

## **ОСОБЕННОСТИ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АБСОРБЦИОННОГО ГАЗОАНАЛИЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШИРОКОПОЛОСНОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ**

*Показана возможность применения для определения количественного состава многокомпонентной газовой смеси системы линейных алгебраических уравнений вместо системы интегральных уравнений общего вида при использовании широкополосного источника излучения. При математическом моделировании определения количественного состава шестикомпонентной газовой смеси были получены приемлемые значения погрешности определения концентраций компонентов смеси.*

Количественный анализ многокомпонентных газовых смесей с использованием узкополосных источников излучения в настоящее время хорошо изучен. Существует много работ, посвященных количественному абсорбционному анализу, в том числе и экспериментальных, основанных на использовании перестраиваемых узкополосных источников лазерного излучения, например,  $\text{CO}_2$ -лазера низкого давления [1, 2], узкополосных диодных лазеров [3, 4] и т.д. Однако в некоторых случаях использование узкополосных лазерных источников связано с недостатками, такими как ограниченный спектральный диапазон ( $\text{CO}_2$ -лазер) или необходимость использования для анализа многокомпонентных смесей нескольких источников (диодные лазеры). При использовании дискретно перестраиваемых узкополосных источников излучения длина волны зондирующего излучения может не совпадать с максимумом линии поглощения исследуемого газового компонента, что уменьшает чувствительность анализа. Кроме того, для приборов одного класса узкополосные лазерные источники излучения имеют более высокую стоимость по сравнению с широкополосными.

Применение широкополосных перестраиваемых источников излучения, таких как лазеры с широкой линией выходного излучения (например, некоторые лазеры на красителях), параметрические генераторы света (ПГС), нелазерные источники излучения (например, лампы с перестраиваемыми фильтрами), в количественном анализе многокомпонентных смесей, со своей стороны, также связано с рядом недостатков: малой чувствительностью и избирательностью, а также сложностью решения обратной задачи в общем виде. В настоящей работе рассмотрено решение обратной задачи лазерного газоанализа (определение концентраций газов в многокомпонентных смесях) в случае использования широкополосных источников излучения.

При количественном трассовом (по результатам измерения поглощения на трассе длиной  $L$ ) анализе газовой смеси с числом компонентов  $N$  в общем случае должна быть решена система нелинейных интегральных уравнений следующего вида [5]:

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_1) \exp\left(-\sum_{i=1}^N \int_0^L [k_i(\lambda) c_i(l) + \beta(\lambda, l)] dl\right) d\lambda = T_{\lambda_1}; \\ \int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_2) \exp\left(-\sum_{i=1}^N \int_0^L [k_i(\lambda) c_i(l) + \beta(\lambda, l)] dl\right) d\lambda = T_{\lambda_2}; \\ \dots \\ \int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_M) \exp\left(-\sum_{i=1}^N \int_0^L [k_i(\lambda) c_i(l) + \beta(\lambda, l)] dl\right) d\lambda = T_{\lambda_M}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $M$  — число используемых для измерения линий излучения лазерного источника;  $\lambda_j$  и  $G_{LAS}(\lambda - \lambda_j)$  — центр и нормированная на единицу спектральная форма  $j$ -й линии зондирующего излучения,

$$\int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_j) d\lambda = 1;$$

$k_i(\lambda)$  — зависимость коэффициента поглощения  $i$ -го компонента от длины волны;  $c_i(l)$  — распределение концентрации  $i$ -го компонента по трассе зондирования;  $\beta(\lambda, l)$  — распределение коэффициента фонового поглощения по трассе зондирования в зависимости от длины волны;  $T_{\lambda_j}$  — измеряемая величина пропускания трассы зондирования на  $j$ -й линии зондирующего излучения, определяемая по формуле

$$T_{\lambda_j} = K(\lambda_j) \frac{P(\lambda_j)}{P_0(\lambda_j)};$$

$P(\lambda_j)$  и  $P_0(\lambda_j)$  — принятая и излученная мощность на  $j$ -й линии зондирующего излучения;  $K(\lambda_j)$  — общая эффективность системы зондирования на  $j$ -й линии зондирующего излучения, которая может быть определена при калибровке системы или в результате дополнительных измерений.

В случае однородной анализируемой среды, когда  $c_i(l) \equiv c_i$  и  $\beta(\lambda, l) \equiv \beta(\lambda)$  система уравнений (1) упрощается:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_1) \exp\left(-L \sum_{i=1}^N k_i(\lambda) c_i - L\beta(\lambda)\right) d\lambda = T_{\lambda_1}; \\ \int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_2) \exp\left(-L \sum_{i=1}^N k_i(\lambda) c_i - L\beta(\lambda)\right) d\lambda = T_{\lambda_2}; \\ \dots\dots\dots \\ \int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_M) \exp\left(-L \sum_{i=1}^N k_i(\lambda) c_i - L\beta(\lambda)\right) d\lambda = T_{\lambda_M}. \end{array} \right. \quad (2)$$

Если анализируемая среда неоднородна, то при использовании системы (2) вместо системы (1) под  $c_i$  и  $\beta(\lambda)$  понимают средние по трассе значения.

Система (2) может быть сведена к системе линейных алгебраических уравнений в следующих случаях:

- ширина линии зондирующего излучения много меньше ширин линий поглощения анализируемых газов;
- поглощение на трассе много меньше единицы, т.е.

$$L \sum_{i=1}^N k_i(\lambda) c_i + L\beta(\lambda) \ll 1. \quad (3)$$

Первый случай может быть реализован в результате использования узкополосных источников излучения, тогда система интегральных уравнений (2) преобразуется к виду

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N k_i(\lambda_1) c_i + \beta(\lambda_1) = -\ln(T_{\lambda_1})/L; \\ \sum_{i=1}^N k_i(\lambda_2) c_i + \beta(\lambda_2) = -\ln(T_{\lambda_2})/L; \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{i=1}^N k_i(\lambda_M) c_i + \beta(\lambda_M) = -\ln(T_{\lambda_M})/L, \end{array} \right. \quad (4)$$

где  $k_i(\lambda_j)$  — коэффициент поглощения  $i$ -го компонента на  $j$ -й линии лазерного источника;  $\beta(\lambda_j)$  — коэффициент фонового поглощения на  $j$ -й линии лазерного источника.

Узкополосные источники излучения и системы линейных алгебраических уравнений вида (4) используются для определения количественного состава многокомпонентных газовых смесей как в дистанционных, так и локальных схемах зондирования.

Если на трассе выполняется условие малости поглощения (3), то

$$\exp\left(-L \sum_{i=1}^N k_i(\lambda) c_i - L\beta(\lambda)\right) \cong 1 - L \sum_{i=1}^N k_i(\lambda) c_i - L\beta(\lambda) \quad (5)$$

и система уравнений (2) преобразуется к следующему виду:

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_1) \left[1 - L \sum_{i=1}^N k_i(\lambda) c_i - L\beta(\lambda)\right] d\lambda = T_{\lambda_1}; \\ \int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_2) \left[1 - L \sum_{i=1}^N k_i(\lambda) c_i - L\beta(\lambda)\right] d\lambda = T_{\lambda_2}; \\ \dots\dots\dots \\ \int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_M) \left[1 - L \sum_{i=1}^N k_i(\lambda) c_i - L\beta(\lambda)\right] d\lambda = T_{\lambda_M}. \end{cases} \quad (6)$$

Поскольку  $\int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_j) d\lambda = 1$ , то

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N c_i \int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_1) k_i(\lambda) d\lambda + \int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_1) \beta(\lambda) d\lambda = \frac{1 - T_{\lambda_1}}{L}; \\ \sum_{i=1}^N c_i \int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_2) k_i(\lambda) d\lambda + \int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_2) \beta(\lambda) d\lambda = \frac{1 - T_{\lambda_2}}{L}; \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{i=1}^N c_i \int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_M) k_i(\lambda) d\lambda + \int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_M) \beta(\lambda) d\lambda = \frac{1 - T_{\lambda_M}}{L}. \end{cases} \quad (7)$$

Перепишем систему (7) следующим образом:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N c_i k_i^*(\lambda_1) + \beta^*(\lambda_1) = \frac{1 - T_{\lambda_1}}{L}; \\ \sum_{i=1}^N c_i k_i^*(\lambda_2) + \beta^*(\lambda_2) = \frac{1 - T_{\lambda_2}}{L}; \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{i=1}^N c_i k_i^*(\lambda_M) + \beta^*(\lambda_M) = \frac{1 - T_{\lambda_M}}{L}. \end{cases} \quad (8)$$

Здесь  $\beta^*(\lambda_j) = \int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_j) \beta(\lambda) d\lambda$  — неизвестные величины “интегрального” фонового поглощения;  $k_i^*(\lambda_j) = \int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_j) k_i(\lambda) d\lambda$

— спектральные коэффициенты поглощения анализируемых газов, полученные с учетом аппаратной функции широкополосного источника излучения.

Значения фонового поглощения  $\beta^*(\lambda_j)$  слабо зависят от длины волны и могут быть учтены при использовании метода дифференциального поглощения. В этом случае для  $N$ -компонентной смеси измерения проводятся в  $M = 2N$  спектральных каналах измерения. Спектральные каналы измерения выбираются попарно для каждого анализируемого компонента, так что в паре каналы располагаются достаточно близко, причем один спектральный канал соответствует максимуму поглощения компонента, а другой — минимуму. В этом случае фоновое поглощение в каждой паре спектральных каналов можно считать одинаковым. Вычитая попарно уравнения системы (8), приходим к следующей системе разностных уравнений, решая которую можно определить количественный состав анализируемой  $N$ -компонентной газовой смеси:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N c_i \Delta k_{i1}^* = \frac{\Delta T_1}{L}; \\ \sum_{i=1}^N c_i \Delta k_{i2}^* = \frac{\Delta T_2}{L}; \\ \dots \dots \dots \\ \sum_{i=1}^N c_i \Delta k_{iN}^* = \frac{\Delta T_N}{L}, \end{array} \right. \quad (9)$$

где  $\Delta k_{ij}^* = k_i^*(\lambda_{2j+1}) - k_i^*(\lambda_{2j})$ ;  $\Delta T_j = T_{\lambda_{2j}} - T_{\lambda_{2j+1}}$ .

Спектральные коэффициенты поглощения анализируемых газов  $k_i^*(\lambda_j)$  могут быть получены расчетным способом на основе спектроскопических банков, таких как HITRAN [6] и GEISA [7], или экспериментально измерены при таком же источнике излучения, какой будет использован для определения количественного состава смесей.

Применение широкополосных источников излучения и систем линейных алгебраических уравнений вида (8) и (9) для количественного определения состава многокомпонентных газовых смесей осложнено отсутствием априорной информации о величине поглощения на трассе (т.е. о выполнимости условия (3)), особенно при проведении измерений на длинных трассах. В случае использования локальных мето-

дов определения количественного состава многокомпонентных газовых смесей (таких как оптико-акустический, где типичные значения  $L$  порядка 10 см) условие (3) выполнимо для наиболее практически значимых случаев.

Рассмотрим возможность оценки поглощения на трассе (выполнимость условия (3)) по результатам измерения величин  $T_{\lambda_j}$  в случае использования широкополосных источников излучения. Если такая возможность существует, то можно предложить следующую методику измерения количественного состава газовой смеси в случае последовательного измерения пропускания на трассе для выбранных спектральных каналов.

1. Для заданного качественного состава смеси на основе некоторого критерия [8] составляется набор спектральных каналов измерения.

2. В каждом из выбранных спектральных каналов проводится измерение пропускания. Если пропускание в спектральном канале таково, что условие (3) не выполняется, то данный спектральный канал заменяется другим, с меньшими значениями коэффициентов поглощения анализируемых газовых компонентов, и не входящим в исходный набор спектральных каналов измерения. В новом спектральном канале проводится измерение пропускания, проверяется условие (3); если условие не выполняется, то спектральный канал заменяется на спектральный канал с еще более малыми значениями коэффициентов поглощения компонентов анализируемой смеси, и так до тех пор, пока не будет выполнено условие (3) для всего набора спектральных каналов измерения.

3. На основе полученных результатов измерения, решая систему линейных алгебраических уравнений вида (8) и (9), определяют количественный состав анализируемой смеси газов.

При проведении дистанционных измерений в большинстве случаев величина поглощения на трассе априорно неизвестна, и заранее невозможно сказать, выполняется ли условие (3). Используя широкополосный источник излучения, можно измерять значения  $T_{\lambda_j}$ , связанные с поглощением на трассе, в соответствующем спектральном канале следующим образом:

$$\int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_j) \exp(-A(\lambda)) d\lambda = T_{\lambda_j}, \quad (10)$$

где  $A(\lambda) = L \sum_{i=1}^N k_i(\lambda) c_i + L\beta(\lambda)$ .

В реальных ситуациях спектральная зависимость  $A(\lambda)$  неизвестна, так как количественный состав смеси априорно неизвестен.

Предположим, что исследуется один газ с одиночно расположенной линией поглощения, а фоновое поглощение отсутствует. Ширина линии поглощения составляет  $0,1 \text{ см}^{-1}$  (типичные значения для атмосферных газов), а ширина линии зондирования  $\gamma = 0,3 \text{ см}^{-1}$  (ПГС на CdSe [9]). Рассмотрим для этого случая погрешность между “интегральным” поглощением

$$\int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_j) A(\lambda) d\lambda = A^*(\lambda)$$

и

$$1 - T_{\lambda_j} = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_j) \exp(-A(\lambda)) d\lambda.$$

Эта погрешность по сути и является критерием применимости приближения (5). На рис. 1 приведена зависимость относительной погрешности

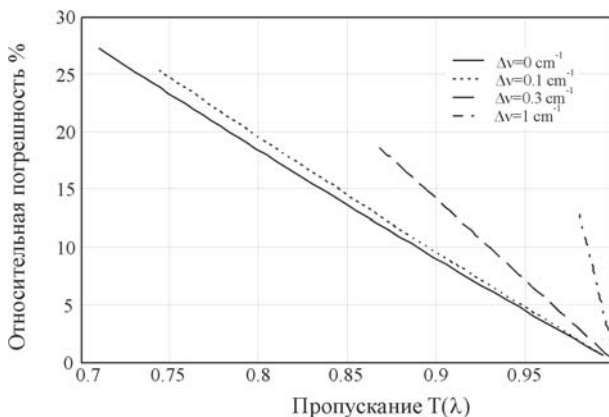
$$\frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_j) A(\lambda) d\lambda - \left( 1 - \int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_j) \exp(-A(\lambda)) d\lambda \right) \right|}{\int_{-\infty}^{\infty} G_{LAS}(\lambda - \lambda_j) A(\lambda) d\lambda}$$

от поглощения измеряемого пропускания на трассе  $T(\lambda)$  для нескольких значений расстояния  $\Delta\nu$  между центрами линий поглощения газа и излучения лазера.

Из рис. 1 видно, что при малых расстояниях между линиями  $\Delta\nu$  и при больших значениях пропускания ( $T > 0,9$ ) погрешность имеет допустимое значение. При больших значениях расстояний между линиями погрешность становится недопустимо большой даже при больших значениях пропускания на трассе.

Таким образом, значение измеренного широкополосным источником излучения (ширина линии излучения  $\gamma = 0,3 \text{ см}^{-1}$ , ширина линии поглощения  $0,2 \text{ см}^{-1}$ ) пропускания на трассе не может дать однозначного ответа о возможности использования приближения (5) и, соответственно, системы линейных уравнений вида (8) для определения количественно состава многокомпонентной газовой смеси, так как неизвестна спектральная зависимость  $A(\lambda)$ .

Однако однозначно можно сказать, что если пропускание меньше некоторой величины, то приближение (5) использовать нельзя для данного соотношения ширины линии зондирования и линии поглощения.



**Рис. 1.** Относительная погрешность приближения в зависимости от измеряемой величины пропускания на трассе для разных расстояний между центрами линий поглощения газа и излучения лазера

В большинстве реальных ситуаций при измерении количественного состава газовых смесей загрязнителей атмосферы в спектр излучения широкополосного источника попадают не отдельные линии поглощения, а несколько линий поглощения или даже полосы поглощения. В этом случае погрешности, возникающие при использовании приближения (5), будут иметь меньшие значения. Кроме того, появление больших погрешностей при большом расстоянии между линией поглощения и линией излучения источника можно исключить при соответствующем выборе спектральных каналов измерения. Так, для метода дифференциального поглощения необходимо выбирать линию “on” в центре линии поглощения, а линию “off” в области, вдали от сильных линий поглощения. Таким образом, поиск набора спектральных каналов измерения необходимо проводить согласно предложенной методике с учетом этих замечаний.

Для оценки возможности использования системы линейных алгебраических уравнений (8) и (9) для количественного анализа многокомпонентных газовых смесей по результатам многоспектральных измерений с использованием широкополосного источника излучения было проведено математическое моделирование. Предполагали, что измерения проводятся методом дифференциального поглощения. Считали, что в качестве источника излучения используется ПГС на CdSe с диапазоном перестройки 8...13 мкм и шириной линии генерации  $\gamma = 0,3 \text{ cm}^{-1}$  [9] (форма линии ПГС полагалась лоренцевой). Спектры поглощения анализируемых газов были рассчитаны с использованием банка данных HITRAN 2000 [6]. Длина трассы принималась равной 1000 м.

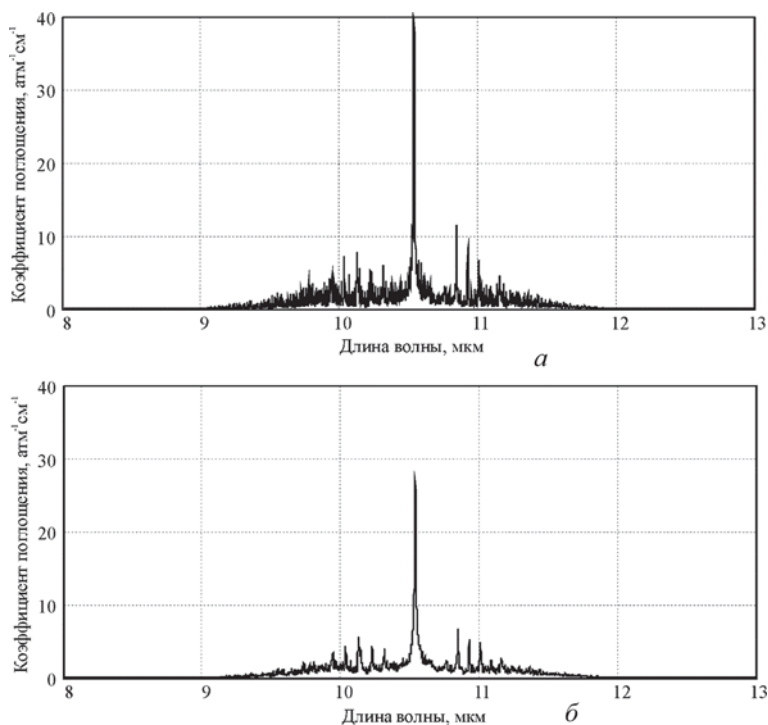
В качестве примера приведем результаты математического моделирования определения количественного состава пятикомпонентной



смеси  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$  следующего состава: 2,0 ppm, 1,0 ppm, 1,0 ppm, 1,0 ppm, 1,0 ppm, 1,0 ppm соответственно. Для простоты фоновое поглощение атмосферы не учитывалось (данная ситуация может быть реализована на практике при коротких трассах зондирования). На рис. 2 в качестве примера приведен спектр поглощения  $\text{C}_2\text{H}_4$ , рассчитанный с использованием банка HITRAN 2000 для нормальных условий. Спектр на рис. 2, *а* был рассчитан для нулевой ширины линии источника излучения, а на рис. 2, *б* — для ширины линии источника, равной  $0,3 \text{ см}^{-1}$ .

Спектральные каналы измерения выбирались следующим образом. Предполагалось, что измеряется весь спектр пропускания анализируемой смеси на трассе зондирования с использованием широкополосного источника излучения. Поэтому рассчитывался спектр пропускания анализируемой смеси газов во всем диапазоне перестройки источника. Затем выбирались спектральные каналы измерения с использованием оперативной методики, описанной в работе [8], на тех участках диапазона перестройки источника излучения, где пропускание на трассе зондирования было больше некоторого заданного порога.

Рассчитанные значения пропускания, соответствующие выбранным спектральным каналам измерения, искажались нормальным шумом с заданным относительным значением среднеквадратического от-



**Рис. 2.** Спектр поглощения  $\text{C}_2\text{H}_4$  для нулевой (*а*) и равной  $0,3 \text{ см}^{-1}$  (*б*) ширины линии источника излучения

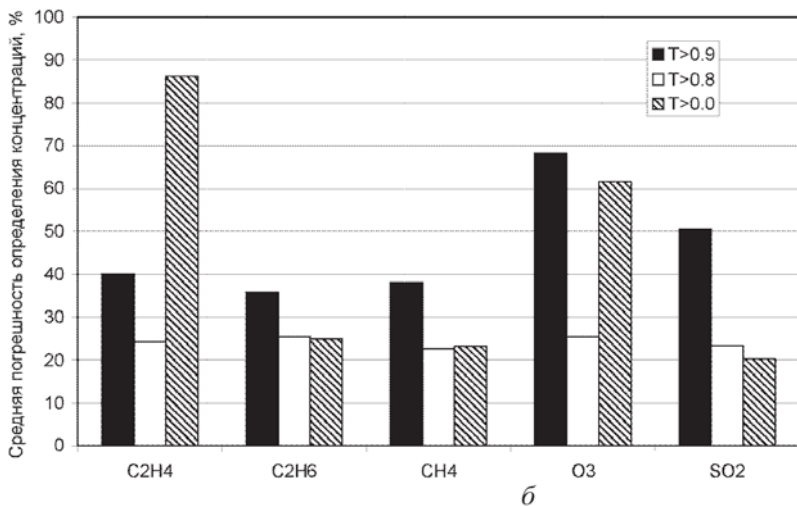
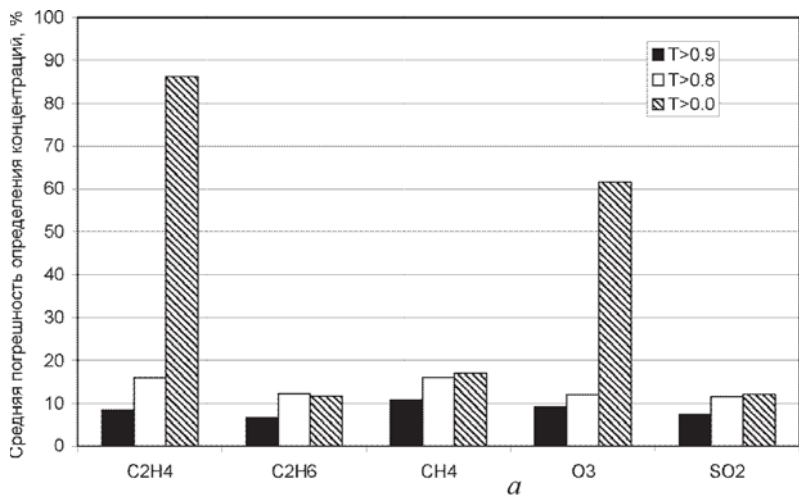
клонения (СКО), имитирующим шумы измерения. Искаженные шумом значения пропускания использовались для определения количественного состава газовой смеси путем решения системы линейных уравнений (9). Систему линейных уравнений решали методом поиска квазирешений [10]. Найденные значения концентраций сравнивались с заданными. Рассчитывалась средняя погрешность определения концентраций по серии из 100 измерений.

Для оценки погрешности, возникающей при использовании приближения (5), на первом этапе было проведено моделирование определения концентраций при отсутствии шума измерения (при нулевом СКО шума измерений). Моделирование проводили для трех разных наборов спектральных каналов измерения, выбранных при разных значениях порога пропускания. Первый набор спектральных каналов выбирался при условии, что значение “измеренного” пропускания  $T$  было больше 0,9, второй набор  $T > 0,8$  и третий набор задавали без ограничения на величину пропускания. Число обусловленности матрицы системы линейных уравнений (9) для первого набора было равно 6,6, для второго — 7,2, для третьего — 28,7.

Результаты моделирования представлены на рис. 3, а. Из рисунка видно, что в случае отсутствия ограничения на величину пропускания при выборе спектральных каналов измерения погрешность определения концентраций может иметь очень большое значение даже в отсутствии шумов измерений. Это объясняется возникающими в этом случае большими погрешностями при использовании приближения (5). При наложении ограничений на величину измеряемого пропускания на трассе ( $T > 0,8$  или  $T > 0,9$ ) меньшие погрешности, возникающие при использовании приближения (5), уже не приводят к очень большим погрешностям определения концентраций газов.

На рис. 3, б приведены результаты моделирования определения количественного состава той же смеси, для тех же наборов спектральных каналов, что и в предыдущем случае, но в условии шумов измерения. Относительное значение СКО шума измерений задавалось при моделировании равным 3 %.

Из рис. 3, б видно, что в условиях шумов погрешность определения концентраций выросла для разных наборов спектральных каналов измерения по-разному. Для набора спектральных каналов, выбранного с наиболее жестким ограничением на величину измеряемого пропускания ( $T > 0,9$ ), прирост погрешности был максимальным, что привело к очень большим погрешностям определения концентраций некоторых газов. Это можно объяснить следующим образом: в случае больших значений пропускания ( $T \cong 1$ ) даже небольшая относительная погрешность измерения величины пропускания приводит к



**Рис. 3.** Средняя погрешность определения концентраций компонентов анализируемой газовой смеси в отсутствие шумов измерения (а) и в условиях шума измерения с СКО равным 3% (б)

очень большим относительным погрешностям соответствующих этому случаю небольших величин поглощения, которые являются правой частью системы уравнений (8) (правая часть системы уравнений (9) является разностью небольших величин поглощения, т.е. еще более малой величиной).

Для набора спектральных каналов, выбранного при менее жестком ограничении на величину пропускания ( $T > 0,8$ ), наблюдается компромисс между влиянием погрешностей, связанных с использованием приближения (5), и погрешностей определения правой части системы линейных уравнений (9). В этом случае в условии шумов измерения были получены приемлемые значения погрешностей определения концентраций компонентов анализируемой смеси.

Результаты математического моделирования показывают возможность использования системы линейных уравнений для определения количественного состава многокомпонентных газовых смесей по результатам трассовых многоспектральных измерений, проведенных широкополосным источником излучения (ширина линии  $0,3 \text{ см}^{-1}$ ). При этом возможность использования линейного приближения оценивается по измеренным величинам пропускания на трассе, а на основе этой оценки выбираются спектральные каналы измерения.

Таким образом, в статье показана возможность применения для определения количественного состава многокомпонентной газовой смеси системы линейных алгебраических уравнений вместо системы интегральных уравнений общего вида при использовании широкополосного источника излучения (ПГС на CdSe с шириной линии излучения  $0,3 \text{ см}^{-1}$  и диапазоном перестройки  $8 \dots 13 \text{ мкм}$ ). При математическом моделировании определения количественного состава шестикомпонентной газовой смеси были получены приемлемые значения погрешности определения концентраций ее компонентов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meyer P. L., Sigrüst M. W. Atmospheric pollution monitoring using CO<sub>2</sub>-laser photoacoustic spectroscopy and other techniques // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61, No. 7. P. 1779–1806.
2. Горелик О. Д., Эцин И. Ш. Контроль молекулярных микрокомпонентов атмосферы методами лазерной спектроскопии // Журн. аналит. химии. – 1984. – Т. 39, вып. 11. – С. 1925–1944.
3. Многокомпонентный анализатор на основе диодных лазеров для мониторинга газообразных загрязнений в атмосфере / О.И. Даварашвили, П.В. Зырянов, А.И. Кузнецов и др. // Оптика атмосферы и океана. – 1999. Т. 12, № 1. – С. 64–69.
4. Berezin A. G., Ershov O. V., Nadezhdinski A. J. Trace complex-molecule detection using near-IR diode lasers // Appl. Phys. B. 2002. V. 75, No. 2–3. P. 203–214.
5. Оптико - электронные системы экологического мониторинга природной среды: Учеб пособие для вузов / В.И. Козицев, В.М. Орлов, М.Л. Белов и др.: Под ред. В.Н. Рождествина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 528 с.
6. The HITRAN molecular spectroscopic database: edition of 2000 including updates through 2001 / L.S. Rothman, A. Barbe, D.C. Benner et al. // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2003. Vol. 82, No. 1. – P. 4–44.
7. The 1997 spectroscopic GEISA databank / D.C. Reuter, O.V. Naumenko, J. Orphal et al. // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 1999. V. 62, No. 2. – P. 205–254.
8. Сравнительный анализ методов поиска спектральных каналов измерения для лазерного оптико-акустического газоанализатора / М.Л. Белов, В.А. Городничев, В.И. Козицев, Ю.В. Федотов // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 15, № 8. – С. 665–671.
9. Городничев В. А., Козицев В. И., Сильницкий А. Ф. Лидар на основе параметрического генератора света для определения атмосферных загрязнений // Оптика атмосферы и океана. – 1988. – Т. 1, № 12. – С. 33–35.

Юрий Викторович Федотов родился в 1974 г., окончил в 1998 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, научный сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 60 научных работ в области лазерной техники.

Yu. V. Fedotov (b. 1974) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1998. Ph. D. (Eng.), researcher of "Radioelectronics and Laser Technology" Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 60 publications in the field of laser technology.

---

## ОПТИКА

---

УДК 681.78.01: 681.3(075.8)

Ю. А. Л у ш и н

### **ЗОННЫЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*В рамках скалярной теории дифракции предложен и теоретически обоснован зонный способ измерения оптических передаточных функций крупногабаритных оптических систем, позволяющий объективно оценить качество приемных систем оптико-электронных приборов на этапе выходных испытаний без использования уникальных крупногабаритных коллимирующих устройств.*

Одной из самых больших проблем при контроле качества крупногабаритных оптических систем является необходимость заполнения всего входного зрачка контролируемой системы коллимированным потоком излучения. При этом абберационное качество коллимирующей оптической системы должно быть не хуже качества контролируемой [1], что является сложной технической и экономической проблемой.

Далее предложен зонный способ измерения некогерентных оптических передаточных функций (ОПФ) приемных систем оптико-электронных приборов (ОЭП) с крупногабаритной оптикой без использования уникальных крупногабаритных коллимирующих оптических систем.