

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Каширского Данилы Евгеньевича «Определение термодинамических характеристик неоднородных газовых сред оптическими методами», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 - Оптика

**Актуальность работы.** В настоящее время для решения ряда экологических задач, связанных с источниками высокотемпературных газовых сред необходим мониторинг таких объектов, связанный с процессами наблюдения и регистрации параметров объекта в сравнении с заданными критериями. Для таких сред характерны значительные диапазоны изменения температуры и концентраций газовых компонентов, приводящие к широким интервалам изменения величины оптической толщины в неоднородной среде. Разнообразие в спектральных распределениях коэффициентов поглощения, функций пропускания и излучательной способности газов позволяет предлагать их использование для анализа изучаемых газовых сред. При этом наиболее актуальной является разработка математического аппарата решения обратной задачи оптики газовых сред определения пространственных распределений температуры и концентраций газовых компонентов в смеси из измерений собственного или зондирующего излучения для дистанционного анализа термодинамических неоднородных газовых сред со значительными градиентами температуры и парциальных давлений. Разработка общей схемы, приводящей к аргументированному численному ответу о температуре и концентрации каждой составляющей рассматриваемого газового облака, с учетом теоретически обоснованных пределов в задаче дистанционной диагностики излучающего объекта является актуальной задачей. Именно решению этих задач посвящена настоящая диссертационная работа Каширского Данилы Евгеньевича.

**Целью работы** является разработка методики дистанционного определения термодинамических параметров (температуры и парциальных давлений компонентов) неоднородной газовой среды по измеренным спектральным характеристикам излучения или прозрачности.

**Задачи работы включали:**

- разработку физико-математической модели распространения излучения в газовой-аэрозольной среде;
- разработку алгоритма и многофункционального программного обеспечения (ПО), реализующего точные расчеты коэффициентов и функций поглощения, пропускания и излучательной способности газовой-аэрозольных сред;
- анализ влияния на результаты моделирования спектрального центра и ширины

лазерной линии излучения;

– разработка новой методики для определения численных значений температуры и парциальных давлений компонентов нагретой неоднородной газовой среды из данных измерений ее спектральной зависимости излучения или прозрачности.

**Методы исследований.** В основу физико-математической модели положен метод прямого расчета (line-by-line), базирующийся на первых физических принципах (законе Ламберта-Бугера-Бера) учета ослабления излучения газовой-аэрозольной средой, состоящей из молекул и сферических рассеивающих частиц.

Разработка программного обеспечения, реализующего предложенную физико-математическую модель и позволяющее проводить моделирование распространения излучения в газовой-аэрозольной среде.

При выполнении работы применялись спектроскопические и математические методы изучения состава газовой-аэрозольных сред, включая нелинейный метод наименьших квадратов, математической статистики, линейной алгебры, а также информационные технологии и программирование.

**Достоверность результатов** диссертационной работы подтверждается согласием рассчитанных значений энергий уровней молекулы СО и центров линий генерации СО-лазера с их значениями из других работ. Гарантируется тестированием предложенных методик по замкнутой схеме, когда предварительные результаты расчетов спектральных характеристик по прямой задаче служат исходными данными в обратной задаче, и оценка справедливости предложенных методик гарантируется сравнением входных данных прямой задачи с данными найденными из решения обратной. Подтверждается апробацией предложенной методики при интерпретации реального эксперимента по измерению оптических характеристик пламени в факеле. Найденные по предложенной методике значения температуры факела не противоречат данным показаний термопар.

Диссертация Каширского Д.Е. состоит из введения, 4 глав, заключения, 1 приложения и списка литературы. Материал изложен на 147 страницах, содержит 62 рисунков, 29 таблиц и библиографический список из 196 наименований.

Во **введении** содержится описание области научных исследований, к которой относится данная работа. Обоснована актуальность выбранного направления исследования, сформулированы цель и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, представлено краткое содержание диссертации.

**Первая глава** посвящена постановке задачи и краткому обзору литературы, отражающему современное состояние проблем, касающихся темы исследования.

**Вторая глава** посвящена описанию физико-математической модели распространения излучения в газовой-аэрозольных средах, учитывающей параметры и характеристики

источника излучения (центр, форма контура, спектральная ширина линии генерации лазера и др.), среды распространения излучения (молекулярное и аэрозольное ослабление) и приемного устройства (аппаратная функция, разрешающая способность), а так же её программной реализации.

**Третья глава** посвящена рассмотрению роли внешних параметров лазерного излучения: спектральных центров и ширин лазерных линий.

**В четвертой главе** рассматривается предложенная методика одновременного определения температуры и парциальных давлений составляющих газовых сред с значительным градиентом искомых параметров.

**В заключении** сформированы основные результаты диссертационной работы.

**В приложении** содержится документ об официальной государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Наиболее важные результаты, полученные автором и их новизна** заключаются в следующем:

1. Построена физико-математическая модель распространения излучения в газовой-аэрозольной среде, которая за счет учета параметров и характеристик триады «источник-среда-приемник» позволяет получать теоретические результаты, максимально приближенные к экспериментальным измерениям в широких интервалах изменения температуры и давления газовой смеси.
2. Создано программное обеспечение «TRAVA», обеспечивающее формирование для различных значений температуры и давления баз данных параметров спектральных линий поглощения молекул и расчет различных спектральных характеристик газовой-аэрозольных сред: коэффициентов поглощения газов, коэффициентов аэрозольного ослабления, оптических толщ, функций пропускания, функций поглощения, энергетической яркости.
3. Предложена методика определения прецизионных значений центров линий излучения лазеров на двухатомных молекулах в ИК диапазоне на примере СО-лазера.
4. Проведен анализ влияния спектральной ширины линии излучения лазера на измеряемые коэффициенты поглощения и функции пропускания газов. Показано, что величина ширины линии излучения оказывает сильное влияние на измеряемые величины.
5. Предложен простой способ определения спектральной ширины лазерной линии, который предполагает использование газового объема (при фиксированных давлении и температуре) для определения спектральной ширины лазерной линии по измеренной функции пропускания излучения лазера на основе ранее рассчитанной

теоретической зависимости функции пропускания от спектральной ширины линии излучения лазера.

6. Предложена новая методика для определения температуры и парциальных давлений компонентов нагретой газовой среды из активных (по функции пропускания) или пассивных (по собственному излучению) дистанционных измерений. Проведена и апробирована интерпретации эксперимента по измерению оптических характеристик факела горящего этанола в условиях приземного слоя атмосферы для определения температуры и парциального давления горячих газов  $H_2O$  и  $CO_2$ .

Диссертация Каширского Д.Е. направлена на разработку математического аппарата решения обратной задачи оптики газовых сред и определения пространственных распределений температуры и концентраций газовых компонентов в смеси из измерений собственного или зондирующего излучения для дистанционного анализа термодинамически неоднородных газовых сред при значительных градиентах температуры и парциальных давлений. Разработка физико-математической модели распространения излучения в газовой-аэрозольной среде и алгоритма многофункционального программного обеспечения, реализующего точные расчеты коэффициентов и функций поглощения, пропускания и излучательной способности газовой-аэрозольных сред позволили получить неплохое согласие экспериментальных и расчетных данных (см. рисунки 4.17 и 4.18 диссертации), что несомненно является хорошим подтверждением достоверности полученных результатов.

**Практическая значимость.** Несомненно, высокой оценки заслуживает то, что исследования в работе Д.Е. Каширского доведены до практически важных и значимых результатов. Разработанное программное обеспечение использовано в учебном процессе при выполнении пяти курсовых работ, трех бакалаврских работ и трех магистерских диссертаций и продолжается ее использование при выполнении НИРС студентов.

Результаты, полученные при выполнении данной работы, использованы Томским государственным университетом, Томским политехническим университетом, Институтом оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, что подтверждается совместными публикациями, а также могут использоваться организациями, проводящими научно-исследовательские работы по тематике данной диссертации.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 25 печатных работах, среди которых 15 публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 9 публикаций в материалах международных, всероссийских и научно-практических конференциях и симпозиумах и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

По диссертации Каширского Д.Е. можно сделать следующие замечания:

- В диссертационной работе приводятся данные о согласии рассчитанных значений

энергий колебательно-вращательных уровней молекулы СО и центров линий генерации СО-лазера, но не приводится сравнения согласия с расчетами других авторов.

– Графики диссертации не содержат доверительных интервалов, что затрудняет их анализ.

Тем не менее, отмеченные недостатки не снижают общей высокой оценки работы. Диссертация написана в хорошем стиле, хорошо оформлена. Автореферат диссертации полностью и правильно отражает ее содержание и полученные автором результаты.

Наиболее важным результатом можно считать создание методики для определения температуры и парциальных давлений компонентов нагретой газовой среды из активных (по функции пропускания) или пассивных (по собственному излучению) дистанционных измерений. Данный метод позволил автору провести, и апробировать интерпретации эксперимента по измерению оптических характеристик факела горящего этанола в условиях приземного слоя атмосферы для определения температуры и парциального давления горячих газов  $H_2O$  и  $CO_2$ .

Считаю, что актуальность темы диссертационной работы, научная ценность, практическая значимость полученных результатов и адекватность их изложения позволяют сделать вывод, что диссертационная работа «Определение термодинамических характеристик неоднородных газовых сред оптическими методами», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика и автореферат соответствуют всем требованиям действующего положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации, а соискатель Каширский Данила Евгеньевич заслуживает присвоения искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика.

Ведущий научный сотрудник  
лаборатории оптических излучений  
Института сильноточной электроники СО РАН,  
доктор физико-математических наук

Виктор Михайлович Орловский

16.10.2014 г.

Телефон: 8 (3822) 491-443

Email: orlovskii@loi.hcei.tsc.ru

Адрес: пр. Академический 2/3, г. Томск, 634055

Подпись Орловского В.М. удостоверено  
Учёный секретарь ИСЭ СО РАН

И.В. Пегель

