

На правах рукописи



Половченко Светлана Васильевна

**СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ И ДИАГНОСТИКИ
ИНДУСТРИАЛЬНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ПОТОКОВ МЕТОДАМИ
ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Специальность 01.04.01 –

Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Рязань

2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт – Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель:	Привалов Вадим Евгеньевич доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Экспериментальная физика», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт – Петербургский политехнический университет Петра Великого»
Официальные оппоненты:	Соколов Андрей Леонидович, доктор технических наук, доцент, начальник научно-технического комплекса Акционерного общества «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения»; Степанов Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой общей и теоретической физики и МПФ, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина»
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова

Защита диссертации состоится «20» февраля 2018 г. в 11.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет» <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д 212.211.03, д.ф.-м.н., профессор _____



М.В.Чиркин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Аэрозольные потоки широко распространены в промышленности и играют большую роль в жизнедеятельности человека. Они образуются в результате разнообразных процессов в тепловой энергетике, металлургии, химической промышленности, промышленности строительных материалов.

Реальный процесс производства имеет две стороны. С одной стороны это непосредственно сам продукт, а с другой стороны издержки производства. Снижение издержек производства во многом зависит от информации об основных параметрах аэрозольного потока на всех стадиях технологического процесса.

Другой немало важный аспект производства: экологический. После обработки аэрозольные потоки поступают в атмосферу, что приводит к её загрязнению. Повышение экологической безопасности производства, снижение загрязненности воздуха рабочих зон и прилегающих территорий по-прежнему является актуальной задачей. Пыль является мощным фактором заболеваемости, в связи с чем в 2010 году в перечень ПДК были введены нормативы загрязнения воздуха PM_{10} и $PM_{2.5}$. То есть на сегодняшний день необходимо иметь информацию о концентрации и дисперсном составе частиц, поступающих в атмосферу.

Эффективность контролирования загрязнения окружающей среды и непосредственно технологического процесса в значительной степени зависит от возможности оперативного определения параметров таких потоков.

Для исследования параметров аэрозолей существует множество приборов, но они, как правило, основаны на принципах отбора проб и не могут отражать характеристики динамических объектов исследования. Применение подобных приборов требует необходимости при каждом измерении обеспечивать репрезентативность отобранной пробы, что не может не оказывать влияния на исследуемую среду. Существующие на сегодняшний день приборы, основой которых являются бесконтактные методы измерения, имеют ограничения в их использовании. Они либо сложны в исполнении, либо являются дорогостоящими, либо не отображают изменения параметров аэрозольного облака, либо применимы лишь к конкретным типам аэрозолей.

Объектом исследования являются промышленные аэрозольные потоки.

Предметом исследования являются методы и системы исследования параметров промышленных аэрозольных потоков.

Цель диссертационной работы заключается в разработке системы моделирования и диагностики потоков для исследования дисперсного состава

индустриального аэрозоля с помощью ослабления и рассеяния лазерного излучения, разработке алгоритма измерения и восстановления распределения частиц аэрозоля по размерам, которые позволят создать автоматизированный экспресс-анализатор с высокими пространственным и временным разрешением.

Цель работы достигается решением следующих задач:

1. Провести анализ исследуемого объекта и разработать алгоритм трансформации функции распределения частиц по размерам.

2. Провести сравнительный анализ существующих методов диагностики аэрозольных потоков.

3. Выбрать устройства, моделирующие индустриальные аэрозольные потоки со стандартизированными свойствами и разработать методику проведения эксперимента.

4. Разработать оптическую схему анализатора для используемого пылевого стенда, алгоритма проведения эксперимента.

5. Разработать программное обеспечение для обработки результатов эксперимента и сравнения с результатами численного моделирования зависимости сигналов ослабления и рассеяния на разных длинах волн от дисперсного состава и концентрации частиц в потоке.

Для решения поставленных задач использовались основные положения теории Ми и оптики дисперсных сред, физики дисперсных сред, методы математического моделирования. В качестве **метода исследования** были выбраны оптические методы исследования параметров аэрозольных потоков: модифицированной спектральной прозрачности и интегрального светорассеяния, их численное моделирование и расчеты по теории Ми.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Разработанная система определения плотности функции распределения частиц по размерам для задач многочастотного лазерного зондирования полидисперсных потоков позволяет учитывать временную и пространственную динамику макро- и микрофизических характеристик аэрозольного потока с размерами частиц от 0,1 мкм до 5 мкм.

2. Аналитическая параметризация для зависимости среднего геометрического размера частиц и среднего геометрического отклонения логарифмически-нормального распределения от среднего объемно-поверхностного диаметра адекватно описывает параметры логарифмически-нормального закона распределения частиц реального цементного аэрозоля

3. Расчетная зависимость отношения факторов эффективности ослабления на двух длинах волн совпадает с полученным отношением значений спектральной плотности на этих же длинах волн в диапазоне длин волн 405, 650 нм и размеров частиц 0,1..5 мкм.

4. Отношения нормированных сигналов рассеяния на двух длинах волн совпадают с расчетными отношениями интенсивностей рассеяния, вычисленных по теории Ми для размеров частиц 0,1..10 мкм.

Достоверность результатов и выводов работы обеспечивается её непротиворечивостью с фундаментальными положениями теории рассеяния света дисперсными средами, физической обоснованностью используемых моделей и строгостью математических методов, согласованностью с результатами других авторов, а также качественным согласием с данными экспериментов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые предложена методика восстановления функции распределения частиц по размерам для аэрозольных потоков с размерами частиц до 5 мкм с использованием двух методов: модифицированной спектральной прозрачности и интегрального светорассеяния.

2. Впервые выявлена функциональная зависимость между средним объемно-поверхностным диаметром и параметрами дифференциальной функции распределения частиц по размерам аэрозоля, образующегося при механической активации материала.

3. Впервые для экспериментальной реализации модифицированного метода спектральной прозрачности и интегрального светорассеяния разработана установка с тремя оптическими каналами, каждый со своим фотоприемным каналом регистрации на основе двойного синхронного детектирования для повышения точности измерений и исключения влияния помех с вводом через АЦП в ПК и возможностью работы на трех длинах волн лазерного излучения.

4. Впервые реализован алгоритм обработки выходных сигналов экспресс-анализатора и получения среднего объемно-поверхностного диаметра частиц с минимальным числом измеренных параметров.

Практическая значимость результатов:

1. Получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и базы данных, что позволяет выполнять численное моделирование функций распределения частиц и их производных, образующихся при механической активации.

2. Разработана принципиальная схема и аппаратное оформление систем диагностики технологических процессов производств, связанных с механической активацией, с использованием лазерного зондирования аэрозольных потоков и последующей их обработкой на ЭВМ, что позволяет создать экспресс-анализатор.

3. Разработан алгоритм измерения концентрации и средних размеров частиц на выходе последней ступени очистки аэрозольных потоков для контроля экологической обстановки в реальном времени.

Достоверность результатов и выводов работы обеспечивается её непротиворечивостью с фундаментальными положениями теории рассеяния света дисперсными средами, физической обоснованностью используемых моделей и строгостью математических методов, согласованностью с результатами других авторов, а также качественным согласием с данными экспериментов.

Личный вклад автора. Основные результаты исследования индустриальных аэрозольных потоков, разработка программного комплекса, компьютерное моделирование и экспериментальные измерения среднего объемно-поверхностного диаметра были выполнены автором.

Апробация результатов работы. Основные результаты настоящей работы докладывались на:

- Симпозиум «Лазеры на парах металлов» (Лоо, 2010 и 2014 гг.);
- Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2011 г., 2015 г.);
- Международная конференция «Лазеры. Измерения. Информация» (Санкт-Петербург, 2010, 2011, 2012, 2013 и 2014 гг.);
- Международная конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии» (Новороссийск, в 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 и 2017 гг.);
- Международная научно-практическая конференция SWorld «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании» (Одесса, 2012 гг.);
- Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Алтай, 2013 г.)
- Международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике (Республика Бурятия, 2016)

Публикации. Содержание диссертации отражено в 46 работах, включая 10 статей, из которых 6 в рецензируемых журналах из перечня ВАК. Получено 2 свидетельства о регистрации программы ЭВМ и 2 свидетельства о регистрации базы данных.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 135 наименований. Общий объем работы – 144 страниц, в том числе, 40 рисунков, 5 таблиц, 5 приложений

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи исследования, приведены защищаемые положения, новизна полученных результатов, практическая значимость и сведения об апробации работы.

В первой главе проводится обзор параметров многокомпонентных газовых потоков и анализ методов их диагностики. Рассмотренные методы показывают, что идеальным диагностическим параметром для определения качественных (распределение частиц по размерам) и количественных (концентрации) характеристик аэрозольных потоков являются экспериментально измеренные оптические свойства исследуемой среды. Оптические сигналы обладают малоинерционностью, легко преобразуются в электрические сигналы, которые удобно регистрировать. Используемые для измерения средства обладают высокой разрешающей способностью и чувствительны к ничтожно малым концентрациям частиц.

Во второй главе проведено исследование алгоритмов расчета оптических характеристик как отдельных частиц, так и полидисперсных систем. Построен специальный алгоритм расчета оптических характеристик, реализованный в компьютерных кодах с использованием Delphi 2009. С использованием полученного алгоритма создана компьютерная база данных оптических характеристик в широком диапазоне изменения размеров частиц, длин волн и углов зондирования, комплексного показателя преломления, что позволяет повысить точность решения обратных задач лазерного зондирования.

В третьей главе отражены результаты численного моделирования и экспериментального исследования реального индустриального аэрозольного потока. Отобраны 120 проб цементной пыли, уловленной в каждой ступени ПГО (пылегазоочистное оборудование) на разных цементных предприятиях г. Новороссийска и проанализированы их дифференциальные функции распределения частиц по размерам (ДФРЧ).

На основе уравнений массового баланса рассчитаны ДФРЧ на входе и выходе каждой ступени очистки. Установлено, что после каждой ступени очистки максимум ДФРЧ смещается в сторону уменьшения размеров частиц. Исследованы аэродинамические параметры специального пылевого стенда, и сделан вывод о том, что с его помощью можно создавать аэрозольные потоки, подобные по характеристикам потокам, встречающимся в промышленности.

Была проанализирована зависимость концентрации аэрозольных частиц в стенде от времени, скорости, диаметра частиц d .

$$C = C_0 e^{-ad^2t(bv^2+c)/\mu}, \quad (1)$$

где a , b , c – константы, зависящие от плотности частиц, геометрических размеров стенда.

На рисунке 1 точками обозначены измеренные значения концентрации в газоходе в разные моменты времени с погрешностью гравиметрического метода – 10%. Сплошной линией показана аппроксимирующая кривая, из которой видно, что после инъекции происходит плавный спад концентрации. Для моделирования зависимости ДФРЧ от времени, использовалась ДФРЧ инжектируемого аэрозоля, и рассчитано изменение концентрации и ДФРЧ по формуле (1).

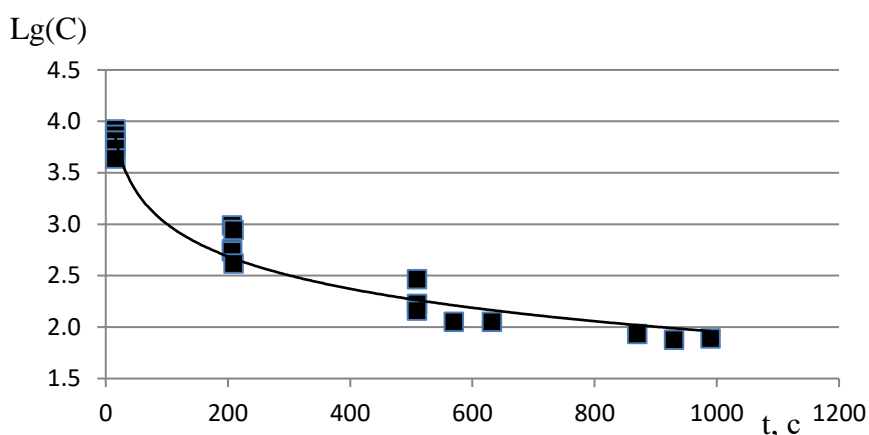


Рисунок 1 – Эмпирическая (точки) и теоретическая (линия) зависимости концентрации аэрозольных частиц от времени

Моделирование ДФРЧ производилось путем применения соотношения (1) для каждого первоначального из 120 спектров готового продукта $f(\delta)$ в зависимости от времени. В результате моделирования получены ДФРЧ в разные моменты времени. На рисунке 2 показаны ДФРЧ для 0, 10, 20, 50 секунд после начала инъекции.

Выполненное численное моделирование изменения ДФРЧ в аэрозольном потоке после инъекции, показало, что максимум ДФРЧ смещается в область частиц размером менее 10 мкм. Установлены интервалы времени, в которых расчетная ДФРЧ с коэффициентом детерминации свыше 80% принимает вид ДФРЧ на входе в последний классификатор (77 – 538 с) и на выходе из него (от 771 с и далее).

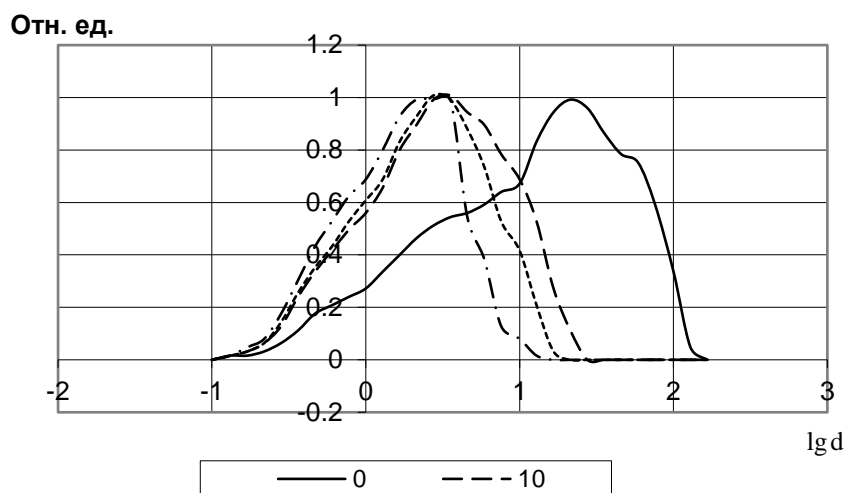


Рисунок 2 – Изменение ДФРЧ в зависимости от времени

В четвертой главе дано описание экспериментальной установки для исследования аэрозольных потоков интегральными методами лазерного зондирования. Оптическая схема экспериментальной установки приведена на рисунке 3.



Рисунок 3 - Оптическая схема экспериментальной установки.

Дано описание экспериментов на специальном пылевом стенде, с помощью которых удалось установить зависимость концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц аэрозоля от значений сигналов ослабления и рассеяния лазерного излучения на нескольких длинах волн. Описан алгоритм обработки сигналов измерителей ослабления и рассеяния лазерного излучения.

Структурная схема блока генерации и обработки сигналов экспериментальной установки представлена на рисунке 4.

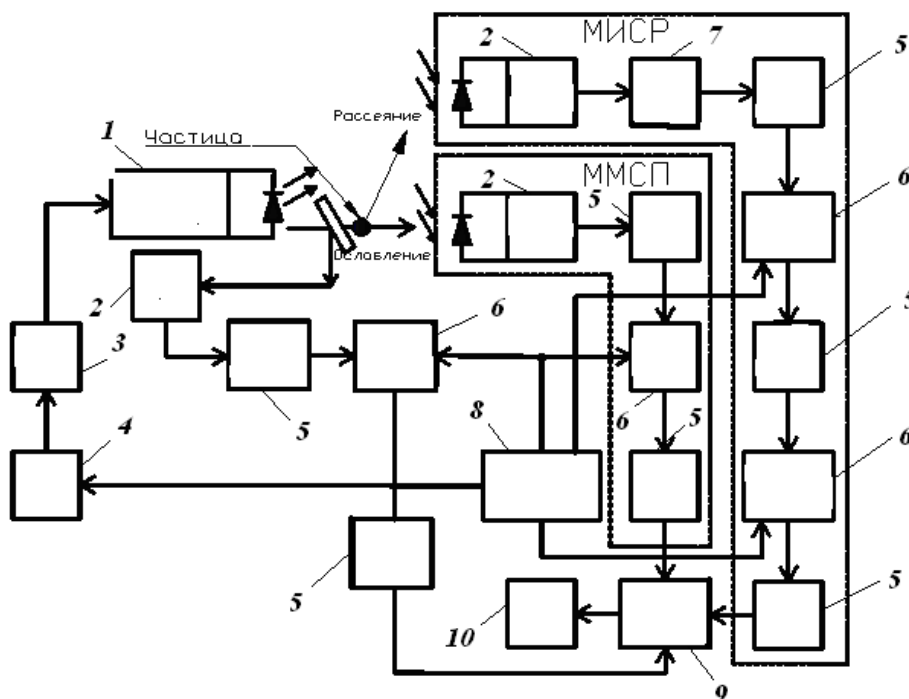


Рисунок 4 - Структурная схема блока генерации и обработки сигналов экспериментальной установки:

1 – источник лазерного излучения; 2 – фотоприемники; 3 – усилитель мощности; 4 – модулятор; 5 – дифференциальные усилители; 6 – синхронные детекторы; 7 – аттенюатор; 8 – генератор импульсов; 9 – аналогово-цифровой преобразователь; 10 – персональный компьютер

На трех длинах волн было проведено сравнение отношений усредненных факторов эффективности ослабления $\frac{\bar{Q}(\lambda_i)}{\bar{Q}(\lambda_j)}$ с экспериментально измеренным отношением оптических плотностей $\frac{\tau_{\lambda_i}}{\tau_{\lambda_j}}$. На рисунке 5 показаны графики рассчитанного отношения $\frac{\bar{Q}(\delta_{32,650,m})}{\bar{Q}(\delta_{32,405,m})}$ и измеренное отношение $\frac{\tau_{650}}{\tau_{405}}$ на двух длинах волн 650 нм и 405 нм.

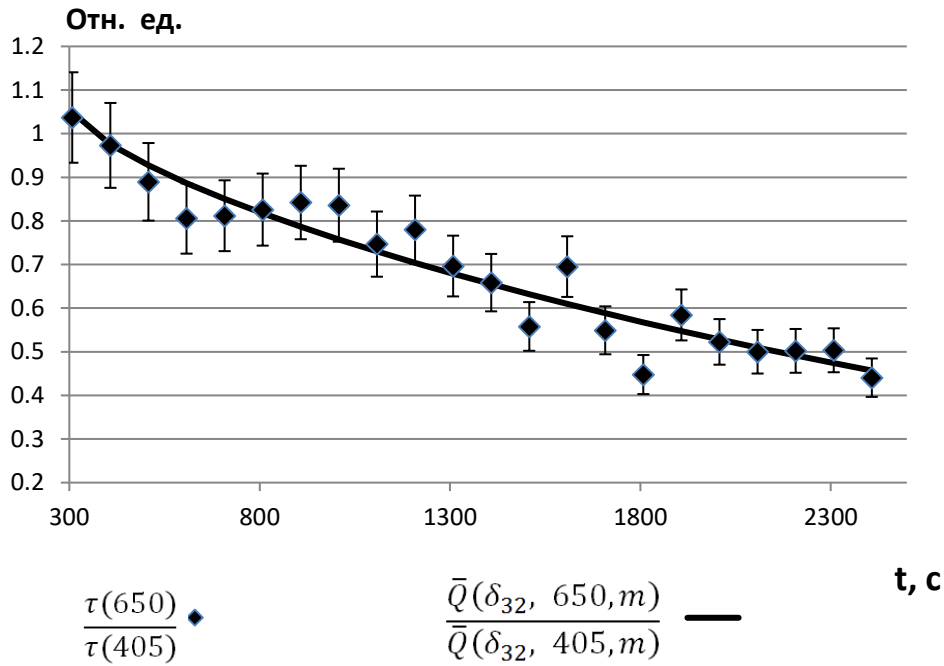


Рисунок 5 – Графики зависимости отношения $\frac{\bar{Q}(\delta_{32,650,m})}{\bar{Q}(\delta_{32,405,m})}$ и $\frac{\tau_{650}}{\tau_{405}}$ от времени после импульсной инжекции

По графикам на рисунке 5 нетрудно заметить, что расчетное отношение $\bar{Q}_{\lambda_i}/\bar{Q}_{\lambda_j}$ и экспериментальное отношение $\tau_{\lambda_i}/\tau_{\lambda_j}$ совпадают в пределах заданной погрешности. Таким образом, измеренному отношению оптических плотностей $\tau_{\lambda_i}/\tau_{\lambda_j}$, сопоставляют отношение усредненных факторов эффективности ослабления $\bar{Q}_{\lambda_i}/\bar{Q}_{\lambda_j}$ и определяют величину среднего объемно-поверхностного диаметра δ_{32} .

Аналогично сравниваются отношения нормированных сигналов рассеяния на двух длинах волн, полученных экспериментальным путем, в сравнении с расчетными отношениями интенсивностей рассеяния $\frac{I(\lambda_i)}{I(\lambda_j)}$, вычисленных по теории Ми.

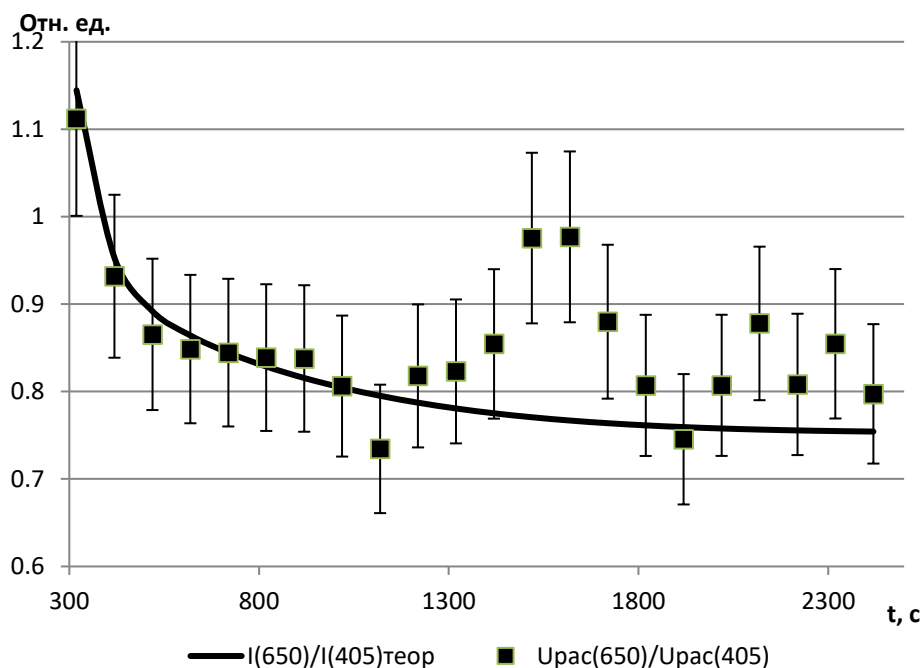
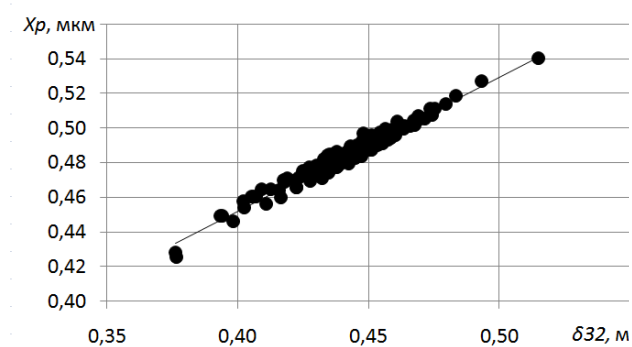


Рисунок 6 – Графики отношений нормированных сигналов рассеяния на двух длинах волн, полученных экспериментальным путем, в сравнении с расчетными отношениями интенсивностей рассеяния $\frac{I(650)}{I(532)}$.

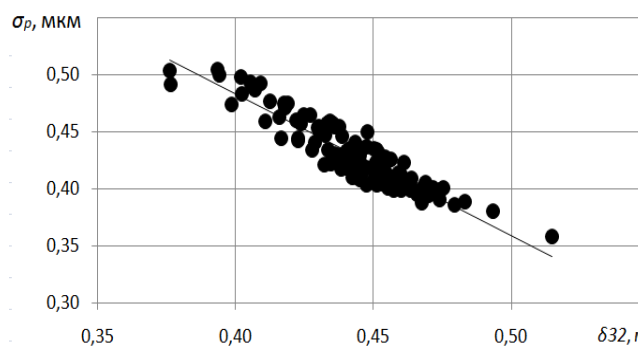
Данные графики подтверждают вывод о том, что методом интегрального рассеяния света есть возможность средний объемно-поверхностный диаметр частиц исследуемого аэрозоля на протяжении 700 секунд от начала инъекции.

В результате численного моделирования трансформации дифференциальной функций распределения частиц по размерам в потоке, были получены распределения частиц на выходе в атмосферу. Для каждой полученной ДФРЧ выполнены расчеты величин среднего арифметического, среднего квадратичного, среднего массового и среднего объемно-поверхностного диаметра. Между средним объемно-поверхностным диаметром, который измеряется лазерными методами, и остальными средними значениями диаметров установлены регрессионные зависимости с коэффициентом детерминации не менее 0,85.

Аппроксимируя полученные функции распределения частиц логарифмически-нормальным законом, были определены его параметры. Коэффициенты детерминации такой аппроксимации составили не менее 0,87. Между параметрами этих законов и средним объемно-поверхностным диаметром выявлена функциональная зависимость (рисунок 7).



a)



б)

Рисунок 7 - Зависимости среднего геометрического диаметра x_p (a) и стандартного геометрического отклонения σ_p (б) от среднего объемно-поверхностного диаметра δ_{32} ;

Полученные линейные зависимости подчиняются уравнениям

$$x_p = 0,77\delta_{32} + 0,14 \text{ (рис. 7, a);}$$

$$\sigma_p = -1,24\delta_{32} + 0,98 \text{ (рис. 7, б);}$$

коэффициенты детерминации составили:

$$R_1^2 = 0,97 \text{ (рис. 7, a); } R_2^2 = 0,86 \text{ (рис. 7, б).}$$

С помощью этих регрессионных зависимостей были восстановлены дифференциальные функции распределения частиц по размерам для всех 120 образцов. Значение коэффициента детерминации между восстановленными и исходными данными составило не менее 0,85. Пример одного из восстановлений приведен на рисунке 8.

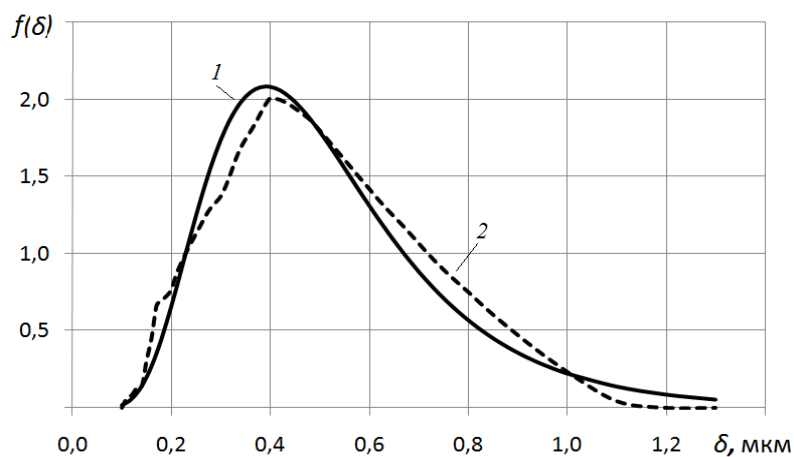


Рисунок 8 - Пример восстановленной дифференциальной функции распределения частиц по размерам (кривая 1); сравнение с исходными данными (кривая 2)

Таким образом, результаты работы показывают, что по измеренному оптическими методами среднему объемно-поверхностному диаметру возможно восстанавливать дифференциальную функцию распределения частиц по размерам для мелкодисперсного аэрозоля.

В заключении приведены наиболее важные результаты, полученные в диссертационной работе.

1. Разработана и построена экспериментальная установка для создания полидисперсных аэрозольных потоков с контролируемыми лазерными методами и управляемыми микрофизическими параметрами. Показано, что в специальном пылевом стенде (экспериментальная установка) в виде замкнутого газохода обеспечивается стабилизация равномерного распределения аэрозоля по всему объему на десятой секунде после импульсной инъекции аэрозольного материала в поток, что позволяет с этого момента времени проводить исследования таких потоков.

2. Разработан алгоритм трансформации функции распределения аэрозольных частиц по размерам на основании учета фракционной зависимости функции разделения аэродинамических классификаторов, который позволил повысить полноту априорной информации об исследуемом объекте и более адекватно выбирать длины волн лазерного излучения для дистанционного зондирования. Выполнено математическое моделирование изменения ФРЧ в аэрозольном потоке после инъекции, которое установило, что максимум ФРЧ смещается в область частиц размером менее 10 мкм.

3. Разработан программный комплекс, который может быть использован при анализе трансформации функций распределения, получаемых в результате их аэродинамической классификации и исследовать оптические параметры аэрозольных потоков, заданных как функциональной зависимостью, так и таблично. Создана база оптических характеристик для различных аэрозолей.

4. Создана лазерная установка для проведения одновременных исследований аэрозольных потоков методами спектральной прозрачности и интегрального светорассеяния.

5. Разработан алгоритм обработки результатов многочастотного лазерного зондирования, на основании которого создан программный комплекс.

6. Предложен полуэмпирический метод определения среднего объемно-поверхностного диаметра по сигналам ослабления и рассеяния на трех длинах волн. Измерения оптической плотности и индикатрисы рассеяния лазерного излучения в аэрозольном потоке в реальном времени позволили получить

значение среднего объемно-поверхностного диаметра частиц в хорошем согласии с результатами численного моделирования

7. Экспериментально установлена зависимость среднего геометрического размера частиц и среднего геометрического отклонения логарифмически-нормального распределения от среднего объемно-поверхностного диаметра, которая позволяет решать полуэмпирически обратные задачи лазерного зондирования аэрозольных потоков.

Таким образом, в рамках теории Ми развит новый метод решения обратных задач для многочастотного лазерного зондирования полидисперсных аэрозольных потоков с размерами частиц от 0,1 мкм до 5 мкм, позволяющий учитывать временную и пространственную динамику макро- и микрофизических характеристик аэрозольного потока.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Журналы из списка ВАК:

1. *Половченко С.В., Rogovskiy V.V., Чартий П.В., Шеманин В.Г.* Лазерная диагностика релаксационных аэродисперсных потоков. //Научно-технический вестник Поволжья. - 2013. - № 2 – С. 41-43.

2. *Половченко С.В., Чартий П.В., Привалов В.Е.* Экспериментальная установка для зондирования промышленных аэродисперсных потоков //Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. - 2014.-№ 4 (206).- С. 64-73

3. *Половченко С.В., Чартий П.В.* Исследование релаксационных аэродисперсных потоков интегральными методами лазерного зондирования // Журнал «Фундаментальные исследования» - 2014 - № 11 (часть 8) - ИД «Академии естествознания»- С. 1717-1722

4. *Половченко С.В., Чартий П.В.* Восстановление функции распределения частиц по размерам с использованием методов лазерного зондирования //Журнал «Безопасность в техносфере» - Т.3, №6 -2014 – С. 37-42

5. *Веденин Е.И, Половченко С.В., Чартий П.В., Шеманин В.Г.* Изменение функции распределения частиц по размерам при различных режимах пылеулавливающего оборудования. //Журнал «Безопасность в техносфере» -2016 - №1(58) – С. 41-47

6. *Половченко С.В., Привалов В.Е., Чартий П.В., Шеманин В.Г.* Восстановление функции распределения частиц по размерам на основе данных многоволнового лазерного зондирования. Оптический журнал. 2016. Т. 83. №05. С. 43-49

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и базы данных

1. *Половченко С.В.* Расчет оптических характеристик полидисперсных систем. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014661007 от 21 октября 2014

2. *Половченко С.В.* Оптические характеристики полидисперсных систем в широком диапазоне изменения входящих параметров Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621475 от 22 октября 2014

3. *Половченко С.В.* Моделирование трансформации спектра размеров частиц в промышленном потоке. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014660719 от 14 октября 2014

4. *Половченко С.В., Чартий П.В.* Функции распределения частиц по размерам, получаемых при механической активации в производстве цемента Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621435 от 13 октября 2014

Статьи и доклады:

1. *Половченко С.В., Дьяченко В.В., Rogovskiy В.В., Чартий П.В.* Экологический мониторинг аэрозолей с цементной дисперсной фазой // Журнал «Научный диалог». – 2012. -Выпуск №7: Естествознание и экология – С. 6-18

2. *Половченко С.В., Чартий П.В., Чартий Р.П.* Решение задач лазерного зондирования промышленных аэрозолей в условиях новых санитарно-гигиенических требований// Сборник докладов 20-й международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация» (г. Санкт-Петербург, 2010) – С.-Пб: СПбГПУ, 2010. – Т.3. - С. 224-234

3. *Половченко С.В.* Лазерное зондирование аэрозольных потоков //Петербургский журнал электроники – 2014 - №3 (80) – С. 33-38

4. *Половченко С.В., Rogovskiy В.В., Чартий П.В., Шеманин В.Г.* Идентификация спектров размеров промышленных аэрозолей лазерными методами зондирования// Сборник докладов 20-й международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация» (г. Санкт-Петербург, 2010). – С.-Пб: СПбГПУ, 2010. – Т.1. - С. 145-160.

5. *Веденин Е.И., Половченко С.В., Чартий П.В., Шеманин В.Г.* Восстановление функции распределения частиц на основе многоволнового лазерного зондирования промышленных аэрозолей//МЭИ, Труды XI международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2011) – М.: изд. МЭИ (ТУ) (электронное издание) – Доклад №49 - 11 с.

6. *Половченко С.В., Rogovskiy В.В., Чартий П.В., Шеманин В.Г.* Использование инвариантов функции распределения аэрозольных частиц для

решения обратных задач лазерного зондирования/ // МЭИ, Труды XI международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2011) – М.: изд. МЭИ (ТУ) (электронное издание) - Доклад №50 - 5 с.

7. *Половченко С.В., Семенычева О.В., Чартий П.В.* Математическое моделирование трансформации спектров размеров частиц в аэродисперсных потоках: сборник научных трудов SWorld// Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2012». Выпуск 4. Том 14. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2012 – С.11-22.

8. *Половченко С.В., Шеманин В.Г., Чартий П.В.* Восстановление функции распределения модифицированным методом спектральной прозрачности // АИНР, Сб. докладов 22 международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация 2012». Том 1. С.-Пб. Изд. Политех. ун-та. 2012. С. 313-321.

9. *Половченко С.В., Роговский В.В., Чартий П.В., Шеманин В.Г.* Моделирование аэродисперсных потоков для проведения метрологических исследований //Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Сборник докладов XIX Международного симпозиума [Электронный ресурс]. - Томск: Изд. ИОА СО РАН. С.228-231

10. *Веденин Е.И., Половченко С.В., Роговский В.В., Чартий П.В.* Исследование времени стабилизации модельных аэродисперсных потоков после импульсной инъекции аэрозоля //Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Сборник докладов XIX Международного симпозиума [Электронный ресурс]. - Томск: Изд. ИОАСОРАН. С. 82-85

11. *Половченко С.В.* Решение обратной задачи на основе многоволнового лазерного зондирования /Половченко С.В., Роговский В.В., Чартий П.В., Шеманин В.Г. // Сборник докладов 21-й международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация» (г. Санкт-Петербург, 2010) – С.-Пб: СПбГПУ, 2011. – Т.1. - С. 173-181

12. *Половченко, С.В.* Экспериментальное исследование релаксационных аэродисперсных потоков модифицированным методом спектральной прозрачности в видимой области спектра/ С.В. Половченко, В.В. Роговский, О.В. Роговский, О.В. Семенычева, П.В. Чартий // Труды XIX международной конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии» г. Новороссийск, п. Абрау-Дюрсо, 2011, / Новороссийск: Вариант, 2011. – с. 157-158.

13. *Половченко, С.В.* Решение обратной задачи лазерного зондирования промышленных аэрозолей / С.В. Половченко, В.В. Роговский, П.В. Чартий,

В.Г. Шеманин // Труды конференции «Лазеры. Измерения. Информация» г. Санкт-Петербург, 2011, / СПбГПУ. – С.-Пб: СПбГПУ, 2011. – с. 49-50.

14. *Веденин, Е.И.* Лазерное зондирование релаксационных аэродисперсных потоков интегральными методами / Е.И. Веденин, С.В. Половченко, В.В. Роговский, П.В. Чартий // Труды XX международной конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геоэкологии» г. Новороссийск, п. Абрау-Дюрсо, 2012, / Новороссийск: Вариант, 2012. – с. 125-127

15. *Половченко С.В., Привалов В.Е.* Аппроксимация спектров размеров частиц, полученных в результате механической активации оптимальной функцией распределения.// Труды XXIV Международной научной конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте», Новороссийск, 2017. – с.138-139

16. *Половченко С.В., Привалов В.Е., Шеманин В.Г., Чартий П.В.* Лазерная диагностика размеров частиц в потоке цементного аэрозоля// В книге. XV Международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике. Тезисы лекций и докладов. 2016. – с.140-141

Половченко Светлана Васильевна

СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ И ДИАГНОСТИКИ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ
АЭРОЗОЛЬНЫХ ПОТОКОВ МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 16.12.2017. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага ксероксная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.