

ФЕДОТОВ Юрий Викторович

**РАЗРАБОТКА ЛАЗЕРНОГО ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОГО
АНАЛИЗАТОРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ
ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ**

**Специальность 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные
приборы и комплексы**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва - 2002 год

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом
Университете им. Н. Э. Баумана Министерства образования РФ.

Научный руководитель:

Доктор технических наук,
профессор, В. И. Козинцев

Официальные оппоненты:

1600077

Федотов Ю.В.

Разработка лазерного оптико-
акустического анализатора

для контроля

многокомпонентных газов...

2002

0-00

Ведущая организация:

Защита состоится "11"
дн
10

заседании
су:

1600077

С

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ

Ба

обозначенного здесь срока

д

Власов

227

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

НА ДОМ
РЕ
ТОЯ

Актуальность работы

В настоящее время, в связи с возрастающим уровнем выбросов вредных веществ, актуальной становится проблема загрязнения окружающей среды и особенно атмосферы.

Часто состав загрязнений атмосферы довольно сложен, т.е. они являются многокомпонентной смесью. Это может быть вызвано присутствием сразу нескольких загрязняющих веществ и фоновых атмосферных газов, кроме того, некоторые загрязнители могут взаимодействовать с атмосферными газами, образуя новые токсичные компоненты.

Для проведения природоохранных мероприятий, предотвращения экологических катастроф и обеспечения безопасности людей в производственной зоне промышленных (химических, металлургических и т.п.) предприятий и на прилегающих к ней территориях необходим постоянный оперативный контроль за уровнем содержания и эволюцией загрязняющих веществ в атмосфере.

Для решения задач экологического мониторинга необходимы мобильные анализаторы, позволяющие оперативно и с высокой точностью определять состав многокомпонентных газовых смесей. Такие приборы могут применяться также при контроле технологических процессов, исследовании биологических объектов, в медицине и т. д.

Одним из наиболее перспективных типов газоаналитических приборов являются лазерные оптико-акустические газоанализаторы на основе перестраиваемых лазеров, позволяющие проводить локальный количественный анализ многокомпонентных газовых смесей.

Однако задача количественного анализа многокомпонентных газовых смесей к настоящему времени до конца не решена.

Основной проблемой многокомпонентного лазерного газоанализа является сложность решения обратной задачи и, как следствие, отсутствие разработанных и апробированных методов количественного восстановления концентраций газов в многокомпонентных смесях, по результатам измерений.

Цели и основные задачи работы

Целью работы является разработка лазерного оптико-акустического анализатора для контроля многокомпонентных газовых смесей.

ИГТУ
Ч.О. Брумина
4.01.2014

Основные задачи работы:

- Проведение теоретических исследований с целью разработки автоматизированного метода выбора спектральных каналов измерения для оперативного анализа многокомпонентных газовых смесей.
- Разработка метода количественного восстановления концентраций газов для восстановления как малокомпонентных, так и многокомпонентных смесей.
- Создание алгоритмов и программ, позволяющих в автоматизированном режиме проводить количественный анализ многокомпонентных газовых смесей.
- Создание макета измерительного комплекса для лазерного оптико-акустического анализа многокомпонентных газовых смесей.
- Проведение экспериментальных исследований с целью проверки работоспособности измерительного комплекса и апробации разработанных методов и алгоритмов.

Научная новизна работы

- Разработан новый автоматизированный метод выбора спектральных каналов измерения для оперативного лазерного оптико-акустического анализа многокомпонентных газовых смесей, позволяющий сократить время поиска набора спектральных каналов измерения на 2÷3 порядка, по сравнению с известными методами.
- Разработан новый метод количественного восстановления концентраций газов многокомпонентных смесей, основанный на методе подбора квазиразрешения с использованием генетического алгоритма поиска, позволяющий с высокой точностью восстанавливать количественный состав как многокомпонентных, так и малокомпонентных газовых смесей.
- Создан макет измерительного комплекса на основе лазерного оптико-акустического газоанализатора со специальным программным обеспечением, позволяющим оперативно и с высокой точностью проводить количественный анализ многокомпонентных газовых смесей.
- Проведены экспериментальные исследования по восстановлению концентраций газов в многокомпонентных смесях с использованием разработанных методов и созданного измерительного комплекса.

Практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы нашли практическое применение при выполнении научно-исследовательских работ по темам «Саламандра ПГТУ-Т», «Барний», «Газоанализатор», «Синергетика - ГКНУ».

Созданный измерительный комплекс на основе лазерного оптико-акустического газоанализатора может послужить прототипом промышленного образца мобильного газоанализатора.

Положения, выносимые на защиту

1. Автоматизированный метод выбора спектральных каналов измерения для оперативного анализа многокомпонентных газовых смесей, не требующий полного перебора всех возможных вариантов, что позволяет сократить время поиска набора спектральных каналов измерения на 2+3 порядка, по сравнению с известными методами.
2. Метод количественного восстановления концентраций газов многокомпонентных смесей, основанный на подборе квазирешения системы уравнений лазерного оптико-акустического газоанализа с использованием генетического алгоритма поиска, позволяющий с высокой точностью восстанавливать количественный состав как многокомпонентных, так и малокомпонентных газовых смесей.
3. Измерительный комплекс на основе лазерного оптико-акустического газоанализатора, оснащенный разработанным специальным программным обеспечением, позволяющим в автоматизированном режиме проводить количественный анализ многокомпонентных газовых смесей.
4. Результаты экспериментальных исследований по восстановлению концентраций газов в многокомпонентных смесях с использованием разработанных методов и созданного измерительного комплекса.

Апробация работы и публикации

По результатам диссертационной работы было опубликовано 4 научных статьи и 15 тезисов докладов.

Результаты диссертации докладывались на 11 российских и международных конференциях и симпозиумах: I-IV Научно-технической конференции «Медико-технические технологии на страже здоровья» (Геленджик 1999-2001, Анталия 2002); X, XIII Международной научно-технической конференции «Лазеры в науке, технике, медицине» (Сочи 1999, 2002), Шестой международной конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва МЭИ 2000), VIII-IX Joint International symposium "Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics" (Irkutsk 2001, Tomsk 2002), V Международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (Владимир 2002), International Workshop on Atmospheric Spectroscopy Applications ASA, Moscow 2002.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Список цитируемых литературных источников включает 113 наименований. Общий объем работы – 159 страниц, включая 39 рисунков и 4 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Показана актуальность темы в связи с растущим уровнем загрязнений атмосферного воздуха. Рассмотрены методы локального лазерного газоанализа для контроля газовых загрязнений атмосферного воздуха. Описаны преимущества оптико-акустического метода с использованием перестраиваемых лазерных источников излучения для количественного анализа многокомпонентных газовых смесей.

Обсуждаются цель и задачи работы.

Глава 1. «Физические основы лазерного оптико-акустического газоанализа»

Рассматриваются физические основы лазерного оптико-акустического метода измерений. Описывается формирование оптико-акустического сигнала в результате поглощения лазерного излучения анализируемой газовой пробой.

Приводится система уравнений лазерного оптико-акустического газоанализа. Рассматривается применение метода дифференциального поглощения для количественного лазерного оптико-акустического анализа многокомпонентных газовых смесей.

Описываются особенности лазерных оптико-акустических газоанализаторов, их преимущества и недостатки.

Описывается методика математического моделирования для задачи количественного анализа многокомпонентных смесей с помощью лазерного оптико-акустического газоанализатора.

Глава 2. «Поиск набора спектральных каналов измерения при многокомпонентном лазерном оптико-акустическом газоанализе»

Набор спектральных каналов измерения (набор длин волн излучения лазера, на которых производится измерение показателя поглощения) существенно влияет на точность работы газоанализатора.

Если число газов в анализируемой газовой смеси не велико, спектры их поглощения достаточно просты и мало пересекаются друг с другом, ширина линий излучения лазерного источника много меньше ширины спектральных

линий (полос) поглощения газов и оперативного (секунды, минуты) определения спектральных каналов измерения не требуется (по характеру решаемой задачи), то спектральные каналы измерения могут быть выбраны вручную – по графикам спектров поглощения исследуемых газов.

В случае многокомпонентных газовых смесей при перекрытии спектров отдельных газовых компонент задача выбора спектральных каналов измерения становится сложной и порой неоднозначной. Возникает проблема поиска такого набора спектральных каналов измерения (НСКИ), при котором ошибки восстановления концентраций газов были бы минимальными. Причем, при оперативном газоанализе требуется принятие решения (о наборе спектральных каналов измерения) в ограниченное время (секунды, единицы минут).

Решение этой проблемы заключается в разработке специальных вычислительных алгоритмов, способных подбирать (на основе некоторого критерия) набор спектральных каналов измерения, при котором ошибки восстановления концентраций газов были бы минимальны или близки к минимальным.

Рассматриваются и сравниваются известные критерии автоматизированного поиска наборов спектральных каналов измерения (критерии, основанные на: оптимизации таких характеристик газоанализаторов как чувствительность и селективность; анализе расчетной матрицы, формируемой в методе наименьших квадратов; на анализе вариационно-ковариационной матрицы; на использовании коэффициента информативности; на косинусах углов между векторами в пространстве измеренных сигналов; на использовании меры близости матрицы коэффициентов поглощения к диагональной матрице; на использовании числа обусловленности системы линейных алгебраических уравнений; на использовании информационного расстояния в пространстве состояний исследуемого газового объекта).

Описываются особенности выбора оптимального набора спектральных каналов измерения, и рассматривается возможность применения известных критериев для лазерного оптико-акустического газоанализатора, работающего в режиме дифференциального поглощения.

Рассмотрена проблема, возникающая при поиске оптимального набора с использованием большинства известных критериев – необходимость полного перебора всех возможных вариантов наборов спектральных каналов измерения, и, как следствие, большого объема вычислений.

В диссертационной работе предлагается новый автоматизированный метод поиска набора спектральных каналов измерения для количественного анализа многокомпонентных газовых смесей лазерным оптико-акустическим газоанализатором, работающим в режиме дифференциального поглощения.

Автоматизированный метод поиска оптимального набора спектральных каналов измерения включает следующие этапы:

1. На первом этапе для каждого газового компонента анализируемой смеси проводится поиск всех возможных пар спектральных каналов измерения оптико-акустического газоанализатора, работающего в режиме дифференциального поглощения.

При этом для каждого возможного спектрального канала измерения с номером j_{on} (принимаемого за канал с большим значением показателя поглощения анализируемой газовой компоненты), из некой ограниченной спектральной области (вблизи спектрального канала с номером j_{on}) выбирается второй спектральный канал с номером j_{off} (принимаемый за канал с малым значением показателя поглощения анализируемой газовой компоненты), так чтобы был максимален параметр стоимости F следующего вида:

$$F(i, j_{on}, j_{off}) = (1 - b) \cdot \left[w_0^{j_{on}} \cdot k_i^{j_{on}} - k_i^{j_{off}} / w_0^{j_{off}} \right] - \\ - b \left\{ \sum_{l \neq i}^N \left[k_l^{j_{on}} + k_l^{j_{off}} \right] + \sum_{l \neq i}^N \left| k_l^{j_{on}} - k_l^{j_{off}} \right| \right\}$$

где: i - номер анализируемой газовой компоненты; N - число компонент в газовой смеси; w_0^j - относительная (нормированная на максимальную по всем линиям генерации мощность лазерного источника) мощность лазерного излучения на входе в ячейку для j - спектрального канала; j_{on} , j_{off} - номера длин волн пары спектральных каналов измерения, соответственно, с максимальным и минимальным значением коэффициента поглощения i -ой газовой компоненты в анализируемой смеси, k_i^j - коэффициент поглощения i -ой газовой компоненты в анализируемой смеси на j -ой длине волны; b - эмпирический коэффициент, учитывающий влияние “помехи” от других газов входящих в состав смеси.

2. Отобранные пары ранжируются отдельно для каждого газа в соответствии с параметром стоимости F .
3. Для анализируемой смеси выбирается такой набор пар длин волн, для которых параметр F максимален, при условии, что длины волн в наборе спектральных каналов измерения используются по одному разу.

Показано, что разработанный автоматизированный метод выбора спектральных каналов измерения не уступает по точности восстановления концентраций газов известным критериям выбора спектральных каналов измерения, и дает существенный выигрыш с точки зрения оперативности.

Глава 3. «Восстановление концентраций газов из данных лазерных оптико-акустических измерений в многокомпонентных газовых смесях методом поиска квазирешений»

Рассматривается некорректная математическая задача решения системы линейных уравнений лазерного оптико-акустического газоанализа многокомпонентных смесей.

Для решения этой задачи предлагается использовать перспективный метод нахождения приближенных решений – метод подбора квазирешений.

Для системы уравнений лазерного газоанализа квазирешение (вектор концентраций C^* , и вектор фонового поглощения A^*) находится из условия:

$$\rho(KC^* + A^*, Y) = \inf_{C \in D, A \in B} \rho(KC + A, Y),$$

где K - матрица коэффициентов поглощения; Y - вектор измеренных показателей поглощения; D, B - компактные множества, на которые наложены ограничения (обусловленные физической постановкой задачи газоанализа): на множество D наложены ограничения

$$0 \leq c_i \leq 1; \quad \sum_{i=1}^N c_i \leq 1, \text{ а на множество } B - \text{ограничение } \alpha_i \geq 0.$$

Для поиска квазирешения предлагается использовать эффективные генетические алгоритмы.

Описан созданный генетический алгоритм поиска квазирешений задачи количественного оптико-акустического газоанализа.

На основе математического моделирования показано, что разработанный метод восстановления концентраций компонент газовых смесей по данным измерений лазерного оптико-акустического газоанализатора может быть эффективно использован для количественного анализа как малокомпонентных, так и многокомпонентных газовых смесей.

Глава 4. «Измерительный комплекс на основе лазерного оптико-акустического газоанализатора»

Описывается разработанный измерительный комплекс на основе лазерного оптико-акустического газоанализатора. Основной особенностью разработанного измерительного комплекса является сопряжение лазерного оптико-акустического газоанализатора, содержащего отдельную микропроцессорную систему управления, с персональным компьютером (ПК), оснащенным специальным программным обеспечением. Использование ПК и отдельного микропроцессорного блока управления обеспечивает возможность проведения газоанализа многокомпонентных смесей, оперативность и высокую степень автоматизации процесса измерения.

Упрощенная структурная схема разработанного измерительного комплекса на основе ЛОАГ представлена на рис. 1.

В качестве источника излучения используется непрерывный дискретно перестраиваемый CO_2 лазер с высокочастотной накачкой, имеющий около 70 линий генерации в диапазоне 9,15-10,83 мкм (в этом спектральном диапазоне лежат молекулярные линии поглощения многих загрязняющих веществ).

Для газоанализатора выбрана оптико-акустическая ячейка нерезонансного типа, что хотя и снижает чувствительность газоанализатора, однако позволяет уменьшить объем и внутреннюю площадь ячейки (а значит уменьшить влияние адсорбции и десорбции и, как следствие, сократить время необходимое на продувку ячейки между двумя заборами газовых проб). Малые размеры нерезонансной ячейки делают ее привлекательной для использования в мобильной системе экологического мониторинга.

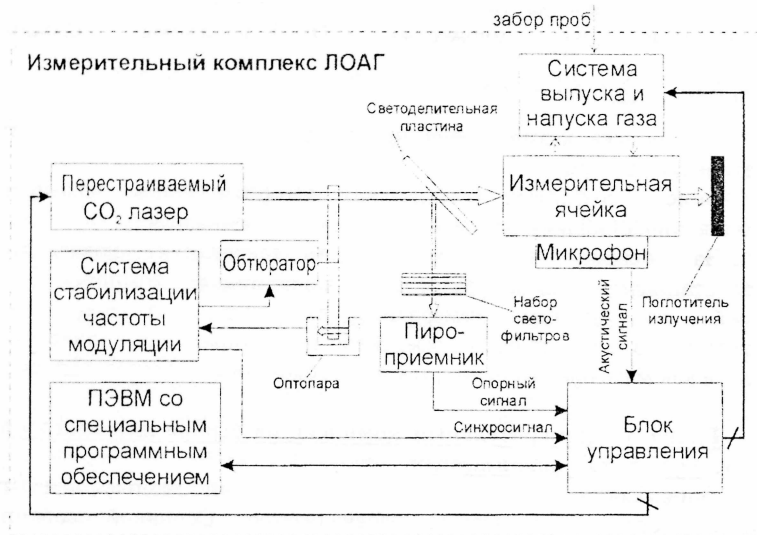


Рис. 1. Структурная схема разработанного измерительного комплекса на основе ЛОАГ

Для измерительного комплекса создано специальное программное обеспечение, позволяющее проводить количественный анализ многокомпонентных газовых смесей, который можно подразделить на несколько этапов:

1. Поиск набора спектральных каналов измерения, заключающийся в выборе M спектральных каналов для N компонентной смеси из $M_{\max}$ возможных каналов используемого источника излучения ($M_{\max} \geq M \geq N$);
2. Измерение поглощения исследуемой смеси в найденном НСКИ;
3. Восстановление концентраций компонент анализируемой газовой смеси по результатам измерений.

Максимальное (теоретически) число одновременно анализируемых компонент газовой смеси ($N_{\max}$) для разработанного измерительного комплекса определяется количеством спектральных каналов измерения $N_{\max} \sim M_{\max}/2 = 35$ ($M_{\max}$ - число спектральных каналов используемого – CO_2 лазера). Реальное число анализируемых компонент ограничивается их спектральными характеристиками, и составляет 10-15. Точность измерения показателя поглощения, составляет 1-10%. Ошибка восстановления концентраций существенно зависит от количества компонент, входящих в смесь, и от их спектральных характеристик, а также от точности измерения показателя поглощения.

Время одиночного измерения количественного состава многокомпонентной газовой смеси составляет единицы минут, и определяется в большей степени временем, необходимым на перестройку CO_2 лазера.

Высокая оперативность и автоматизация процесса газоанализа, простота управления делают данный прибор перспективным для контроля чистоты атмосферного воздуха.

Глава 5. «Экспериментальные исследования по восстановлению концентраций газов в многокомпонентных смесях с помощью разработанного измерительного комплекса»

Описываются измерения, проведенные на разработанном измерительном комплексе на основе ЛОАГ. Проводится анализ сигналов и экспериментальные определения концентраций компонент в газовых смесях с целью проверки работоспособности измерительного комплекса и апробации разработанных методов и алгоритмов.

На рис. 2 приведены результаты восстановления концентрации этилена в двухкомпонентной смеси этилен – углекислый газ. Здесь 1 – стандартный метод решения системы линейных алгебраических уравнений, 2 – метод поиска квази решений с использованием генетического алгоритма. Видно, что при количественном анализе малокомпонентных газовых смесей возможно устойчивое восстановление концентраций компонент при использовании метода прямого решения. Использование в этом случае методов решения некорректных математических задач (метода поиска квази решения) не дает

существенного выигрыша в точности восстановления по сравнению с использованием метода прямого решения.

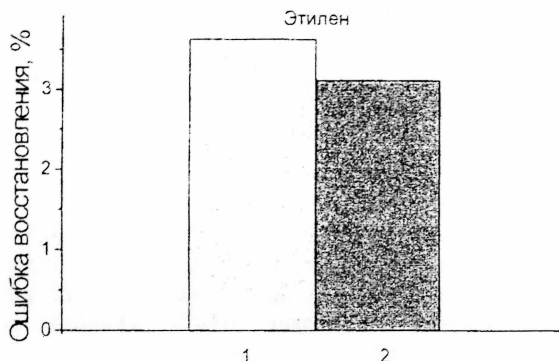


Рис. 2. Относительные ошибки восстановления концентраций этилена в двухкомпонентной смеси: этилен – углекислый газ

На рис. 3 приведены результаты восстановления концентрации газов в пятикомпонентной смеси аммиак – этилен – этанол – углекислый газ – метанол. Обозначения столбцов те же, что на рис. 2.

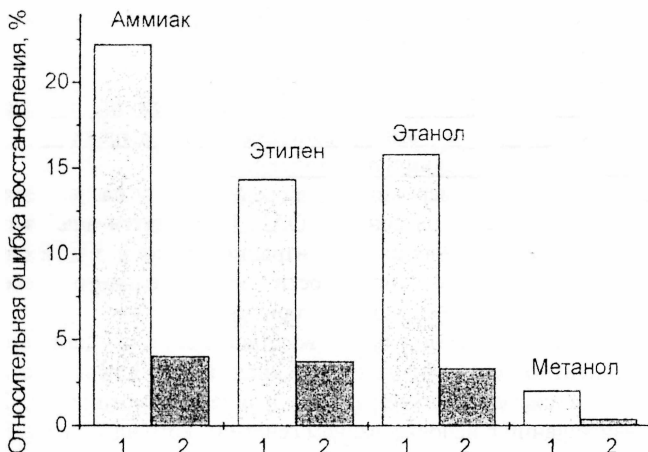


Рис. 3. Относительные ошибки восстановления концентраций газов в пятикомпонентной смеси: аммиак – этилен – этанол – углекислый газ – метанол

Из рисунка видно, что при восстановлении концентраций газов данной пятикомпонентной смеси применение метода поиска квазиразрешения уже дает ощутимый выигрыш в точности восстановления по сравнению с методом прямого решения.

При количественном анализе шестикомпонентной смеси проводились исследования влияния ошибок в задании коэффициентов поглощения газовых компонент, для чего в матрицу системы уравнений лазерного оптико-акустического газоанализа вносились искажения. Использовалась шестикомпонентная смесь этилен – углекислый газ – аммиак – метанол – этанол – изопропанол. Результаты восстановления при использовании искаженной матрицы коэффициентов поглощения приведены на рис. 4, а при использовании истинной матрицы на рис. 5.

На рис. 4 и 5, столбец 1 – стандартный метод решения системы линейных алгебраических уравнений, 2 – метод поиска квазиразрешений с использованием генетического алгоритма, 3 – метод регуляризации Тихонова (для выбора параметра регуляризации использовался метод невязки).

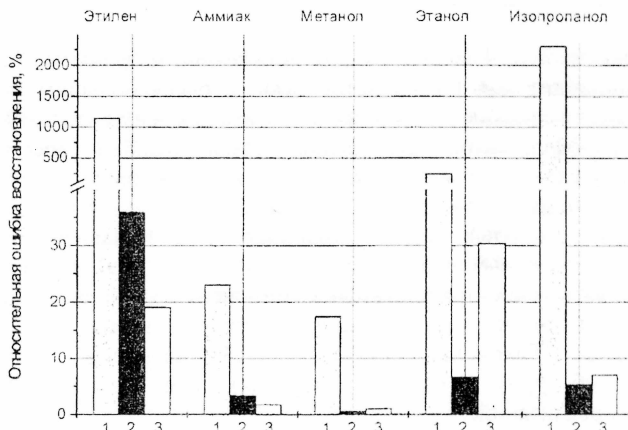


Рис. 4. Относительные ошибки восстановления концентраций газов в шестикомпонентной смеси: этилен – углекислый газ – аммиак – метанол – этанол – изопропанол с использованием искаженной матрицы коэффициентов поглощения газов

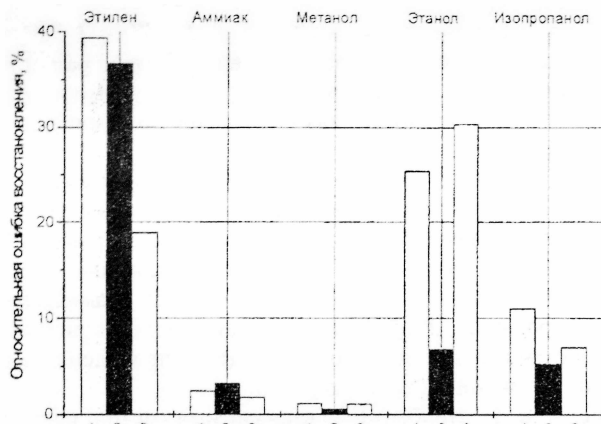


Рис. 5. Относительные ошибки восстановления концентраций газов в шестикомпонентной смеси: этилен – углекислый газ – аммиак – метанол – этанол – изопропанол с использованием действительной матрицы коэффициентов поглощения газов

Из рисунков 5, 4 видно, что для искаженной матрицы метод прямого решения приводит для большинства газов к очень большим ошибкам – сотням и тысячам процентов. В то же время как для действительной матрицы разницы коэффициентов поглощения газов ошибки восстановления концентраций газовых компонент были не особенно велики.

Уровень ошибок восстановления концентраций газов методом поиска квазирешений и методом регуляризации практически не зависит от ошибок в задании матрицы коэффициентов поглощения газов – оба метода позволяют восстанавливать концентрации газовых компонент с приемлемой точностью. Однако метод поиска квазирешений не требует (в отличие от метода регуляризации Тихонова) дополнительной априорной информации (например, об уровне шумов измерения), или набора независимых измеренных реализаций.

Заключение

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Для оперативного лазерного оптико-акустического анализа многокомпонентных смесей разработан автоматизированный метод выбора спектральных каналов измерения. Показано, что для многокомпонентных газовых смесей разработанный метод сокращает время поиска оптимального набора спектральных каналов измерения на 2÷3 порядка, по сравнению с известными методами.
2. Разработан метод количественного восстановления концентраций газов в многокомпонентных смесях, основанный на методе подбора квазирешений для некорректных математических задач и генетическом алгоритме поиска квазирешений.
3. Разработан измерительный комплекс на основе ЛОАГ для количественного анализа многокомпонентных газовых смесей. Особенностью разработанного комплекса является сопряжение лазерного газоанализатора, содержащего отдельную микропроцессорную систему управления, с персональным компьютером, оснащенный разработанным программным обеспечением.
4. Создано программное обеспечение измерительного комплекса лазерного оптико-акустического газоанализатора, позволяющее в автоматизированном режиме проводить количественный анализ многокомпонентных газовых смесей, включающий в себя: выбор спектральных каналов измерения, управление процессом измерения, восстановление концентраций газов по результатам измерений.
5. На созданном макете разработанного измерительного комплекса проведены экспериментальные исследования состава многокомпонентных газовых смесей и апробированы разработанные методы и алгоритмы количественного газоанализа.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Измерительный комплекс лазерного оптико-акустического газоанализатора, работающий под управлением ЭВМ / М. Л. Белов, В. А. Городничев, В. И. Козинцев, Ю. В. Федотов // Лазеры в науке, технике, медицине: X Международная научно-техническая конференция. - М., 1999. - С.56.
2. Лазерный оптико-акустический газоанализатор для контроля состава стационарных и нестационарных газовых смесей / М. Л. Белов, В. А. Городничев, В. И. Козинцев, Ю. В. Федотов // Медико-технические

- технологии на страже здоровья: 1-я Международная научно техническая конференция. - М., 1999. - С.135-136.
3. Информационное обеспечение лазерного оптико-акустического газоанализатора / А.Ю. Амелькин, М. Л. Белов, В. А. Городничев и др. // Медико-технические технологии на страже здоровья: 1-я Международная научно техническая конференция. - М., 1999. - С.132-133.
 4. Восстановление концентраций газов в многокомпонентных газовых смесях эволюционно-генетическим методом из данных измерений лазерного оптико-акустического анализатора / М.Л. Белов, В.А. Городничев, В.И. Козинцев, Ю.В. Федотов // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2000. - №9. - С.55-59.
 5. Предварительная обработка сигналов лазерного оптико-акустического газоанализатора / М. Л. Белов, В. А. Городничев, В. И. Козинцев, Ю. В. Федотов // Медико-технические технологии на страже здоровья: 2-я Международная научно техническая конференция. - М., 2000. - С.21-22.
 6. Ю. В. Федотов, В. И. Козинцев. Выбор информативных длин волн для зондирования многокомпонентных газовых смесей лазерным оптико-акустическим газоанализатором (ЛЮАГ) // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Шестая международная конференция студентов и аспирантов. - М., 2000. - С.161-162.
 7. Автоматизированный измерительный комплекс на основе лазерного оптико-акустического газоанализатора для контроля чистоты воздуха / М.Л. Белов, В.А. Городничев, В.И. Козинцев, Ю.В. Федотов // Биомедицинская радиоэлектроника. - 2001. - №9. - С.38-42.
 8. Генетический алгоритм в решении задач многокомпонентного анализа загрязнений атмосферного воздуха / А. Н. Житов, М. В. Лебедев, И. П. Супрун и др. // Лазеринформ. Инф. бюллетень лазерной ассоциации. – 2001. - №9.- С.21-22.
 9. Gas reconstruction in multicomponent media using genetic algorithms. / Yu. V. Fedotov, M. L. Belov, V. A. Gorodnichev, V. I. Kozintsev // Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics: VIII Joint International symposium. – Irkutsk, 2001. - P.150.
 10. Selection of analytical wavelengths for multicomponent analysis of the gas mixture by the laser photoacoustic method / Yu. V. Fedotov, M. L. Belov, V. A. Gorodnichev, V. I. Kozintsev // Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics: VIII Joint International symposium. – Irkutsk, 2001. - P.150.
 11. Multicomponent analysis of the unsymmetrical dimethylhydrazine and its degradation products by the photoacoustic spectroscopy / Yu. V. Fedotov, M. L. Belov, V. A. Gorodnichev et al., // Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics: VIII Joint International symposium. – Irkutsk, 2001. - P.161.

12. Лазерный оптико-акустический измерительный комплекс для контроля чистоты воздуха / М. Л. Белов, В. А. Городничев, В. И. Козинцев, Ю. В. Федотов // Лазеры в науке, технике, медицине: XII Международная научно-техническая конференция. - М., 2001. - С.45-46.
13. Автоматизированный лазерный оптико-акустический газоанализатор для контроля загрязнений атмосферы / М. Л. Белов, В. А. Городничев, В. И. Козинцев, Ю. В. Федотов // Медико-технические технологии на страже здоровья: 3-я Международная научно техническая конференция. - М., 2001. - С.70.
14. Выбор алгоритма поиска квазирешения для задачи лазерного оптико-акустического газоанализа / М. Л. Белов, В. А. Городничев, В. И. Козинцев, Ю. В. Федотов // Медико-технические технологии на страже здоровья: 3-я Международная научно техническая конференция. - М., 2001. - С.71.
15. Выбор спектральных каналов измерения для контроля многокомпонентных газовых загрязнителей атмосферы / М. Л. Белов, В. А. Городничев, В. И. Козинцев, Ю. В. Федотов // Экология и рациональное природопользование: Всероссийская научная конференция. - СПб., Записки горного института, 2001. - Т.149. - С.187.
16. Метод поиска квазирешений в задаче лазерного оптико-акустического газоанализа / М.Л. Белов, В.А. Городничев, В.И. Козинцев, Ю.В. Федотов // Оптика атмосферы и океана. - 2002. - Т.15, №4. - С.388-392.
17. Сравнительный анализ методов поиска спектральных каналов измерения для лазерного оптико-акустического газоанализатора / М.Л. Белов, В.А. Городничев, В.И. Козинцев, Ю.В. Федотов // Оптика атмосферы и океана. - 2002. - Т.15, №8. - С.665-671.
18. Method selection criterion for reconstruction of multicomponent mixture at quantitative laser photoacoustic gasanalysis / Yu. V. Fedotov, M. L. Belov. V. A. Gorodnichev, V. I. Kozintsev // Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics: IX Joint International Symposium. – Tomsk, 2002. - P.109.
19. The automated measurement complex for laser photoacoustic multicomponent gasanalysis / Yu. V. Fedotov, M. L. Belov. V. A. Gorodnichev, V. I. Kozintsev // Atmospheric and ocean optics. Atmospheric physics: IX Joint International Symposium. – Tomsk, 2002. - P.115.
20. Методы и аппаратура для многокомпонентного лазерного оптико-акустического анализа газовых загрязнений атмосферы / М. Л. Белов, В. А. Городничев, В. И. Козинцев, Ю. В. Федотов // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: V Международная научно-техническая конференция. – Владимир, 2002. - С.205.

21. Yu. V. Fedotov. Special software for laser photoacoustic multicomponent gasanalysis // International Workshop on Atmospheric Spectroscopy Applications. – Moscow, 2002. – С.17.
22. Оперативная методика поиска набора спектральных каналов измерения лазерного оптико-акустического газоанализатора / М. Л. Белов, В. А. Городничев, В. И. Козинцев, Ю. В. Федотов // Медико-технические технологии на страже здоровья: 4-я Международная научно техническая конференция. - М., 2002.- С.93.
23. Цифровая обработка сигналов лазерного оптико-акустического газоанализатора / М. Л. Белов, В. А. Городничев, В. И. Козинцев и др. // Медико-технические технологии на страже здоровья: 4-я Международная научно техническая конференция. - М., 2002. - С.102.
24. Банк данных газовых загрязнителей атмосферного воздуха для лазерного оптико-акустического газоанализатора / М. Л. Белов, В. А. Городничев, В. И. Козинцев, Ю. В. Федотов // Медико-технические технологии на страже здоровья: 4-я Международная научно техническая конференция. - М., 2002. - С.101.