

СПЕКТРОСКОПИЯ АТМОСФЕРНЫХ ГАЗОВ

УДК 621.378

В.И. Козинцев

ЛАЗЕРНЫЙ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИЙ ГАЗОАНАЛИЗАТОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТАВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Представлены результаты восстановления концентраций газовых компонентов для шестикомпонентной смеси аммиак–этилен–метанол–изопропанол–диоксид углерода–этанол. Показано, что использование регулирующих процедур обработки позволяет получить значительный выигрыш в точности восстановления концентраций газов для шести и более компонентных газовых смесей.

Источником излучения служит перестраиваемый CO₂-лазер, генерирующий 65–70 линий в спектральной области 9–11 мкм при выходной мощности 1–3 Вт. При обработке данных измерений использовалась модификация метода выбора параметра регуляризации на основе принципа невязки.

Одной из важнейших на сегодняшний день является проблема охраны окружающей среды. Лазерные методы наиболее перспективны для оперативного контроля газовых загрязнений и представляют значительный интерес для экологического мониторинга атмосферы. Одним из таких методов является лазерная оптико-акустическая (ОА) спектроскопия, позволяющая с высокой оперативностью, точностью и в широком динамическом диапазоне измерять концентрацию загрязняющих веществ [1, 2].

В статье описывается действующий измерительный комплекс для определения концентрации газов в многокомпонентных газовых смесях с целью оперативного экологического и технологического контроля за их составом, показана его работоспособность, приведены примеры его экспериментальной апробации, позволяющие оценить точность восстановления газовых концентраций.

Измерительный комплекс состоит из лазерного оптико-акустического газоанализатора с нерезонансной ячейкой и персональной ЭВМ типа IBM PC с программным обеспечением, которое позволяет реализовать алгоритм управления и автоматизации процесса измерения. Разработанные программы позволяют проводить обработку результатов измерений CO₂-лазера и выводить информацию о концентрации газовых загрязнителей. Схема измерительного комплекса показана на рис. 1, где 1 – CO₂-лазер, 2 – ОА-кювета, 3 – фотоприемник (МГ-30), 4 – микрофон КМС-19, 5 – прерыватель, 6 – оптический датчик, 7 – блок стабилизации частоты модуляции, 8 – интерфейсная плата, 9 – АПЧ CO₂-лазера, 10 – блок накачки, 11 – вольтметр переменного тока ВЗ-60, 12 – вакуумный пост, 13 – полупрозрачное зеркало, 14 – персональный компьютер.

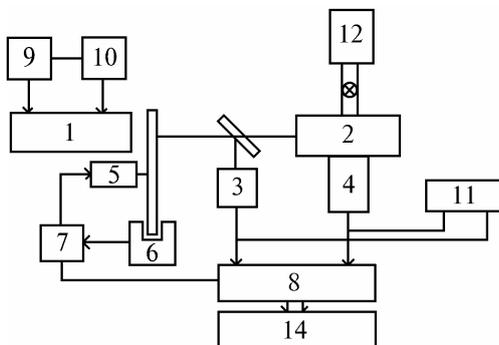


Рис.1. Схема измерительного комплекса

Особенностями измерительного комплекса являются применение в качестве источника инфракрасного (ИК) излучения CO₂-лазера цельнометаллической конструкции с высококачественным

тотным возбуждением активной среды, перестраиваемого в диапазоне 9,1–10,8 мкм, и использование алгоритмов обработки сигнала, основанных на методах построения регуляризированных решений некорректных математических задач.

Для измерений используется ОА-кювета. Источником излучения служит CO₂-лазер, генерирующий 65–70 линий в спектральной области 9–11 мкм при выходной мощности 1–3 Вт. Излучение лазера, модулированное с частотой 125 Гц прерывателем, направляется в ОА-кювету. Возникающие в ОА-кювете акустические колебания регистрируются микрофоном. Регистрация мощности оптического излучения в опорном канале осуществляется фотоприемником на основе микросхемы МГ-30. Информационные сигналы подаются на интерфейсную плату персонального компьютера, где осуществляются синхронное детектирование и цифровая обработка. Для визуального контроля за работой измерительной части интерфейсной платы амплитуда сигналов регистрируется вольтметром переменного тока. С помощью блока 7 осуществляется стабилизация частоты модуляции. Опорное напряжение, вырабатываемое оптическим датчиком, также подается на интерфейсную плату. Приготовление, напуск и прокачка через ОА-кювету многокомпонентной газовой смеси для анализа осуществляются с помощью вакуумного поста. Калибровка измерительного комплекса осуществлялась с помощью специально приготовленной смеси этилена в азоте. Точность определения концентрации этилена в смеси равнялась 6 %. Путем добавления чистого азота в калибровочную и анализируемую смеси в ОА-кювете создавалось общее давление 1 атм для моделирования столкновительного уширения контуров линий поглощения газов в атмосфере. Блоки накачки и автоподстройки частоты (АПЧ) обеспечивают работу CO₂-лазера. Измерения проводятся поочередно на M парах длин волн (M – число газов в смеси, т.е. всего $2M$ длин волн). Измерения проводятся на «паре» длин волн на каждом отдельном газе с целью учета неселективного поглощения при восстановлении концентрации газовых компонентов в смеси. Длины волн в парах выбираются близкими. Одна длина волны совпадала с пиком поглощения только определяемого на этой паре газового компонента смеси, другая длина волны в паре была вне пиков поглощения для всех газов смеси. Больше никаких специальных требований при выборе длин волн для анализа состава газовой смеси не выдвигалось.

В качестве исследуемых газов были выбраны химически невзаимодействующие между собой вещества, такие как аммиак, этилен, двуокись углерода, этанол, метанол, изопропанол, ацетон, дихлорэтан и другие органические газообразные вещества. Измерения проводились для двух-, трех-, четырех-, пяти- и шестикомпонентных газовых смесей.

Многокомпонентная газовая смесь для анализа приготавливалась следующим образом. В состав вакуумного поста входила смесительная емкость. Она предварительно откачивалась до давлений порядка 10^{-3} атм. Затем к ней поочередно (по специальной методике) присоединялись емкости с растворами исследуемых газовых компонентов (этанолом, метанолом, изопропанолом и т.д.). Приращения давления (парциальные давления) в смесительной емкости за счет поступления в нее насыщенных паров исследуемых газов измерялись с помощью вакуумметра ионизационно-термопарного типа ВИТ-2 с точностью не хуже 6 %. Затем в смесительную емкость напускался чистый азот до давления 1 атм.

Программа обработки результатов измерения основана на методах решения некорректных математических задач и построении регуляризированного решения системы уравнений для измеряемых величин [3, 4]. Основная трудность практического получения регуляризированного решения заключается в выборе параметра регуляризации α . Одним из широко используемых методов выбора α является выбор параметра регуляризации на основе принципа невязки. Параметр регуляризации находится из уравнения [3, 4]:

$$\|W \mathbf{x}_\alpha - \mathbf{y}\| = \delta^2,$$

где $\|\mathbf{z}\|$ – норма вектора \mathbf{z} ; W – матрица системы линейных алгебраических уравнений для нахождения концентраций газов из оптико-акустических сигналов (см., например, [1]); \mathbf{x}_α – регуляризованное решение системы уравнений для нахождения концентрации газов (вектор восстановленных концентраций газов); \mathbf{y} – вектор измеренных оптико-акустических сигналов. Величина δ^2 имеет смысл дисперсии шума измерения.

При обработке данных измерений для получения регуляризированного решения (получения восстановленных значений концентраций газовых компонентов) используется модификация метода выбора параметра регуляризации на основе принципа невязки. Используемая мо-

дификация позволяет несколько уменьшить ошибки восстановления концентрации загрязнителей при большом различии шумов в разных измерительных каналах (в отличие от обычного метода невязки [3, 4] в используемой модификации учитывается различие дисперсии шума измерения в различных спектральных каналах). Исходными данными для алгоритма восстановления концентраций газовых компонентов являются коэффициенты поглощения газовых компонентов на длинах волн измерительных спектральных каналов, измеренные оптико-акустические сигналы и дисперсии шумов измерения в спектральных каналах (δ_i). Величины δ_i статистически оценивались по результатам серии тестовых измерений в соответствующих спектральных каналах. Процедуры обработки оптико-акустического сигнала реализованы в виде комплекса программ на персональной ЭВМ типа IBM PC.

Результаты обработки показывают, что для двух-, трех- и четырех-компонентных газовых смесей ошибки восстановления концентраций газовых компонентов обычно небольшие и использование регуляризирующих процедур обработки не дает повышения точности восстановления. Для пятикомпонентной смеси наблюдается небольшое повышение точности, а для шести- (и более) компонентной смеси точность восстановления концентраций газовых компонентов значительно увеличивается при использовании регуляризирующих процедур обработки.

На рис. 2–4 приведены некоторые примеры результатов восстановления концентрации (в относительных единицах) компонентов газовой смеси, когда при обработке использовались средние (по 10 опытам) значения сигналов газоанализатора.

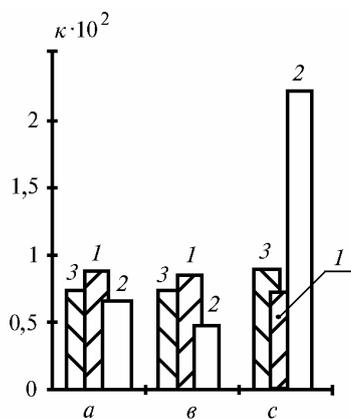


Рис. 2. Результаты восстановления концентрации аммиака (а), метанола(б) и этанола(с)

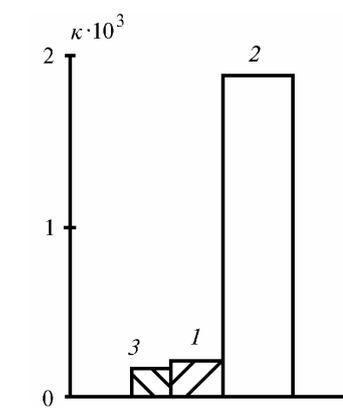


Рис. 3. Результаты восстановления концентрации этилена

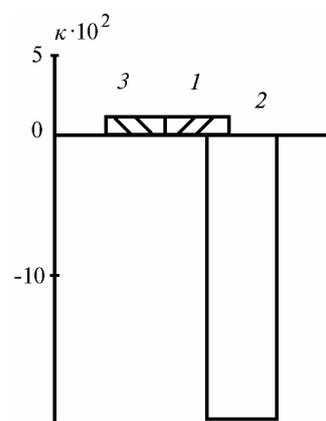


Рис. 4. Результаты восстановления концентрации изопропанола

На всех рисунках цифра 1 – концентрации, полученные с использованием регуляризирующих процедур обработки, 2 – обычным методом решения системы алгебраических линейных уравнений, 3 – действительное значение концентрации газового компонента, определенное по парциальному давлению при заполнении кюветы. По оси координат отложены восстановленные концентрации газовых компонентов (κ).

Измерения проводились для шестикомпонентной газовой смеси этилен-углекислый газ–аммиак–метанол–этанол–изопропанол (для длин волн зондирования 10,140; 10,200; 9,100; 9,180; 9,120; 9,160; 9,320; 9,340; 9,420; 9,400; 10,120; 10,300 мкм).

Из рисунков видно, что использование регуляризирующих процедур обработки обеспечивает гораздо более низкий уровень ошибок восстановления. При использовании для обработки результатов одиночных измерений (а не средних по 10 опытам) преимущество использования регуляризирующих процедур обработки значительно возрастает.

Таким образом, в статье описан измерительный комплекс для контроля состава многокомпонентных газовых смесей на основе лазерного оптико-акустического анализатора, перестраиваемого в диапазоне 9,1–10,8 мкм и использующего алгоритмы обработки сигнала, основанные на методах построения регуляризованных решений некорректных математических задач. Использование такого измерительного комплекса позволяет получить значительный выигрыш в точности восстановления концентраций газов для шести- (и более) компонентных

газовых смесей и повысить надежность и достоверность контроля вредных выбросов промышленных производств.

1. Зигрист М., Катаев М.Ю., Мицель А.А и др. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 11–12. С. 1471–1477.
2. Солодухин А.С., Старовойтов В.С., Трушин С.А. и др. // ЖПС. 1994. Т. 60. N 1–2. С. 73–80.
3. Воскобойников Ю.Э., Преображенский Н.Г., Седельников А.Н. Математическая обработка эксперимента в молекулярной газодинамике. Новосибирск: Наука, 1984. 238 с.
4. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 288 с.

Научно-исследовательский институт радиоэлектроники и лазерной техники, Москва
Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана

Поступила в редакцию
12 января 1996 г.

Kozintsev V. I. Laser Photoacoustic Gasanalyser for Control of Multicomponent Gas Mixtures.

The results of reconstructing of gas admixtures densities are presented for six-component mixture of ammonia–ethylene–metanol–isopropanol–carbon dioxide–ethanol. It is shown that the used algorithm of the signal processing gives the significant gain in the reconstruction accuracy of gas admixtures density six- and more component gas mixtures.

The features of the experimental device are the use of tunable CO₂-laser and the processing of a signal based on the regularization methods of the incorrect mathematical problems solution.