

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

### на диссертационную работу Шерстова Игоря Владимировича «ЛАЗЕРНЫЕ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИЕ ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ НА ОСНОВЕ РЕЗОНАНСНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ОПТИКО- АКУСТИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА»,

представленную на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 1.3.6 – Оптика

**Актуальность темы.** Наиболее чувствительными методами газоанализа являются газовая хроматография и масс-спектрометрия. Однако эти методы не могут работать в режиме реального времени и в полевых условиях. Метод лазерной оптико-акустической спектроскопии (ЛОАС) является одним из наиболее чувствительных методов лазерного газоанализа атмосферы, позволяющий локально измерять микроконцентрации различных примесных и загрязняющих газов в режиме реального времени. Диссертация И.В. Шерстова «Лазерные оптико-акустические газоанализаторы на основе резонансного дифференциального оптико-акустического детектора» посвящена разработке современных лазерных газоанализаторов на основе метода оптико-акустической спектроскопии для проведения исследования газового состава атмосферы, различных технологических газовых смесей, выдыхаемого воздуха и проч. в режиме реального времени и на месте отбора пробы.

**Целью диссертационного исследования** является во-первых: подробное экспериментальное исследование свойств различных мод акустических колебаний внутри ячейки оптико-акустического детектора с целью оптимизации конфигурации детектора. Во-вторых: разработка компактных высокочувствительных лазерных оптико-акустических газоанализаторов на основе перестраиваемых лазеров среднего ИК диапазона и найденной конфигурации резонансного дифференциального оптико-

акустического детектора, расширение сфер применения лазерных ОА-газоанализаторов.

**Научная новизна и практическая значимость исследований.** В диссертации И.В. Шерстова представлены результаты, обладающие научной новизной, имеющие практическую значимость:

- Проведено подробное экспериментальное исследование различных акустических мод дифференциального ОАД. На основе этого исследования разработан оптимальный вариант резонансного дифференциального ОАД с малой длиной буферных полостей,
- 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 с отпаянной газонаполненной ОА-ячейкой вместо измерителя мощности лазера.
- Разработан переносной высокочувствительный лазерный ОА-течеискатель  $SF_6$ , которая превышает чувствительность лучших коммерческих течеискателей  $SF_6$  в мире как минимум в 1000 раз.
- Разработан лазерный ОА-газоанализатор медицинского назначения на основе ПГС ( $\lambda = 2,5...10,8$  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.

**Обоснованность и достоверность научных положений и выводов.** Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается хорошим совпадением теоретических расчетов с результатами экспериментальных измерений, повторяемостью результатов.

Разработанный высокочувствительный лазерный ОА-течеискатель SF<sub>6</sub> («KARAT» / «SF<sub>6</sub> LaserGasTest») производится мелкими сериями, официально зарегистрирован в реестре Средств измерений Росстандарта. Другие разработанные образцы лазерных ОА-газоанализаторов также прошли проверку в различных областях науки и техники, в т. ч. в медицине.

**Рекомендации по использованию результатов диссертации.**  
Результаты диссертационного исследования могут быть использованы при разработке новых образцов высокочувствительных переносных лазерных ОА-газоанализаторов, работающих в режиме реального времени и в месте забора пробы, по чувствительности приближающихся к газовым хроматографам.

**Краткая характеристика основного содержания диссертации.**  
Диссертация И.В. Шерстова состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, трех Приложений, в т. ч. Акты внедрения, занимает 257 страниц.

Во Введении дана краткая характеристика диссертационной работы, сформулированы актуальность, цели и задачи исследования, защищаемые положения, описаны научная новизна, практическая значимость, апробация результатов, личный вклад автора.

В главе 1 проведен анализ современного состояния лазерной оптико-акустической спектроскопии. Показано, что в настоящее время наивысшая чувствительность лазерных ОА-газоанализаторов получена при использовании нескольких вариантов резонансных 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 т. ч. для установки на БПЛА.

Центральной главой диссертации является глава 2, в которой проведено подробное экспериментальное исследование акустических мод

резонансных ОАД различных типов. Показано, что в дифференциальных ОАД с двумя близко расположенными параллельными акустическими резонаторами формируются локальные акустические моды, охватывающие оба резонатора. Моды являются антисимметричными относительно плоскости, разделяющей два резонатора. Фазы колебаний в резонаторах противоположны. Эти моды хорошо локализованы, они выступают из акустических резонаторов в буферные полости детектора лишь на малое расстояние ( $\sim 1 \dots 2$  мм). Использование антисимметричных локальных мод с противофазными колебаниями в двух резонаторах существенно снижает чувствительность ОАД к различным акустическим воздействиям, имеющим одинаковую фазу в обоих резонаторах. Найдена оптимальная конфигурация ОАД, для которой частота низшей антисимметричной моды сильно отличается от частоты симметричных акустических мод.

Разработан специальный алгоритм оперативного измерения низшей резонансной частоты дифференциального ОАД, обеспечивающий высокую воспроизводимость и снижение погрешности измерения газа-маркера.

Далее, с использованием найденной оптимальной конфигурации ячейки ОАД, разрабатываются приборы для измерения концентраций различных газовых примесей.

В главе 3 представлены результаты разработки и исследования лазерного ОА-течеискателя  $SF_6$  на основе волноводного  $CO_2$  лазера. Для снижения погрешности измерения концентрации  $SF_6$  использована нормировка сигналов поглощения в измерительном ОАД по сигналам поглощения в отпаянной газонаполненной ОА-ячейке, что обеспечивает значительную компенсацию зависимости показаний ОА-газоанализатора  $SF_6$  от нестабильности длины волны  $CO_2$  лазера. На основе предложенной оптической схемы с отпаянной газонаполненной ОА-ячейкой разработан лазерный ОА-газоанализатор  $SF_6$  с пороговой чувствительностью  $\sim 100$  ppt  $SF_6$ . Показано, что минимальная необходимая мощность излучения  $CO_2$  лазера составляет  $\sim 150$  мВт. Разработана и испытана новая серия «KARAT»

переносных высокочувствительных лазерных ОА-течеискателей  $SF_6$ , чувствительность которых в 1000 раз превосходит чувствительность любого коммерческого течеискателя  $SF_6$ . ОА-течеискатель элегаза « $SF_6$  LaserGasTest» производится мелкими сериями, получил Свидетельство об утверждении типа средств измерения РФ.

В главе 4 описаны результаты разработки и исследования лазерного ОА-газоанализатора «ЛазерБриз» на основе широкополосного перестраиваемого ПГС (2,5...10,8 мкм) и резонансного дифференциального ОАД. С помощью разработанного ОА-газоанализатора исследованы спектры поглощения 24 различных газов. Лазерный ОА-газоанализатор «ЛазерБриз» активно используется для исследования проб выдоха пациентов медицинских клиник.

В главе 5 представлена разработка 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  $CH_4$ , который может быть использован на борту БПЛА.

В Заключение подводятся итоги диссертационной работы, формулируются ее основные результаты. В Приложении приведены дополнительные сведения по разработанным лазерным ОА-газоанализаторам, а также Акты внедрения.

В целом диссертация И.В. Шерстова является законченным исследованием, представляет решение актуальных задач по лазерному газоанализу, объединенных общим подходом, обеспечивающим возможность разработки новых высокочувствительных ОА-газоанализаторов, конкурирующих по чувствительности с газовыми хроматографами.

## Рекомендации и замечания.

1. Из литературного обзора на странице 20 : «Авторы работы [61] утверждают, что чувствительность резонансного ОАД на резонансной частоте обратно пропорциональна добротности резонанса ( $Q$ )» . Опечатка ?
2. Вопрос о добротности найденных акустических мод. В личной беседе автор отметил, что добротность определяется потерями энергии вследствие вязкости газа при движении в полостях ОАД. Это подтверждается увеличением добротности при увеличении радиуса канала. Простые соображения о запасе энергии в акустической моде (пропорциональна  $R^2$ ) и потери энергии за период (пропорциональна  $R^{-1}$ ) приводят к выводу, что добротность должна быть пропорциональна  $R^3$ . Интересно было бы это проверить.
3. Формулы 3.19 -3.24, для величины сигналов измерительного ОАД ( $U_1$ ) и газонаполненной ОА Ref-ячейки ( $U_2$ ), а также их отношение ( $U_1/U_2$ ), содержат коэффициент пропускания оптического окна  $T_w$ . Для использования Ref-ячейки важно, чтобы этот коэффициент не зависел от длины волны. Не совсем понятно физическая природа этого коэффициента. В работе использовались просветленные на 10.6 мкм окна из ZnSe. Поглощение ZnSe пренебрежимо мало. Если автор имеет в виду отражение вследствие неидеального просветления, то величина  $T_w$  будет зависеть от длины волны вследствие интерференции отражений от двух поверхностей, что приведет к погрешностям при нормировке на сигнал ОА Ref-ячейки. Если же просветление достаточно хорошее ( $R < 0.5\%$ ), то можно считать  $T_w = 1$  и лучше убрать этот коэффициент из формул.
4. Одним из основных результатов диссертации является: «Разработана и испытана процедура оперативного измерения низшей резонансной частоты ОАД практически в реальном времени (не более 0,1 с), погрешность измерения не превышает  $\pm 0,1$  Гц.». Этот результат сразу вызывает подозрения, так как противоречит соотношению неопределенностей частота-

время. Подробно это процедура измерений описана в публикации авторов А12. Метод состоит в исследовании реакции ОАД на короткий акустический импульс. Реакция ОАД измеряется в течение примерно 0.02 сек в виде массива 256 точек. Далее делается дискретное преобразование Фурье и определяется амплитуды трех Фурье-компонент - компоненты с наибольшей амплитудой и двух соседних. Искомая частота определяется как частота наибольшей Фурье-компоненты плюс поправка, вычисляемая из амплитуд трех измеренных Фурье -компонент. Формула, по которой вычисляется поправка, исходит из предположения, что резонансный контур вблизи искомой резонансной частоты имеет форму параболы.

Однако при используемых параметрах (256 точек, частота дискретизации 13982 Гц) расстояние между частотами Фурье -компонент составляет 54 Гц, что сопоставимо с шириной резонансного контура. При таких интервалах частоты предположение о квадратичной зависимости совершенно не оправдано. Я проделал простой расчет, с использованием контура Лоренца. В этом случае поправка, вычисленная по предлагаемой в работе формуле, привела к ошибке в 4.1 Гц.

Надо отметить, что при ширине резонанса 30-40 Гц практически нет никакой необходимости измерять частоту с точностью 0.1 Гц. Ошибка в 4 Гц тоже не имеет значения.

### **Заключение.**

Несмотря на отмеченные замечания, считаю, что диссертационная работа И.В. Шерстова соответствует уровню докторской диссертации и обладает несомненной теоретической и практической значимостью. На основании выполненных автором исследований решена научно-техническая проблема создания компактных высокочувствительных лазерных ОА-газоанализаторов, имеющая важное значение для газоаналитического приборостроения.

**Общее заключение.** Диссертационная работа И.В. Шерстова «Лазерные оптико-акустические газоанализаторы на основе резонансного дифференциального оптико-акустического детектора» выполнена на высоком научном уровне и является законченным исследованием, посвященным разработке и исследованию лазерных ОА-газоанализаторов на основе оригинального варианта резонансного дифференциального ОАД (модель ОАД-90) при использовании различных источников излучения. Основные результаты диссертации опубликованы в 68 научных работах, в том числе 25 научных статьях в рецензируемых журналах, включенных ВАК в перечень ведущих периодических изданий.

Диссертация соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней и является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей важное значение для дальнейшего развития метода лазерной оптико-акустической спектроскопии. Автореферат диссертации, в целом, отражает ее содержание и соответствует требованиям п. 25 Положения.

Таким образом, диссертационная работа Шерстова Игоря Владимировича на тему «Лазерные оптико-акустические газоанализаторы на основе резонансного дифференциального оптико-акустического детектора» является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические и практические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, изложены новые оригинальные научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие методов газоанализа с использованием лазеров.

Работа соответствует заявленной специальности 1.3.6 «Оптика» в области технических наук и в полной мере отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук. Ее автор, Шерстов Игорь

Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук.

Официальный оппонент,  
заведующий лаборатории «Лазерной фотохимии» Института химической кинетики и горения им. В.В.Воеводского (ИХКГ СО РАН), доктор химических наук (специальность 02.00.15 – Кинетика и катализ), с.н.с.

  
Чесноков Евгений Николаевич

12 февраля 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук

Краткое наименование: ИХКГ СО РАН

Юридический и фактический адрес:

Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3

тел.: +7(383) 330-91-50 ; 333-00-90

E-mail chesnok@kinetics.nsc.ru

Подпись Е.Н.Чеснокова удостоверяю.

Ученый секретарь ИХКГ СО РАН,



Пыряева Александра Павловна

12 февраля 2026 г.