07	0,13	0,14
5	300,0	0,5	0,41	8,5	0,57	0,05	0,17	0,07
6	360,4	0,2	0,41	7,8	0,52	0,05	0,19	0,14
7	420,3	0,6	0,51	7,0	0,53	0,06	0,21	0,14
8	480,5	0,6	0,51	7,0	0,47	0,05	0,21	0,11
9	539,4	0,4	0,51	6,6	0,53	0,06	0,22	0,16
10	599,8	4,8	1,71	4,5	0,30	0,05	0,32	0,03

Приложение К

(справочное)

Таблица К.1 – Параметры распределения, полученные с использованием параметрической функции распределения для Al_2O_3 на установке ЛИД-2М

Homen	Время		Наиме	енование	парамет	ра / Диапа	зон, мкм	
п/п	измерения,	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
	c	1-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14
1	60,1	0,665				0,035	0,225	
2	120,2	0,855				0,045	0,08	0
3	180,1	0,855	0 0			0,045	0,085	
4	240,3	0,855		0	0	0,045	0,09	
5	300,0	0,855			0	0,045	0,09	0,01
6	360,4	0,855				0,045	0,09	
7	420,3	0,75	0,2			0,05		
8	480,5	0,75	0,2			0,05	0	0
9	539,4	0,05	0,6	0,3	0,05	0		
10	599,8	0,1	0,8	0,05	0,05			

Продолжение таблицы К.1

Наи	Наименование параметра / Лиапазон мкм							
A8 14-16	А9 16-18	A10 18-20	A11-A50 20-100	D ₃₂ , мкм	<i>Ст</i> , г/м ³	Оптическая плотность	SSA, m²/γ	Ω
0,015	0	0,06		14,6	2,72	0,14	0,10	0,04
0,01		0,01		11,9	1,71	0,11	0,12	0,04
0,005	0,005	0,005		11,5	1,35	0,09	0,13	0,04
0	0,005	0,005		11,2	1,08	0,07	0,13	0,04
0		0	_	10,2	0,68	0,05	0,14	0,03
0,005		0,005	0	11,0	0,74	0,05	0,13	0,04
				6,1	0,43	0,06	0,24	0,01
0	0	0		6,1	0,38	0,05	0,24	0,01
				5,4	0,35	0,05	0,27	0,04
				4,8	0,29	0,05	0,30	0,03

Приложение Л

(справочное)

Таблица Л.1 – Параметры распределения, полученные с использованием функции гамма-распределения частиц по размерам для Al_2O_3 на установке ТИПАС-1

Номер	Время измерения,	Время Наименование вмерения, параметра		D ₃₂ , мкм	<i>Cm</i> ,	Диапазон оптической	SSA, M^2/Γ	Ω
п/п	c	α	b		Г/М	плотности	М-/Г	
1	0,3	0,5	6,5	0,538	2,25	1,44- 0,99	2,79	0,70
2	0,6	0,5	6,5	0,538	0,50	1,00- 0,85	2,792	1,92
3	1,0	0,4	7,1	0,478	0,08	1,17- 0,59	3,14	2,71
4	1,3	3	1,5	4	6,01	0,86- 0,84	0,37	2,78
5	1,6	0,5	6,3	0,555	0,67	0,89- 0,77	2,70	1,25
6	2,0	3	1,6	3,750	14,19	0,81- 0,74	0,40	1,14
7	2,3	3	1,4	4,285	8,48	0,72- 0,69	0,35	1,96
8	2,6	3	4,7	1,276	0,34	0,75- 0,51	1,17	3,53
9	3,0	3	1,5	4,000	6,01	0,65- 0,63	0,37	2,78
10	3,3	3	1,7	3,529	6,03	0,54- 0,47	0,42	2,80

Приложение М

(справочное)

Таблица М.1 – Параметры распределения, полученные с использованием 60-ти параметрической функции распределения для *Al*₂*O*₃ на установке ТИПАС-1

	Browg	Наименование параметра / Диапазон, нм									
Номер п/п	измерения, с	A1 1-121	A2-A3 121-321	A4 321- 421	A5 421- 521	A6 521- 621	A7 621- 721	A8-A9 721-921	A10 921- 1021		
1	0,3		0	0	0,9	0,055	0,045				
2	0,6	0	0,05	0,25	0,6	0,05	0,03	-			
3	1,0	0,2	0,1	0,4	0,1	0,1			0		
4	1,3				0	0	0				
5	1,6				0,9	0,05	0,05				
6	2,0				0	0,06	0,02	0	0,02		
7	2,3	0	0	0	0,1						
8	2,6										
9	3,0				0	0	0		0		
10	3,3										

Номер		Наименование параметра / Диапазон, нм										
п/п	A11-A12 1021-	A13 1221-	A14-A15 1321-	A16 1521-1621	A17 1621-	A18 1721-	A19 1821-	A20 1921-				
	1221	1321	1521		1721	1821	1921	2021				
1												
2				0			0	0				
				Ū			Ŭ	Ŭ				
3												
4		0		0,35			0,105	0,245				
					0							
5	0		0	0		0	0	0				
6	0		0	0,3		0	0	0,3				
				0.10			0.015	0.105				
				0,18			0,015	0,105				
8		1		0			0	0				
9				0,35	0		0,105	0,245				
10		0		0,32	0,12		0	0,36				

Продолжение таблицы М.1

Номер		Название параметра/Диапазон, нм										
п/п	A21-A25	A26	A27	A28-A29	A30							
	2021-2521	2521-2621	2621-2721	2721-2921	2921-3021							
1		0	0		0							
2		0	0		0							
3		0	0		0							
4		0,02	0,1		0,08							
5		0	0		0							
6	0	0	0	0	0							
7		0,14	0,08		0,18							
8		0	0		0							
9		0,02	0,1		0,08							
10		0,01	0,045		0,045							

Продолжение таблицы М.1

Номер	Название параметра/Диапазон, нм										
п/п	A31 3021-3121	A32-A34 3121- 3421	A35 3421-3521	A36 3521- 3621	A37-A38 3621-3821	A39 3821- 3921	A40 3921- 4021				
1											
2											
3	0		0								
4	-			0		0	0				
5					0						
6	0,08	0	0,02								
7				0,03		0,025	0,045				
8											
9	0		0	0		0	0				
10											

Продолжение таблицы М.1

Номер	Название параметра/Диапазон, нм									
п/п	A41-A45	A46	A47-A48	A49	A50					
	4021-4521	4521-4621	4621-4821	4821-4921	4921-5021					
1										
2										
3		0		0	0					
4										
5	0		0							
6	0	0,09		0,06	0,05					
7										
8		0		0	0					
9					0					
10		0,01		0,09						

Продолжение таблицы М.1

Продолжение таблицы М.1

Номер п/п	Наименовани Диапаз	D	Cm,	Диапазон	SSA,	0	
	A51-A54 5021-5421	A55-A60 5421-6021	. <i>D</i> ₃₂ , мкм	г/м ³	плотности	м ² /г	52
1			0,544	2,27	1,44-0,99	2,76	0,61
2		0	0,544	0,50	1,00-0,85	2,76	1,03
3			0,473	0,08	1,17-0,59	3,17	1,36
4		0,1	4,029	6,05	0,86-0,84	0,37	0,69
5	0	0	0,545	0,66	0,89-0,77	2,75	0,90
6	Ŭ		3,811	14,41	0,81-0,74	0,39	0,63
7		0,1	4,107	8,15	0,72-0,69	0,36	1,30
8		0	1,321	0,35	0,75-0,51	1,13	2,42
9		0,1	4,029	6,05	0,65-0,63	0,37	0,69
10		0	3,233	5,52	0,54-0,47	0,46	0,55

Приложение Н

(справочное)

Таблица Н.1 – Параметры распределения, полученные с использованием функции гамма-распределения частиц по размерам для *TiO*₂ на установке ТИПАС-1

Номер п/п	Время измерения, с	α	Ь	D ₃₂ , мкм	<i>Ст</i> , г/м ³	Диапазон оптической плотности	SSA, m²/γ	Ω
1	0,3	2,3	1,9	2,789	7,26	1,03-1,40	0,53	2,19
2	0,6	2,3	1,9	2,789	5,06	1,08-1,35	0,53	3,15
3	1,0	2,3	1,9	2,789	4,52	0,78-1,27	0,53	2,05
4	1,3	2,3	1,9	2,789	4,43	0,84-1,26	0,53	1,12
5	1,6	1,2	5,8	0,724	1,04	0,60-0,63	2,04	2,62
6	2,0	3,5	4,4	1,477	14,30	0,60-0,73	1,00	0,74
7	2,3	2,3	1,9	2,789	2,84	0,65-0,61	0,53	3,09
8	2,6	2,5	5,6	0,982	1,52	0,54-0,64	1,50	2,86
9	3,0	2,5	5,4	1,018	1,60	0,66-0,68	1,45	1,82
10	3,3	0,7	8,1	0,456	0,35	0,57-0,78	3,24	4,99

Приложение П

(справочное)

Таблица П.1 – Параметры распределения, полученные с использованием 60-ти параметрической функции распределения для *TiO*₂ на установке ТИПАС-1

	D	Наименование параметра / Диапазон, нм									
Номер п/п	ыремя измерения, с	A1 1- 121	A2 121- 221	A3 221- 321	A4 321- 421	A5 421- 521	A6 521- 621	A7 621- 721	A8 721- 821	A9 821- 921	A10 921- 1021
1	0,3										
2	0,6	0	0	0	0	0	0		0	0	0
3	1,0										
4	1,3										
5	1,6	0,06	0,21	0,18	0,06	0,09	0,18	0	0,1	0,12	
6	2,0	0,045	0,585	0	0,27	0	0		0	0	
7	2,3	0	0		0		Ŭ				
8	2,6	0,2	0,36	0,08	0,08	0,08	0,05		0,015	0,025	0,01
9	3,0	0,28	0,24	0,08	0,16	0,04	0,045		0,025	0,015	0,015
10	3,3	0	0	0,5	0	0,5	0		0	0	0

		Наименование параметра / Диапазон, нм												
Номер п/п	A11 1021- 1121	A12 1121- 1221	A13 1221- 1321	A14 1321- 1421	A15 1421- 1521	A16 1521- 1621	A17 1621- 1721	A18 1721- 1821	A19 1821- 1921	A20 1921- 2021				
	1121	1221	1521	1721	1521	1021	1/21	1021	1/21	2021				
1														
2														
3						0		0	0	0				
4	0	0	0	0	0									
5							0							
6						0,045		0,025	0,015	0,015				
7														
8	0,045		0,01	0,04	0,005	0		0	0	0				
9	0,03	0,01	0,015	0,03	0,015									
10	0	0	0	0	0									

Продолжение таблицы П.1
Продолжение таблицы П.1

Номер п/п	На п Дı	именов араметј иапазон	ание ра / , нм	D	<i>Ст</i> , г/м ³	Диапазон оптической плотности	SSA, m²/Γ	Ω
	A21- A27 2021- 2721	A28 2721- 2821	A29- A60 2821- 6021	<i>D</i> ₃₂ , МКМ				
1	0,05	1	0,05	2,821	7,33	1,03-1,40	0,52	2,05
2	0,05	1	0,05	2,821	5,17	1,08-1,35	0,52	3,04
3	0,05	1	0,05	2,821	4,54	0,78-1,27	0,52	1,96
4	0,05	1	0,05	2,821	4,49	0,84-1,26	0,52	0,97
5	0	0	0	0,717	1,04	0,60-0,63	2,06	0,35
6				1,517	14,06	0,60-0,73	0,97	0,31
7	0,05	1	0,05	2,821	2,87	0,65-0,61	0,52	2,92
8				1,004	1,53	0,54-0,64	1,47	1,13
9	0	0	0	1,032	1,62	0,66-0,68	1,43	0,64
10				0,465	0,35	0,57-0,78	3,17	0,31

Приложение Р

(справочное)

Таблица Р.1 – Расп	ределение диапазонс	в по параметр	рам распределения

Наименование и диапазон параметра						
А1 = от 22 нм до 71 нм;	А36 = от 30 мкм до 32 мкм;					
А2 = от 72 нм до 121 нм;	А37 = от 32 мкм до 34 мкм;					
А3 = от 122 нм до 171 нм;	А38 = от 34 мкм до 36 мкм;					
А4 = от 172 нм до 221 нм;	А39 = от 36 мкм до 38 мкм;					
А5 = от 222 нм до 271 нм;	А40 = от 38 мкм до 40 мкм;					
А6 = от 272 нм до 321 нм;	А41 = от 40 мкм до 42 мкм;					
А7 = от 322 нм до 371 нм;	А42 = от 42 мкм до 44 мкм;					
А8 = от 372 нм до 421 нм;	А43 = от 44 мкм до 46 мкм;					
А9 = от 422 нм до 471 нм;	А44 = от 46 мкм до 48 мкм;					
А10 = от 472 нм до 521 нм;	А45 = от 48 мкм до 50 мкм;					
А11 = от 522 нм до 571 нм;	А46 = от 50 мкм до 52 мкм;					
А12 = от 572 нм до 621 нм;	А47 = от 52 мкм до 54 мкм;					
А13 = от 622 нм до 671 нм;	А48 = от 54 мкм до 56 мкм;					
А14 = от 672 нм до 721 нм;	А49 = от 56 мкм до 58 мкм;					
А15 = от 722 нм до 771 нм;	А50 = от 58 мкм до 60 мкм;					
А16 = от 772 нм до 821 нм;	А51 = от 60 мкм до 62 мкм;					
А17 = от 822 нм до 871 нм;	А52 = от 62 мкм до 64 мкм;					
А18 = от 872 нм до 921 нм;	А53 = от 64 мкм до 66 мкм;					
А19 = от 922 нм до 971 нм;	А54 = от 66 мкм до 68 мкм;					
А20 = от 972 нм до 1021 нм;	А55 = от 68 мкм до 70 мкм;					
А21 = от 1 мкм до 2 мкм;	А56 = от 70 мкм до 72 мкм;					
А22 = от 2 мкм до 3 мкм;	А57 = от 72 мкм до 74 мкм;					
А23 = от 3 мкм до 6 мкм;	А58 = от 74 мкм до 76 мкм;					
А24 = от 6 мкм до 8 мкм;	А59 = от 76 мкм до 78 мкм;					
А25 = от 8 мкм до 10 мкм;	А60 = от 78 мкм до 80 мкм;					
А26 = от 10 мкм до 12 мкм;	А61 = от 80 мкм до 82 мкм;					
А27 = от 12 мкм до 14 мкм;	А62 = от 82 мкм до 84 мкм;					

А28 = от 14 мкм до 16 мкм;	А63 = от 84 мкм до 86 мкм;
А29 = от 16 мкм до 18 мкм;	А64 = от 86 мкм до 88 мкм;
А30 = от 18 мкм до 20 мкм;	А65 = от 88 мкм до 90 мкм;
А31 = от 20 мкм до 22 мкм;	А66 = от 90 мкм до 92 мкм;
А32 = от 22 мкм до 24 мкм;	А67 = от 92 мкм до 94 мкм;
А33 = от 24 мкм до 26 мкм;	А68 = от 94 мкм до 96 мкм;
А34 = от 26 мкм до 28 мкм;	А69 = от 96 мкм до 98 мкм;
А35 = от 28 мкм до 30 мкм;	А70 = от 98 мкм до 100 мкм;

Продолжение таблицы Р.1

Приложение С

(справочное)

Таблица С.1 – Результаты расчёта программой с использованием многопараметрической функцией распределения в широком диапазоне размеров частиц *Al*₂*O*₃

Howop	Browg		Наименование параметра										
п/п	сек	A1	A2	A3- A4	A5	A6- A7	A8	A9	A10				
1	0,3					0	0,199523	0,79809					
2	0,6						Ŭ	0,299481	0,69878				
3	1,0						0,699896	0	0,299956				
4	1,3	0	0		0			0,225564	0,676691				
5	1,6			0		0		0	0				
6	2,0			Ŭ		Ū		Ŭ	Ŭ				
7	2,3						0	0,062883	0,146728				
8	2,6	0,229455	0,642474		0,045891			0	0				
9	3,0	0	0		0			0,064209	0,192628				
10	3,3							0	0				

Продолжение таблицы С.1

Номер п/п	Наименование параметра								
	A11	A12-A13	A14	A15	A16	A17-A20			
1									
2									
3	0		0	0	0				
4					0				
5		0				0			
6	0,115289		0,096074	0,172933		Ū			
7		•			0,209611				
8	0		0	0	0				
9					0				
10					0,365131				

Номер Наименование параметра п/п A27-A22 A23-A24 A25 A26 A30 A21 A29 A28 0 0,001551 0,000119 0 0,000716 1 0,000831 0,000063 0,000627 0,000209 2 0 0 0,000122 0,000001 0,000016 0 3 0,000918 0,002753 0,075723 0,00367 0,014682 4 0,310846 0,6735 0,015653 5 0 0 0,186344 0,403746 0,025614 6 0,209072 0,358409 0,013297 7 0 0 0 0,025904 0,056125 0,000151 8 0,115583 0,616441 0,011139 9 0,261883 0,36009 0,012896 10

Продолжение таблицы С.1

Номер	Наименование параметра	Д 32 . МКМ	<i>Ст.</i> г/м ³	SSA,	D ₃₂ , мкм
п/п	A31-A70	527	,	м ² /г	(Spraytec)
1	0	18,78	11,08	0,08	19,42
2	0	18,42	3,29	0,08	19,42
3	0	18,67	1,15	0,08	19,42
4	0	17,50	5,72	0,08	19,42
5	0	9,29	10,03	0,16	9,34
6	0	9,72	14,98	0,15	9,31
7	0	9,53	11,41	0,15	9,41
8	0	6,54	7,39	0,22	6,75
9	0	9,14	9,31	0,16	9,81
10	0	9,50	11,36	0,15	9,41

Продолжение таблицы С.1

Приложение Т

(справочное)

Таблица Т.1 – Результаты расчёта программой с использованием многопараметрической функцией распределения в широком диапазоне размеров частиц *TiO*₂

			Наименование параметра									
Номер п/п	Время, сек	A1- A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10		
1	0,3											
2	0,6											
3	1,0					0	0	0				
4	1,3		0		0							
5	1,6					0,29408 5	0,3431	0,3431	0	0		
6	2,0	0		0	0	0,09634 9	0,57809 7	0,289048				
7	2,3		0,759 392		0,0399 68	0	0	0				
8	2,6					0,19962	0,44916 2	0,249534		0,099 814		
9	3,0		0		0	0,17355	0,30371 5	0,39049		0		
10	3,3					0,2695	0,08984	0,17969	0,22 46	0,134 773		

Номер		Наименование параметра									
п/п	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	
1											
2											
3		0		0							
4		Ū		Ū		0			0	0	
5	0		0		0	Ŭ	0	0	0	Ū	
6	Ŭ		Ũ		Ű		Ũ				
7		0,08992		0,109912							
8											
9		0		0		0,043388			0,03719	0,04338	
10						0,019966		0,019966	0,01996	0,03993	

Продолжение таблицы Т.1

Продолжение таблицы Т.1

Номер		Наименование параметра														
п/п	A21	A22	A23	A24	A25	A26	A27	A28	A29	A30						
1	0,979				0,0021	0,0140			0,0009							
1	102										83	36			36	
2	0,968					0,0051	0,0181			0						
2	845				93	74		0	0	0						
3	0,873	0	0		0,0132	0,0850			0,0056							
5	397	0	0		27	32			69							
4	0,922				0,0128	0,0546										
4	885				52	23										
5	0,016										0,0004	0,0017	0	0,0002		0,00
5	912				0	67	52	0	34	0	035					
6	0	0,032	0,003	0	0	0			0							
0	0	91	595			0				0						
7	0,000				0,0000	0,0000				0						
7	778				02	15										
0	0,001				0,0000	0,0003		0	0,0000	0,00						
0	301	0	0		59	77			25	0101						
0	0,007	0	0		0,0000	0,0002			0,0000	0,00						
7	856				44	83			19	0076						
10	0,001				0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	0,00						
10	623				1	35	05	03	0	0008						

Номер	Наиме	нование				D., MKM
п/п	параметра		D ₃₂ , мкм	<i>Ст</i> , г/м ³	$SSA, m^2/r$	(Spravtec)
	A31-A35	A36-A70				(Spraylee)
1		0,003743	28,04	21,48	0,08	28,62
2		0,003894	27,22	5,98	0,08	27,7
3		0,022675	28,06	3,85	0,08	28,62
4		0,009639	27,33	6,82	0,08	27,7
5	0		17,32	10,33	0,08	20,06
6			5,33	18,58	0,27	2,409
7		0	18,02	3,16	0,08	19,48
8		0	18,06	5,57	0,08	20,11
9	1		18,05	22,82	0,08	20,06
10	1		17,21	4,53	0,08	20,06

Продолжение таблицы Т.1

Приложение У

(справочное)

Акт использования результатов работы в БТИ АлтГТУ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (БТИ АлтГТУ) ул. Трофимова, 27, г. Бийск, 659305 тел. (3854)432285, факс: (3854)435300 E-mail: info@bti.secna.ru http://www.bti.secna.ru «________2017г. № ________05 использовании результатов диссертационной работы «УТВЕРЖДАЮ»

Зам. директора по научной работе Бийского технологического института (филиала) АлтГТУ д.т.н., профессор

Хмелев В.Н. «<u>ле</u>» _____ 2017 г.

Акт

использования результатов диссертационной работы Жирнова Анатолия Алексеевича «ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС РАСЧЁТА ДИСПЕРСНОСТИ ЧАСТИЦ В МЕТОДАХ ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ СРЕД»

Комиссия в составе: декан инженерного спецфакультета БТИ (филиала) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», д.т.н., профессора Петрова Е.А., зам. декана инженерного спецфакультета, к.т.н., доцента Верещагина П.В., ответственного за выполнение ОМР на кафедре РДВУАС Жигульского П.А., составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Жирнова А.А. используются в учебном процессе БТИ АлтГТУ в виде разделов курсов лекций и лабораторных работ в дисциплине «Механика жидкости и газа» для студентов направления 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей».

Научные положения диссертационной работы послужили основой для исследования эволюциидисперсного состава и концентрации частиц аэрозолей, при проведении серии экспериментов по созданию аэрозольных сред ударно-волновым методом с применением высокоэнергетических материалов.

Члены комиссии:

д.т.н., профессор Петров Е.А.

к.т.н., доцент Верещагин П.В.

Жигульский П.А.

Приложение Ф

(справочное)

Акт использования результатов работы в ИПХЭТ СО РАН



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химикоэнергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН) 659322, г.Бийск Алтайского края, ул. Социалистическая 1 т.(3854) 305-955, ф. 303-043, 301-725, е-mail:admin@ipeet.ru оКПО 10018691, ОГРН 1022200571051, ИНН 2204008820, КПП 220401001



АКТ

использования результатов диссертационной работы Жирнова Анатолия Алексеевича

Комиссия в составе: ученого секретаря ИПХЭТ СО РАН, к.т.н. Титов С.С., г.н.с., д.ф.м.н. Павленко А.А., с.н.с., к.т.н. Муравлева Е.В., рассмотрев материалы кандидатской диссертации Жирнова А.А. «Программный комплекс расчета дисперсности частиц в методах диагностики процессов образования и распространения аэрозольных сред», установила, что результаты исследований использовались в рамках проекта: V.49.1.4: «Разработка теоретических основ, методов и высокотехнологичных средств преобразования энергии высокоэнергетических материалов (ВЭМ) для генерации пространственно-распределенных полей субмикронных и наноразмерных частиц со специальными контролируемыми свойствами с целью дезактивации опасных химических агентов с одновременным дистанционным обнаружением и идентификацией опасных веществ» по приоритетному направлению V.49 «Фундаментальные исследования в области химии и материаловедения в интересах обороны и безопасности страны», а также в ряде хоздоговорных НИР.

Члены комиссии:

С.С. Титов А.А. Павленко Е.В. Муравлев