

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Шерстова Игоря Владимировича «Лазерные оптико-акустические газоанализаторы на основе резонансного дифференциального оптико-акустического детектора», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 1.3.6. – Оптика

### 1. АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Диссертация Шерстова Игоря Владимировича «Лазерные оптико-акустические газоанализаторы на основе резонансного дифференциального оптико-акустического детектора» посвящена разработке новых методов и средств для высокочувствительного анализа молекулярных газов и проведения исследования газового состава атмосферы, различных технологических газовых смесей, выдыхаемого воздуха в режиме реального времени и на месте отбора пробы. Данный подход является альтернативным и дополнительным методом газового анализа к таким широко известным и применяемым на практике методам, как газовая хроматография, масс-спектрометрия и абсорбционная ИК-спектроскопия. Разработка новых методов и устройств газового анализа, основанных на применении лазерных технологий, расширяет круг задач, которые можно решать с помощью методов спектрального анализа, позволяет решить такие практические проблемы как сокращение времени анализа, устранить необходимость квалифицированного обслуживания аналитических систем и использования поверочных смесей и газовых носителей, являющихся расходными материалами. Применение оптико-акустической спектроскопии для решения ряда задач газоанализа является актуальным и востребованным практикой. Измерительные системы, построенные на данном методе, позволяют в режиме реального времени измерять содержание молекулярных газов, абсолютная концентрация которых превышает порог чувствительности метода. Первоочередной задачей исследований Шерстова И.В. являлась разработка компактных высокочувствительных лазерных оптико-акустических газоанализаторов на основе перестраиваемых лазеров среднего ИК диапазона и резонансного дифференциального оптико-акустического детектора, обеспечивающих работу в режиме реального времени и в полевых условиях, повышение точности и воспроизводимости измерения поглощения газа лазерными ОА-газоанализаторами в условиях нестабильности длины волны лазерного излучения, изменения температуры и состава исследуемых газовых смесей, расширение сфер применения лазерных ОА-газоанализаторов. С учетом приведенного выше, тема диссертации Шерстова И.В. является актуальной.

## 2. СОДЕРЖАНИИ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов по работе, списка литературы, состоящего из 224 наименований, и трех приложений. Работа содержит 155 рисунков и 10 таблиц. Общий объем диссертации составляет 257 страниц.

*Во введении* обоснована актуальность темы исследования, рассмотрена степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи исследования, указаны новизна и практическая значимость полученных результатов, определены использованные методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, аргументирована достоверность полученных результатов, приведена информация об их апробации, сформулирован личный вклад, а также представлена информация о структуре и объеме диссертации.

*В первой главе* проведен анализ современного состояния лазерной оптико-акустической спектроскопии. Показано, что в настоящее время наивысшая чувствительность лазерных ОА-газоанализаторов получена при использовании нескольких вариантов резонансных опто-акустических детекторов (ОАД) или их аналогов. Сделан вывод, что традиционные резонансные ОАД ввиду своей простоты и надежности имеют определенный потенциал для построения высокочувствительных портативных лазерных ОА-газоанализаторов, пригодных для работы в реальном времени и в полевых условиях, в том числе и для установки на БПЛА.

*Во второй главе* диссертации представлены результаты исследования акустических мод резонансных ОАД различных типов. Показано, что в дифференциальных ОАД с двумя параллельными акустическими резонаторами формируются кольцевые акустические моды типа А, которые охватывают оба акустических резонатора дифференциального детектора, выступают из акустических резонаторов в буферные полости детектора на малое расстояние (~1-2 мм) и не достигают фланцев (окон) дифференциального ОАД, что существенно снижает чувствительность данных детекторов к поглощению излучения лазера окнами детектора. Также установлено, что в резонансном дифференциальном ОАД формируются синфазные продольные акустические моды типа В, которые распространяются по всей длине детектора, включая буферные полости, а пучности колебаний давления этих мод расположены на фланцах (окнах) ОАД. Экспериментально показано, что максимальный частотный интервал между резонансами акустических мод А1 и В2, достигается при малой длине буферных полостей, что имеет свои преимущества. Разработан специальный алгоритм оперативного измерения низшей резонансной частоты дифференциального ОАД, обеспечивающий высокую воспроизводимость и снижение погрешности измерения газа-маркера.

В третьей главе представлены результаты разработки и исследования лазерного ОА-течеискателя SF<sub>6</sub>. Для снижения погрешности измерения концентрации SF<sub>6</sub> использована нормировка сигналов поглощения в измерительном ОАД по сигналам поглощения в отпаянной газонаполненной ОА-ячейке, что обеспечивает значительную компенсацию зависимости показаний ОА-газоанализатора SF<sub>6</sub> от нестабильности длины волны CO<sub>2</sub> лазера. На основе предложенной оптической схемы с отпаянной газонаполненной ОА-ячейкой разработан лазерный ОА-газоанализатор SF<sub>6</sub> с пороговой чувствительностью ~100 ppt SF<sub>6</sub>. Показано, что минимальная необходимая мощность излучения CO<sub>2</sub> лазера составляет ~150 мВт. Разработана и испытана новая серия «KARAT» переносных высокочувствительных лазерных ОА-течеискателей SF<sub>6</sub>, чувствительность которых в 1000 раз превосходит чувствительность любого коммерческого течеискателя SF<sub>6</sub>. ОА-течеискатель элегаза «SF<sub>6</sub> LaserGasTest» производится мелкими сериями, получил Свидетельство об утверждении типа средств измерения РФ.

Четвертая глава диссертации посвящена описанию разработки и исследования лазерного ОА-газоанализатора «ЛазерБриз» на основе широкополосного перестраиваемого параметрического генератора света (2,5-10,8 мкм) и резонансного дифференциального ОАД. С помощью разработанного ОА-газоанализатора исследованы спектры поглощения 24 различных газов. Лазерный ОА-газоанализатор «ЛазерБриз» используется для исследования проб выдоха пациентов медицинских клиник.

Пятая глава диссертации посвящена разработке аэромобильного лазерного ОА-газоанализатора метана на основе квантово-каскадного лазера ( $\lambda \approx 7,65$  мкм). Проведено сравнение параметров разработанного ОА-газоанализатора метана с лучшими результатами работ других групп исследователей в мире. Показано, что разработанный лазерный ОА-сенсор метана является одним из наиболее высокочувствительных ОА-газоанализаторов CH<sub>4</sub>, который может быть использован на борту БПЛА.

В заключении приведены основные полученные результаты.

Приложения содержат дополнительные материалы, а также документы подтверждающие практическое использование результатов диссертации и Акты внедрения.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации, ее основным результатам и выводам.

### 3. ДОСТОВЕРНОСТЬ ОСНОВНЫХ ВЫВОДОВ И РЕЗУЛЬТАТОВ

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается использованием независимых экспериментальных методик, протоколами сравнительных испытаний с эталонными средствами измерений, воспроизводимостью экспериментальных данных, их

соответствием численным расчетам и моделированию, а также непротиворечивостью полученных данных.

Представленные результаты прошли экспертизу в ведущих российских и зарубежных научных журналах по оптике, спектроскопии и приборостроению. По теме диссертации опубликовано 68 работ, 25 из которых статьи в периодических журналах, входящих в базы Web of Science и Scopus, 10 патентов.

#### 4. НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

В диссертации И.В. Шерстова представлены результаты, обладающие научной новизной и имеющие практическую значимость:

- Разработан вариант резонансного дифференциального ОАД с малой длиной буферных полостей, имеющий минимальную чувствительность к поглощению в окнах.

- Разработан метод оперативного измерения низшей резонансной частоты ОАД в условиях изменения температуры и состава газовых смесей.

- Для снижения погрешности измерения концентрации газа-маркера, связанной с нестабильностью длины волны лазера, разработаны новые оптические схемы ОА-газоанализатора со сбалансированной газонаполненной ОА-ячейкой вместо измерителя мощности лазера.

- Разработан переносной высокочувствительный лазерный ОА-течеискатель  $\text{SF}_6$ , которая превышает чувствительность лучших коммерческих течеискателей  $\text{SF}_6$  в мире как минимум в 1000 раз.

- Разработан лазерный ОА-газоанализатор медицинского назначения на основе ПГС ( $\lambda = 2,5 \dots 10,8$  мкм) для проведения многокомпонентного экспресс-анализа выдоха пациентов, страдающих различными заболеваниями.

- Разработан ОА-газоанализатор метана на основе квантово-каскадного лазера ( $\lambda \approx 7,7$  мкм), предназначенный для выполнения ряда геолого-геофизических работ в полевых условиях на борту БПЛА.

Работа соответствует приоритетам Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (Указ Президента РФ от 28.02.2024 г. № 145):

- «Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников энергии, способов ее передачи и хранения»;

- «Объективная оценка выбросов и поглощения климатически активных веществ, снижение их негативного воздействия на окружающую среду и климат, повышение

возможности качественной адаптации экосистем, населения и отраслей экономики к климатическим изменениям».

## 5. ЗАМЕЧАНИЯ

Основные замечания относятся к главе 4, в которой представлены результаты разработки медицинского оптико-акустического газоанализатора выдыхаемого воздуха.

Не совсем точно, на наш взгляд, сформулирован результат разработки ОА-газоанализатора медицинского назначения на основе широкополосного перестраиваемого ПГС ( $\lambda=2,5-10,8$  мкм). На самом деле автором разработан ОА-анализатор для высокочувствительного измерения спектров поглощения многокомпонентных газовых смесей в широком спектральном диапазоне от 2.5 до 10.8 мкм со спектральным разрешением  $\sim 5$  см<sup>-1</sup>.

С точки зрения возможности использования этого прибора для высокочувствительного анализа следов молекул-биомаркеров в выдыхаемом воздухе и дальнейшего использования результатов такого анализа для целей медицинской диагностики существует ряд серьезных проблем.

С одной стороны, предлагаемый метод анализа обладает чрезвычайно высокой чувствительностью ко всем компонентам исследуемой газовой смеси, поэтому будет реагировать на очень малое поглощение, в том числе и на не селективное, различными веществами в смеси. С другой стороны, доступное с его помощью спектральное разрешение не является достаточно высоким, оно сравнимо с разрешением призмических спектрофотометров и, как указывает автор, составляет  $\sim 5$  см<sup>-1</sup>. Этого разрешения не достаточно не только для того, чтобы измерить контур отдельных колебательно-вращательных линий поглощения многих молекул, но даже для разрешения колебательно-вращательной структуры полос поглощения некоторых молекул. В спектральном диапазоне 2.5-10.8 мкм практически все известные газообразные молекулы имеют спектры поглощения, которые, как правило, сильно интерферируют и могут вносить вклад в регистрируемый сигнал. Анализ содержания какой-либо газообразной молекулы в сложных газовых смесях с высокими чувствительностью, точностью и селективностью требуют тщательного выбора отдельной линии поглощения, гарантирующего отсутствие интерференции с линиями других газов, и точного измерения контура этой линии. Особую проблему при таком выборе представляет наличие в анализируемых смесях паров H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub>, имеющие на несколько порядков более высокие концентрации и очень богатые КВ спектры во всем ИК-диапазон, а также интерференция основных полос поглощения

практически всех углеводов. Проблема существенно усугубляется, если спектральное разрешение прибора недостаточно для работы с отдельными линиями поглощения.

Автор предлагает для решения проблем поглощения парами воды проводить предварительную глубокую осушку отбираемых проб выдыхаемого воздуха. Однако, осушка, и особенно с вымораживанием, приводит к искажению состава выдыхаемого воздуха. Даже отбор пробы воздуха в пластиковый пакет приводит к изменению ее состава (например, аммиак и этилен сорбируются стенками).

Анализ ряда газов-биомаркеров ( $\text{NO}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}$ ) имеет диагностическую значимость лишь при детектировании их в выдохе в реальном времени и при проведении динамических тестов, что в рассматриваемом подходе трудно реализуемо.

Анализ летучих углеводов с помощью предлагаемого подхода не является селективным, поэтому трудно точно определить, какое вещество дает вклад в сигнал.

Изотопический анализ отношения  $^{13}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2$  в выдыхаемом воздухе для диагностических целей требует очень высокой точности и селективности измерений, которые, судя по всему, не достижимы с помощью предлагаемого подхода.

Результаты калибровки анализатора с помощью бинарных газовых смесей не являются корректными в случае применения к многокомпонентным газовым смесям. Поэтому представленные метрологические характеристики (относительная погрешность измерений и достоверность полученных результатов) могут быть отнесены лишь к случаю анализа бинарных газовых смесей. То же касается и класса точности средства измерения медицинского назначения – 30, как и достоверности определения ЛС, «составившей не менее 0,95». Для обеспечения необходимой точности анализа по каждому газу необходимо проводить отдельную калибровку в составе выдыхаемого воздуха, а не в бинарных смесях, и при этом использовать альтернативные измерительные методы в качестве эталонных.

К сожалению, в работе не приведено ни одного реального примера использования прибора для диагностики каких-либо заболеваний, хотя прибор более 10 лет находится на испытаниях в медицинских учреждениях.

Указанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертации Шерстова И.В.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа И.В. Шерстова «Лазерные оптико-акустические газоанализаторы на основе резонансного дифференциального оптико-акустического детектора» выполнена на высоком научно-техническом уровне и является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором

исследований решена научная проблема разработки новых видов лазерных ОА-газоанализаторов на основе оригинального варианта резонансного дифференциального ОАД, имеющая важное хозяйственное значение в нефтегазовой отрасли, химической промышленности и экологическом мониторинге. Результаты обладают научной новизной и опубликованы в высокорейтинговых международных научных журналах. Содержание диссертации соответствует пунктам 4, 5, 6 паспорта специальности 1.3.6. – Оптика (технические науки).

Работа соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а ее автор – Шерстов Игорь Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.6. – Оптика.

**Официальный оппонент:**

главный научный сотрудник отдела молекулярной физики и диагностики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», доктор физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика, профессор

Степанов Евгений Валерьевич

10.02.2026 г.

Адрес: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38

Сайт: <https://www.gpi.ru/>

e-mail: eugenestepanov@yandex.ru

раб. тел.: +79104084886

Я, Степанов Евгений Валерьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую



Степанова Е.В.  
ЗАВЕРЯЮ  
СЕКРЕТАРЬ ИОФ РАН  
Глушков В.В.