

В. А. Фираго, М. М. Кугейко

ЭКСПЛУАТАЦИОННО НАДЕЖНЫЕ МЕТОДЫ СВЕТОДИОДНОЙ И ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ГАЗОАНАЛИТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ СЛОЖНЫХ АЭРОДИСПЕРСНЫХ СРЕД

Введение

В настоящее время существует большая потребность в высокоселективных газоаналитических средствах непрерывного контроля состава различных аэродисперсных сред. Такие средства нужны как для систем управления технологическими процессами в различных отраслях промышленности, так и для установок очистки аэродисперсных выбросов предприятий. В частности, дальнейшее улучшение экологической обстановки требует перехода от разового контроля, проводимого органами Госкомитета по экологии, к непрерывному мониторингу состава выбросов предприятий. При введении средств непрерывного контроля в блоки управления системами очистки у предприятий появляется возможность снизить выбросы вредных веществ и существенно уменьшить выплаты за экологический ущерб путем поддержания оптимальных режимов технологических процессов. Очевидно, что решение задачи по созданию эксплуатационно надежных средств непрерывного контроля позволит повысить как экологическую, так и ресурсосберегающую эффективность источников выбросов.

Разнообразие сложных газовых сред, подлежащих анализу, и природных условий их контроля предъявляют жесткие требования к аппаратуре. Средства контроля должны обладать в силу сложности среды высокой селективностью анализа, устойчивостью к влиянию различных дестабилизирующих факторов и небольшой стоимостью.

1. Перспективные методы контроля

Успехи в освоении производства компактных полупроводниковых излучателей (лазеров и светодиодов), работающих в инфракрасной области спектра без криогенного охлаждения, позволяют существенно упростить и удешевить высокоселективный контроль. Проведено большое число научно-исследовательских работ, показавших возможность осуществления с их использованием непрерывного анализа состава воздушной среды. К сожалению, многомодовость полупроводниковых излучателей, зависимость генерируемой мощности и частоты излучения от тока инъекции и температуры, а также деградация их характеристик при длитель-

ной эксплуатации вызывают существенные затруднения при создании эксплуатационно устойчивых газоаналитических средств. Для налаживания серийного выпуска приборов непрерывного контроля необходимы методы формирования и приема зондирующего излучения, а также обработки получаемого массива данных, позволяющие устранить влияние ряда неконтролируемых дестабилизирующих факторов.

При организации непрерывного лазерного контроля состава аэрозольных и газовых сред в основном используются недисперсионные линейные методы определения спектральных характеристик пропускания, поглощения и рассеяния среды. Влияние на погрешности измерений принципиально неустранимых в этих методах таких факторов, как состояние окружающей среды, изменение аппаратурных параметров приемно-излучающих и регистрирующих блоков оптико-электронных систем, загрязнения оптических поверхностей и т. д., не только снижает метрологические характеристики, но и ухудшает эксплуатационные, вследствие необходимости частого проведения поверочных работ. Принятие же мер по защите от влияния контролируемой среды требует увеличения массогабаритных характеристик, к тому же не существует средств защиты, пригодных в различных ситуациях. При проведении нефелометрических измерений традиционными методами необходимо еще иметь априорную информацию о связи между коэффициентом общего рассеяния и коэффициентом направленного рассеяния.

2. Концепция “безаприорности измерений”

Для устранения влияния отмеченных факторов предлагается использовать концепцию “безаприорности” измерений, заключающуюся в максимально возможном исключении методических погрешностей, возникающих из-за вариаций параметров неконтролируемых физических процессов в анализируемой среде и изменений аппаратурных характеристик средств непрерывного контроля [1–8]. Эта концепция предполагает использование дополнительных измерительных каналов, применение оптимальных способов формирования и приема зондирующих сигналов, а также корреляционных и других специальных процедур их обработки (получение образов опорных и калибровочных сигналов и т.д.). Применение этой концепции позволит создать способы и средства непрерывного контроля, которые имеют следующие отличия от известных: 1) не требуют прецизионного поддержания температуры кристалла излучателя и тока инъекции; 2) нечувствительны к изменениям аппаратурных параметров приемно-излучающих и регистрирующих блоков; 3) позволяют с высокой точностью определять концентрацию контролируемого компо-

нента в широком диапазоне ее изменений при калибровке прибора лишь по двум точкам; 4) устраняют зависимость результатов измерений от состояния среды распространения зондирующего излучения и влияния дестабилизирующих факторов окружающей среды. Очевидно, что такие средства непрерывного контроля позволят осуществлять надежный непрерывный контроль в производственных условиях.

3. Принципы синтеза структур систем диагностики аэродисперсных сред на основе концепции "безаприорности"

В теории измерений различают совместные и совокупные измерения [6, 9–11]. По способам нахождения определяемых величин они близки: и в том и в другом случае данные величины находят путем решения системы уравнений, коэффициенты в которых и отдельные члены получены в результате измерений (обычно прямых). Основное отличие состоит в том, что при совокупных измерениях проводят измерения нескольких одноименных величин, а при совместных – разноименных.

Сформулируем задачу использования совокупных измерений для максимального устранения методических погрешностей, обусловленных отмеченными выше факторами [9–11]. Пусть уравнение, описывающее процесс измерения, имеет вид

$$f(a, b, c, \dots, x, y, z) = M, \quad (1)$$

где a, b, c – известные коэффициенты, M – непосредственно измеряемая величина, x, y, z – искомые неизвестные. Каждая непосредственно измеряемая величина, в свою очередь, может быть представлена как $M = k \cdot (\Phi + \Delta\Phi)$, где k – крутизна преобразования i -го измерителя, Φ – истинная величина оптического потока, $\Delta\Phi$ – величина среднеквадратичного отклонения шума принимаемого оптического потока.

При одноименных измерениях, когда значения непосредственно измеряемой величины устанавливаются с использованием i измерительных систем, запишем следующую систему уравнений вида (1):

$$f_i(a, b, c, \dots, x, y, z) = k_i (\Phi_i + \Delta\Phi_i). \quad (2)$$

Рассмотрим случай, когда для нескольких измерений (например, для каждой пары измерений) используется один и тот же измерительный блок. Тогда система уравнений (2) для таких измерений имеет форму (i, k, m, n – четные числа):

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1(a,b,c,\dots,x,y,z,\dots) = k_1(\Phi_1 + \Delta\Phi_1) \\ f_2(a,b,c,\dots,x,y,z,\dots) = k_1(\Phi_2 + \Delta\Phi_2) \\ \dots \\ f_{k-1}(a,b,c,\dots,x,y,z,\dots) = k_m(\Phi_{k-1} + \Delta\Phi_{k-1}) \\ f_k(a,b,c,\dots,x,y,z,\dots) = k_m(\Phi_k + \Delta\Phi_k) \\ \dots \\ f_{i-1}(a,b,c,\dots,x,y,z,\dots) = k_n(\Phi_{i-1} + \Delta\Phi_{i-1}) \\ f_i(a,b,c,\dots,x,y,z,\dots) = k_n(\Phi_i + \Delta\Phi_i) \end{array} \right. \quad (3)$$

и может быть легко преобразована к виду

$$\left\{ \begin{array}{l} s_1(a,b,c,\dots,x,y,z,\dots) = a_1 \\ \dots \\ s_m(a,b,c,\dots,x,y,z,\dots) = a_m \\ \dots \\ s_n(a,b,c,\dots,x,y,z,\dots) = a_n \end{array} \right. , \quad (4)$$

где $a_1 = (\Phi_1 + \delta\Phi_1) / (\Phi_2 + \delta\Phi_2), \dots, a_m = (\Phi_{k-1} + \delta\Phi_{k-1}) / (\Phi_k + \delta\Phi_k), \dots, a_n = (\Phi_{i-1} + \delta\Phi_{i-1}) / (\Phi_i + \delta\Phi_i)$; $s_1 = f_1 / f_2, \dots, s_m = f_{k-1} / f_k, \dots, s_n = f_{i-1} / f_i$.

Таким образом, выполнив требуемое количество измерений, можно получить систему уравнений (4), число которых превышает или равно числу искомых неизвестных. Если уравнения системы являются линейными, то решения системы будут однозначными. Так как уравнения системы (4) не содержат коэффициентов k , наличие которых требует проведения калибровочных измерений (установления их величины), то и получаемое решение также не включает их. А это означает исключение априори неизвестных постоянных в одноименных измерениях.

Возможны и любые другие комбинации уравнений, при которых k равны. Например, коэффициент преобразования k может быть представлен как $k_n = h_i m_j$, где m_j, h_i – крутизна преобразования источника и приемника излучения, соответственно. Тогда процесс измерений описывается следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1(a,b,c,\dots,x,y,z,\dots) = h_1 m_1 (\Phi_1 + \delta\Phi_1), \\ f_2(a,b,c,\dots,x,y,z,\dots) = h_1 m_2 (\Phi_2 + \delta\Phi_2), \\ f_3(a,b,c,\dots,x,y,z,\dots) = h_2 m_1 (\Phi_3 + \delta\Phi_3), \\ f_4(a,b,c,\dots,x,y,z,\dots) = h_2 m_2 (\Phi_4 + \delta\Phi_4), \\ \dots\dots\dots, \\ f_{i-3}(a,b,c,\dots,x,y,z,\dots) = h_{n-1} m_{n-1} (\Phi_{i-3} + \delta\Phi_{i-3}), \\ f_{i-2}(a,b,c,\dots,x,y,z,\dots) = h_{n-1} m_n (\Phi_{i-2} + \delta\Phi_{i-2}), \\ f_{i-1}(a,b,c,\dots,x,y,z,\dots) = h_n m_{n-1} (\Phi_{i-1} + \delta\Phi_{i-1}), \\ f_i(a,b,c,\dots,x,y,z,\dots) = h_n m_n (\Phi_i + \delta\Phi_i), \end{array} \right. \quad (5)$$

иными словами, каждые 4 измерения выполняются с использованием двух излучающих и двух приемных блоков. Система (5) может быть преобразована к виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} s_1(a,b,c,\dots,x,y,z,\dots) = a_1, \\ \dots, \\ s_k(a,b,c,\dots,x,y,z,\dots) = a_k. \end{array} \right. \quad (6)$$

Полученная система уравнений (6) также не содержит аппаратных параметров h_i, m_j . Следовательно, в ее решения они не входят, что исключает их влияние на результаты измерений.

Физическая сущность данной математической формулировки – исключение зависимости результатов определения x, y, z от аппаратных характеристик и неконтролируемых параметров физических процессов, протекающих в среде, возможно путем проведения совокупных измерений, при использовании комбинаций одинаковых приемно-излучающих и измерительных блоков. Наиболее просто это достигается изменением традиционной геометрии опыта (соответствующим расположением этих блоков, их перемещением и т.п.). Достоинства систем, синтезированных на основе концепции “безаприорности” покажем на следующих примерах.

4. Бистатическое томографическое зондирование

Известна бистатическая схема томографического зондирования с угловым сканированием (или перемещением приемно-излучающего устройства) [12–15]. В данной схеме определение коэффициента ослабления оптического излучения в рассеивающей среде осуществляется следующим образом. Два источника излучения, расположенные в точках \mathbf{R}_1 и \mathbf{R}_2

(где \mathbf{R}_1 и \mathbf{R}_2 – радиус-вектора, описывающие положение этих точек), посылают зондирующее излучение в пересекающихся под углом φ направлениях. Приемниками излучения, расположенными в точках \mathbf{R}_3 и \mathbf{R}_4 принимается рассеянное излучение из точек пересечения оптической оси данного приемника с каждым из направлений посылки зондирующего излучения. Если геометрию измерений выбрать таким образом, что оптические оси приемников излучения параллельны, т. е. углы $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_4 = \varphi$, и считать, что средние значения коэффициентов рассеяния под углом φ в близкорасположенных точках $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3, \mathbf{r}_4$ примерно равны, то выражение для среднего значения коэффициента ослабления на участке L имеет вид:

$$\varepsilon(\alpha) = -\frac{1}{2L} \ln \left\{ \frac{S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_3, \mathbf{R}_4) \cdot S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{R}_3)}{S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3) \cdot S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{R}_4)} \right\}, \quad (7)$$

где $S(\mathbf{R}_i, \mathbf{r}_j, \mathbf{R}_k)$ – соответственно, мощность сигналов, принимаемых приемниками, расположенными в \mathbf{R}_i ($i = 1, 2$) из точек \mathbf{r}_j ($j = 1, 2, 3, 4$) при посылке зондирующего излучения источниками \mathbf{R}_k ($k = 3, 4$); $L = |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1| + |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_4| + |\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_4| + |\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1|$ – длина пути внутри исследуемого объема, на которой зондирующее излучение претерпевает ослабление.

При изменении направлений посылки зондирующего излучения в точках \mathbf{R}_1 и \mathbf{R}_2 или при перемещении приемо-передающего устройства выделяется другой рассеивающий объем $(\mathbf{r}'_1, \mathbf{r}'_2, \mathbf{r}'_3, \mathbf{r}'_4)$. Изменение отслеживаемого объема достигается и сканированием оптических осей приемных устройств в точках \mathbf{R}_3 и \mathbf{R}_4 .

5. Спектрально-томографический метод

Поскольку рассматриваемая бистатистическая схема зондирования рассеивающих сред включает два канала посылки излучения, представляется целесообразным рассмотреть возможность определения концентрации компонентного состава при посылке зондирующего излучения на длине волны центра линии поглощения по одному направлению, описываемого единичным вектором \mathbf{n}_1 , и на крыле линии поглощения – по другому (\mathbf{n}_2). Чтобы получить выражение для концентрации исследуемого компонента, будем использовать выражения для сигналов рассеяния, регистрируемых приемниками 1 и 2 при посылке зондирующего излучения по направлению \mathbf{n}_1 на длине волны $\lambda_{\text{он}}$, по направлению \mathbf{n}_2 – на $\lambda_{\text{оф}}$ [16].

Отношение регистрируемых сигналов $S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_3, \mathbf{R}_4, \lambda_{\text{он}})$ и $S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3, \lambda_{\text{он}})$ при излучении импульса источником \mathbf{R}_1 на длине волны $\lambda_{\text{он}}$, а также сиг-

налов $S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, \mathbf{R}_3, \lambda_{\text{off}})$ и $S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{R}_4, \lambda_{\text{off}})$ при излучении импульса источником \mathbf{R}_2 на длине волны λ_{off} (3, 4) запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_3, \mathbf{R}_4, \lambda_{\text{on}})}{S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3, \lambda_{\text{on}})} &= T(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_3, \lambda_{\text{on}}) \cdot T(\mathbf{r}_3, \mathbf{r}_2, \lambda_{\text{on}}) \cdot \frac{A_4(\lambda_{\text{on}})}{A_3(\lambda_{\text{on}})} \cdot \frac{\beta_{\varphi_3}(\mathbf{r}_3, \lambda_{\text{on}})}{\beta_{\varphi_1}(\mathbf{r}_1, \lambda_{\text{on}})} = \\ &= \frac{A_4(\lambda_{\text{on}})}{A_3(\lambda_{\text{on}})} \cdot \frac{\beta_{\varphi_3}(\mathbf{r}_3, \lambda_{\text{on}})}{\beta_{\varphi_1}(\mathbf{r}_1, \lambda_{\text{on}})} \cdot e^{-\varepsilon(\lambda_{\text{on}}) \cdot \frac{L}{2}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{R}_3, \lambda_{\text{off}})}{S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, \mathbf{R}_4, \lambda_{\text{off}})} &= T(\mathbf{r}_4, \mathbf{r}_2, \lambda_{\text{off}}) \cdot T(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_1, \lambda_{\text{off}}) \cdot \frac{A_4(\lambda_{\text{off}})}{A_3(\lambda_{\text{off}})} \cdot \frac{\beta_{\varphi_2}(\mathbf{r}_2, \lambda_{\text{off}})}{\beta_{\varphi_4}(\mathbf{r}_4, \lambda_{\text{off}})} = \\ &= \frac{A_4(\lambda_{\text{off}})}{A_3(\lambda_{\text{off}})} \cdot \frac{\beta_{\varphi_2}(\mathbf{r}_2, \lambda_{\text{off}})}{\beta_{\varphi_4}(\mathbf{r}_4, \lambda_{\text{off}})} \cdot e^{-\varepsilon(\lambda_{\text{off}}) \cdot \frac{L}{2}}. \end{aligned}$$

Далее представим коэффициент ослабления в виде $\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda) + \beta(\lambda)$, где $\alpha(\lambda)$ и $\beta(\lambda)$ – спектральные коэффициенты поглощения и рассеяния, соответственно. Коэффициент поглощения можно записать следующим образом:

$$\alpha(\lambda) = N \cdot k(\lambda), \quad (8)$$

где N – концентрация, а $k(\lambda)$ – сечение поглощения исследуемого компонента среды.

Из рассмотренных выше отношений сигналов $S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_3, \mathbf{R}_4, \lambda_{\text{on}})$, $S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3, \lambda_{\text{on}})$ и $S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, \mathbf{R}_3, \lambda_{\text{off}})$, $S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{R}_4, \lambda_{\text{off}})$ с учетом выражения (8), считая различие в спектральной чувствительности приемников на длинах волн λ_{on} и λ_{off} малым, можно получить следующее выражение:

$$\begin{aligned} -N \cdot [k(\lambda_{\text{on}}) - k(\lambda_{\text{off}})] \cdot L &= 2 \cdot \ln \left\{ \frac{S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_3, \mathbf{R}_4, \lambda_{\text{on}}) \cdot S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{R}_3, \lambda_{\text{off}})}{S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3, \lambda_{\text{on}}) \cdot S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, \mathbf{R}_4, \lambda_{\text{off}})} \right\} + \\ &+ 2 \cdot \ln \left\{ \frac{\beta_{\varphi_1}(\mathbf{r}_1, \lambda_{\text{on}}) \beta_{\varphi_{12}}(\mathbf{r}_2, \lambda_{\text{off}})}{\beta_{\varphi_3}(\mathbf{r}_3, \lambda_{\text{on}}) \beta_{\varphi_4}(\mathbf{r}_4, \lambda_{\text{off}})} \right\} + [\beta(\lambda_{\text{on}}) - \beta(\lambda_{\text{off}})] \cdot L. \end{aligned}$$

Пренебрегая для небольших значений $\Delta\lambda = \lambda_{\text{on}} - \lambda_{\text{off}}$ различием в спектральных значениях $\beta_{\varphi_i}(\mathbf{r}_i, \lambda_{\text{on}})$, $\beta_{\varphi_i}(\mathbf{r}_i, \lambda_{\text{off}})$ и $\beta(\lambda_{\text{on}})$, $\beta(\lambda_{\text{off}})$ на квазиоднородных участках для близко расположенных точек, легко получить следующее выражение для концентрации исследуемого компонента:

$$N = -\frac{2}{L \cdot [k(\lambda_{\text{on}}) - k(\lambda_{\text{off}})]} \cdot \ln \left\{ \frac{S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_3, \mathbf{R}_4, \lambda_{\text{on}}) \cdot S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{R}_3, \lambda_{\text{off}})}{S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3, \lambda_{\text{on}}) \cdot S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, \mathbf{R}_4, \lambda_{\text{off}})} \right\}, \quad (9)$$

где $[k(\lambda_{\text{on}}) - k(\lambda_{\text{off}})]$ – дифференциальное сечение поглощения исследуемого компонента. Как видно из (9), выражение для определения концентрации не содержит ни аппаратных параметров приемно-излучающих и измерительных блоков, ни энергии источника, ни влияния изменений среды, выражаемых через прозрачности T_1, T_2, T_3, T_4 .

Таким образом, предлагаемый способ позволяет исключить методические погрешности, обусловленные нестабильностью параметров приемно-излучающих и измерительных блоков (включая и нестабильность энергии излучения), а также случайные составляющие погрешности, возникающие при дифференцировании получаемых сигналов из-за шумов. Наиболее эффективно использование рассматриваемого метода для базового варианта (при локальных измерениях), поскольку позволяет применять непрерывное излучение, что уменьшает погрешность измерений рассеянных сигналов, а значит, и пороговую чувствительность определения концентрации газов или растворов.

Очевидно, что если участки $[\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_4]$, $[\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_3]$, $[\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3]$, $[\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_4]$ меньше, чем расстояние между стенками в кювете (в случае, когда газ прокачивается через кювету), то коэффициенты пропускания стенок кюветы (их загрязнения) не будут сказываться на результатах измерений, т. е. данная схема устраняет участие стенок кюветы в формировании результатов измерений, что недостижимо для всех известных методов. Это, в свою очередь, дает возможность производить замену одной кюветы на другую без проведения калибровочных работ.

Метод дифференциального поглощения и бистатистический томографический способ определения коэффициента ослабления могут успешно применяться для измерения концентрации компонентного состава рассеивающих сред (газов, растворов и т.п.) при посылке зондирующего излучения на длине волны линии поглощения исследуемого компонента и вне ее как по одному, так и по другому направлению зондирования. При посылке зондирующего излучения источниками, находящимися в точках \mathbf{R}_1 и \mathbf{R}_2 , по направлениям, пересекающим оптические оси приемников \mathbf{R}_3 и \mathbf{R}_4 , для величин сигналов, зарегистрированных приемниками \mathbf{R}_3 и \mathbf{R}_4 на длине волны поглощения λ_{on} и на длине волны λ_{off} , лежащей на крыле линии поглощения исследуемого газа можно записать следующие выражения [16]:

$$e^{-\varepsilon(\lambda_{\text{off}}) \cdot L} = \frac{S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_3, \mathbf{R}_4, \lambda_{\text{off}}) \cdot S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{R}_3, \lambda_{\text{off}})}{S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3, \lambda_{\text{off}}) \cdot S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, \mathbf{R}_4, \lambda_{\text{off}})} \cdot \frac{\beta_{\varphi_1}(\mathbf{r}_1, \lambda_{\text{off}}) \cdot \beta_{\varphi_4}(\mathbf{r}_4, \lambda_{\text{off}})}{\beta_{\varphi_3}(\mathbf{r}_3, \lambda_{\text{off}}) \cdot \beta_{\varphi_2}(\mathbf{r}_2, \lambda_{\text{off}})}, \quad (10)$$

– при зондировании на крыле λ_{off} исследуемого газа и

$$e^{-\varepsilon(\lambda_{\text{on}}) \cdot L} = \frac{S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_3, \mathbf{R}_4, \lambda_{\text{on}}) \cdot S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{R}_3, \lambda_{\text{on}})}{S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3, \lambda_{\text{on}}) \cdot S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, \mathbf{R}_4, \lambda_{\text{on}})} \cdot \frac{\beta_{\varphi_1}(\mathbf{r}_1, \lambda_{\text{on}}) \cdot \beta_{\varphi_4}(\mathbf{r}_4, \lambda_{\text{on}})}{\beta_{\varphi_3}(\mathbf{r}_3, \lambda_{\text{on}}) \cdot \beta_{\varphi_2}(\mathbf{r}_2, \lambda_{\text{on}})}, \quad (11)$$

– при зондировании в максимуме линии поглощения λ_{on} . С учетом (9) выражения (10) и (11) преобразуются к виду:

$$N \cdot k(\lambda_{\text{off}}) = -\frac{1}{L} \ln \left\{ \frac{S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_3, \mathbf{R}_4, \lambda_{\text{off}}) \cdot S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{R}_3, \lambda_{\text{off}})}{S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3, \lambda_{\text{off}}) \cdot S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, \mathbf{R}_4, \lambda_{\text{off}})} \times \frac{\beta_{\varphi_1}(\mathbf{r}_1, \lambda_{\text{off}}) \cdot \beta_{\varphi_4}(\mathbf{r}_4, \lambda_{\text{off}})}{\beta_{\varphi_3}(\mathbf{r}_3, \lambda_{\text{off}}) \cdot \beta_{\varphi_2}(\mathbf{r}_2, \lambda_{\text{off}})} \right\} - \beta(\lambda_{\text{off}}), \quad (12)$$

$$N \cdot k(\lambda_{\text{on}}) = -\frac{1}{L} \ln \left\{ \frac{S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_3, \mathbf{R}_4, \lambda_{\text{on}}) \cdot S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{R}_3, \lambda_{\text{on}})}{S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3, \lambda_{\text{on}}) \cdot S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, \mathbf{R}_4, \lambda_{\text{on}})} \times \frac{\beta_{\varphi_1}(\mathbf{r}_1, \lambda_{\text{on}}) \cdot \beta_{\varphi_4}(\mathbf{r}_4, \lambda_{\text{on}})}{\beta_{\varphi_3}(\mathbf{r}_3, \lambda_{\text{on}}) \cdot \beta_{\varphi_2}(\mathbf{r}_2, \lambda_{\text{on}})} \right\} - \beta(\lambda_{\text{on}}), \quad (13)$$

Из (11) и (12), пренебрегая для небольших значений $\Delta\lambda = \lambda_{\text{on}} - \lambda_{\text{off}}$ различием в спектральных значениях $\beta_{\varphi_i}(\mathbf{r}_i, \lambda_{\text{on}})$, $\beta_{\varphi_i}(\mathbf{r}_i, \lambda_{\text{off}})$ и $\beta(\lambda_{\text{on}})$, $\beta(\lambda_{\text{off}})$, окончательно для концентрации исследуемого газа можно записать:

$$N = -\frac{1}{L \cdot [k(\lambda_{\text{on}}) - k(\lambda_{\text{off}})]} \cdot \ln \left\{ \frac{S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_3, \mathbf{R}_4, \lambda_{\text{on}}) \cdot S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{R}_3, \lambda_{\text{on}})}{S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3, \lambda_{\text{on}}) \cdot S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, \mathbf{R}_4, \lambda_{\text{on}})} \times \frac{S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{R}_3, \lambda_{\text{off}}) \cdot S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_2, \mathbf{R}_4, \lambda_{\text{off}})}{S(\mathbf{R}_1, \mathbf{r}_3, \mathbf{R}_4, \lambda_{\text{off}}) \cdot S(\mathbf{R}_2, \mathbf{r}_4, \mathbf{R}_3, \lambda_{\text{off}})} \right\}, \quad (14)$$

поскольку при $\Delta\lambda \rightarrow 0$ выполняется следующее условие:

$$\frac{\beta_{\varphi_1}(\mathbf{r}_1, \lambda_{\text{off}}) \cdot \beta_{\varphi_4}(\mathbf{r}_4, \lambda_{\text{off}})}{\beta_{\varphi_3}(\mathbf{r}_3, \lambda_{\text{off}}) \cdot \beta_{\varphi_2}(\mathbf{r}_2, \lambda_{\text{off}})} \cdot \frac{\beta_{\varphi_3}(\mathbf{r}_3, \lambda_{\text{on}}) \cdot \beta_{\varphi_2}(\mathbf{r}_2, \lambda_{\text{on}})}{\beta_{\varphi_1}(\mathbf{r}_1, \lambda_{\text{on}}) \cdot \beta_{\varphi_4}(\mathbf{r}_4, \lambda_{\text{on}})} \rightarrow 1.$$

Таким образом, важным дополнительным достоинством полученного алгоритма (14) по сравнению с (9) является тот факт, что он не требует использования предположения о квазиоднородности выделяемого объема среды, т. е. равенства $\beta_{\varphi_i}(\mathbf{r}_i, \lambda)$ для близко расположенных точек \mathbf{r}_i ($i = 1, \dots, 4$), т. е. $\beta_{\varphi_i}(\mathbf{r}_i, \lambda_{\text{on}}) = \beta_{\varphi_i}(\mathbf{r}_i, \lambda_{\text{off}})$ при $\Delta\lambda \rightarrow 0$.

Предлагаемый спектрально-томографический метод определения компонентного состава рассеивающих сред устойчив и к вкладу в сигнал многократно рассеянных потоков, поскольку регистрируемые потоки собираются от точек, разнесенных на небольшое расстояние. Вклады многократного рассеяния для таких отсчетов практически одинаковые, т. е. $c_1 = c_2 = c_3 = c_4$. А с учетом того, что регистрируемые сигналы в алгоритмах расчета концентрации N используются в виде отношений, получим:

$$N \square \frac{c_1 S(\mathbf{R}_1, r_3, \mathbf{R}_4) c_2 S(\mathbf{R}_2, r_4, \mathbf{R}_3)}{c_3 S(\mathbf{R}_1, r_1, \mathbf{R}_3) c_4 S(\mathbf{R}_2, r_2, \mathbf{R}_4)} \square \frac{S(\mathbf{R}_1, r_3, \mathbf{R}_4) S(\mathbf{R}_2, r_4, \mathbf{R}_3)}{S(\mathbf{R}_1, r_1, \mathbf{R}_3) S(\mathbf{R}_2, r_2, \mathbf{R}_4)},$$

т. е. алгоритм расчета N не зависит от вклада многократного рассеяния. Это особенно важно при использовании предлагаемого метода в дистанционных измерениях на больших расстояниях от измерительной системы.

6. Базово-нефелометрические методы контроля состава среды

Для данного метода алгоритм определения коэффициента ослабления лазерного излучения находится при решении системы уравнений [17]

$$\begin{cases} \ln a_1 = \ln b - \varepsilon(\Delta l) \\ \ln a_2 = \ln b + \tau(\Delta l) \end{cases}, \quad (15)$$

где $\tau(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \cdot \Delta l$ – оптическая толщина участка Δl ; $\varepsilon(\lambda)$ – среднее значение коэффициента ослабления оптического излучения на участке Δl ; $a_1 = \Phi_1(\mathbf{R}_1, r_1, z_1, \lambda) / \Phi_2(\mathbf{R}_1, r_2, z_2, \lambda)$; $a_2 = \Phi_3(\mathbf{R}_2, r_2, z_2, \lambda) / \Phi_4(\mathbf{R}_2, r_1, z_1, \lambda)$; Φ_i ($i = 1, 4$) – измеряемые сигналы; \mathbf{R}_1 и \mathbf{R}_2 – соответствующие координаты расположения источников 1 и 2, r_1 и r_2 – координаты приемников 1 и 2; z_1 и z_2 – координаты рассеивающих точек 1 и 2. Посылка зондирующего излучения из точек \mathbf{R}_1 и \mathbf{R}_2 осуществляется в направлении расположения противоположной точки. Из точек z_1 и z_2 , составляющих измерительную базу, принимается рассеянное под углом φ излучение. Для угла рассеяния $\pi/2$ создан экспериментальный образец измерителя [18], использующего этот метод.

Для системы (15) легко получить корректное решение относительно $\varepsilon(\lambda)$. Важным достоинством полученного решения является то, что оно не зависит от аппаратурных параметров приемно-излучающих и измерительных блоков, нестабильности оптического пути распространения излучения, вызываемого окружающей средой (система (15) не содержит данных параметров), что, в свою очередь, означает исключение необхо-

димости проведения операции калибровки с применением оптических эталонных сред.

Для перехода к концентрации N газообразного компонента в среде можно использовать двухчастотное излучение (в центре линии поглощения λ_0 и на ее крыле λ_1). Выражение для N имеет следующий вид:

$$N = -\frac{1}{2|r_2 - r_1|\Delta\sigma} \ln\left(\frac{a_1(\lambda_0)}{a_2(\lambda_0)} - \frac{a_1(\lambda_1)}{a_2(\lambda_1)}\right),$$

где $\Delta\sigma = \sigma(\lambda_0) - \sigma(\lambda_1)$ – сечение дифференциального поглощения.

Следует отметить, что при использования в данной схеме измерений двухчастотного излучения рассеянное излучение можно регистрировать при произвольных углах φ , поскольку с большой точностью можно считать спектральные коэффициенты рассеяния $\sigma(\varphi)$ на длинах волн λ_0 и λ_1 (в пределах линии поглощения) равными. И в данном случае калибровочные измерения с помощью оптических эталонных сред не требуются (необходимо лишь установление $|r_2 - r_1|$ и $\Delta\sigma$).

7. Модифицированный корреляционный метод в лазерной спектроскопии

Изложенным принципам соответствует модифицированный корреляционный метод контроля состава среды [17, 19]. Рассмотрим показанную на рис. 1 систему непрерывного контроля влажности агрессивной аэродисперсной среды, использующую перестраиваемый полупроводниковый лазер.

Излучение диода коллимируется линзой и отправляется на контролируруемую трассу. Отражатель возвращает падающее на него излучение обратно. Приемная линза собирает попадающее на нее зондирующее излучение на чувствительной площадке фотоприемника. Лазерное излучение дважды проходит сквозь контролируемую аэродисперсную среду и несет информацию о ее спектральном поглощении. Количественное описание процессов формирования зондирующего излучения, его взаимодействия в процессе распространения с контролируемой средой и приема требует последовательного учета основных факторов, влияющих на величину принимаемого сигнала.

В общем случае поток, излучаемый лазерным диодом, можно записать в виде функциональной зависимости от управляющего длиной волны фактора Θ [17]

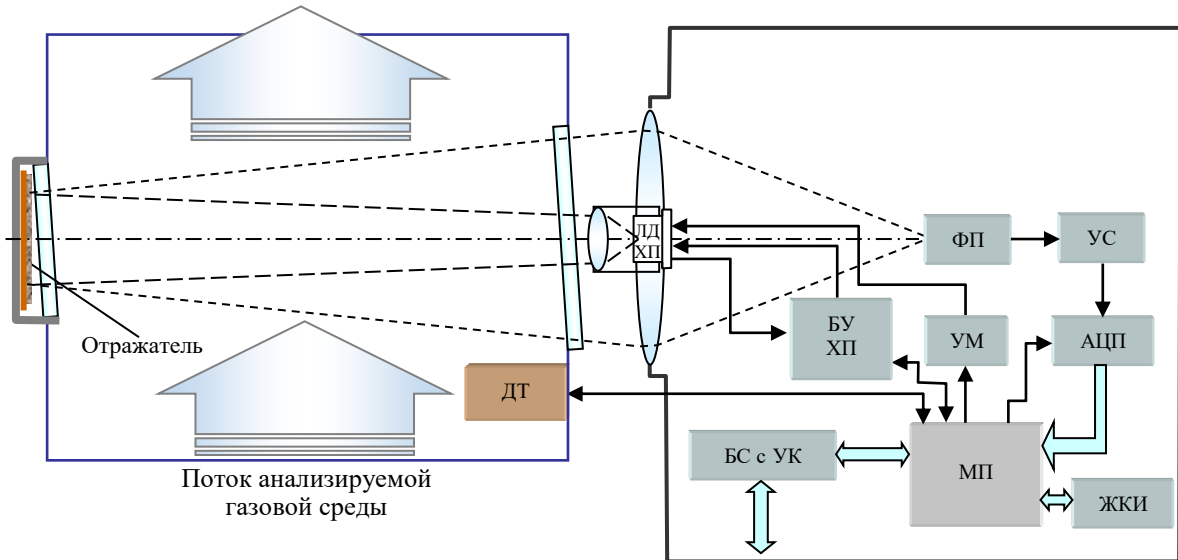


Рис. 1. Оптическая и функциональная схемы лазерного контроля влажности агрессивных аэродисперсных газовых сред

ФП – фотоприемник; УС – усилитель, АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БУ ХП – блок управления температурой лазера с помощью встроенного холодильника Пельтье; УМ – усилитель мощности, обеспечивающий формирование по сигналу микропроцессора импульса тока для включения лазерного диода; БС с УК – блок связи микропроцессора с управляющим компьютером; МП – микропроцессор; ЖКИ – жидкокристаллический индикатор; ДТ – цифровой датчик температуры

$$\Phi(\Theta) = \Phi_0(\Theta) + \Phi_1(\Theta) + \dots + \Phi_k(\Theta),$$

где $\Phi_0(\Theta)$ – поток излучения основной моды (попадающей на линию поглощения контролируемого газа), $\Phi_1(\Theta), \dots, \Phi_k(\Theta)$ – потоки от остальных мод. В небольших пределах изменения Θ можно считать зависимость $\Phi(\Theta)$ линейной, т. е.

$$\Phi(\Theta) = \Phi_{\Sigma}(1 + m_{\Sigma}\Theta). \quad (16)$$

В принципе коэффициенты изменения мощности m_i для каждой моды могут быть разными, но записав равенство

$$\Phi_0[1 + m_0(\Theta)] + \Phi_1[1 + m_1(\Theta)] + \dots + \Phi_k[1 + m_k(\Theta)] = \Phi_{\Sigma}[1 + m_{\Sigma}(\Theta)],$$

путем последовательных преобразований можно получить

$$\frac{\Phi_0}{\Phi_{\Sigma}}m_0 + \frac{\Phi_1}{\Phi_{\Sigma}}m_1 + \dots + \frac{\Phi_k}{\Phi_{\Sigma}}m_k = m_{\Sigma}. \quad (17)$$

Таким образом, суммарную мощность многомодового излучения лазера можно представить в виде (16), где m_{Σ} определяется (17), а

$\Phi_{\Sigma} = \sum_{i=0}^k \Phi_i(\Theta_0)$, где Θ_0 – некоторое отсчетное значение фактора перестройки длин волн мод.

Факторами, с помощью которых управляют длиной волны генерируемого излучения, могут являться температура кристалла лазера, ток инжекции, угол наклона дифракционной решетки и т.д. Зависимость $\lambda(\Theta)$ для каждой моды в небольшом диапазоне перестройки также можно представить в линейном виде:

$$\lambda_i = \lambda_{0i} + k_{\lambda i}(\Theta - \Theta_0) = \lambda_{0i} + k_{\lambda i}\Delta\Theta.$$

После прохождения трассы длиной L поток зондирующего излучения, приходящий на фотоприемник, можно записать, используя закон Ламберта-Бера, в виде

$$\Phi_L(\Delta\Theta) = \alpha_d \Phi_{\Sigma} \exp\{-k_n[v^*(\Delta\Theta)]P_a L + m_{\Sigma}\Delta\Theta\}, \quad (18)$$

где α_d - коэффициент, учитывающий суммарные диссипативные потери, $k_n = \frac{\Phi_i}{\Phi_{\Sigma}} k [v^*(\Delta\Theta)]$ – нормированный линейный коэффициент поглощения, учитывающий относительную мощность излучения каждой моды, v^* – частота излучения (см^{-1}), P_a – парциальное давление газа в атмосфере.

Из выражения (18) следует, что использование корреляционного метода в лазерной газоаналитической аппаратуре, работающей в реальных производственных условиях, требует учета коэффициента диссипативных потерь α_d , модового состава излучения полупроводникового лазера и зависимости излучаемой им мощности от параметров, управляющих длиной волны излучения. Диссипативные потери определяются прозрачностью контролируемой среды, состоянием поверхностей оптических элементов, стабильностью коэффициента передачи электронного тракта и т.п. Возникающие из-за незнания α_d погрешности даже при проведении периодической калибровки аппаратуры могут значительно превышать пороговую чувствительность определения концентрации контролируемого компонента.

Для модифицированного корреляционного метода в процессе калибровки регистрируются два сигнала: 1-й – в отсутствие контролируемого вещества:

$$\Phi^{(0)} = \alpha_0 \Phi_{\Sigma} \exp\{m_{\Sigma}\Delta\Theta\},$$

2-й – при наличии анализируемого вещества с известным парциальным давлением P_k :

$$\Phi_{L_k}^{(Pk)} = \alpha_k \Phi_\Sigma \exp\{-k_n[v^*(\Delta\Theta)]P_k L_k + m_\Sigma \Delta\Theta\},$$

где L_k – удвоенная длина трассы при калибровке. При измерениях на трассе с удвоенной базой L будет регистрироваться сигнал

$$\Phi_L^{(Pa)} = \alpha_{Pa} \Phi_\Sigma \exp\{-k_n[v^*(\Delta\Theta)]P_a L + m_\Sigma \Delta\Theta\},$$

где P_a – искомое парциальное давление.

Поскольку коэффициенты α_0 , α_k и α_{Pa} неизвестны, необходим алгоритм вычисления P_a , в котором эти постоянные исключаются. Для этого с помощью преобразований заранее можно сформировать образ калибровочного сигнала, который не содержит коэффициентов диссипативных потерь, а при измерениях аналогичным способом создавать образ измерительного сигнала. Потом, применив корреляционную обработку, можно найти оценку амплитуды образа измерительного сигнала, по которой уже рассчитывается искомое парциальное давление.

Для создания образа калибровочного сигнала вначале формируется отношение $\Phi^{(0)} / \Phi_{L_k}^{(Pk)}$, затем берется разность логарифмов в двух точках $\Delta\Theta$ и $\Delta\Theta + \xi$ (используя принцип совокупных измерений). Прделав элементарные преобразования, получим образ калибровочного сигнала в виде

$$y(\Delta\Theta) = \begin{cases} P_k L_k [k_n(\Delta\Theta) - k_n(\Delta\Theta_k / 2 - \Delta\Theta)], & \text{при } 0 < \Delta\Theta \leq \Delta\Theta_k / 2, \\ P_k L_k [k_n(\Delta\Theta) - k_n(\Delta\Theta_k - \Delta\Theta)], & \text{при } \frac{\Delta\Theta_k}{2} < \Delta\Theta \leq \Delta\Theta_k. \end{cases} \quad (19)$$

На рис. 2 приведены функциональные зависимости, поясняющие процесс формирования образа. Сформированный образ калибровочного сигнала не содержит коэффициентов диссипативных потерь. Очевидна линейная зависимость $y(\Delta\Theta)$ от парциального давления, что весьма важно при работе в большом диапазоне измеряемых концентраций. К следующему достоинству полученного образа можно отнести его независимость от линейных составляющих изменения мощности лазерного излучения, возникающих в процессе перестройки его частоты. И, наконец, полученный образ не содержит постоянной составляющей, что несколько упрощает последующую корреляционную обработку.

Аналогично сформируем образ измерительного сигнала $x(\Delta\Theta, \eta)$, в который введем параметр η , описывающий возможный частотный сдвиг излучения из-за нестабильности поддержания параметров перестройки частоты лазера, например, температуры его кристалла,

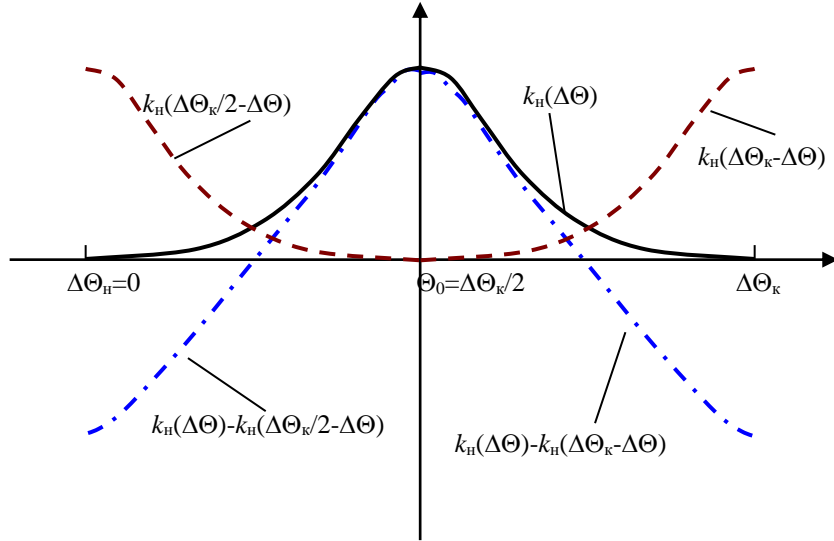


Рис.2. Функциональные зависимости, используемые при формировании образа калибровочного сигнала: сплошная линия – зависимость нормированного линейного коэффициента поглощения $k_n(\Delta\Theta)$ выбранной линии контролируемого компонента от параметра перестройки $\Delta\Theta$ в интервале от $\Delta\Theta_H=0$ до $\Delta\Theta_K$; штриховая – зеркальное отображение $k_n(\Delta\Theta)$ относительно оси, проходящей через Θ_0 ; штрих-пунктир – разность этих зависимостей (19).

$$x(\Delta\Theta, \eta) = \begin{cases} y(\Delta\Theta) - P_a L [k_n(\Delta\Theta + \eta) - k_n(\Delta\Theta_K/2 - \Delta\Theta + \eta)] - C(\Delta\Theta) + B(\Delta\Theta, \eta), & \text{при } 0 < \Delta\Theta \leq \Delta\Theta_K/2, \\ y(\Delta\Theta) - P_a L [k_n(\Delta\Theta + \eta) - k_n(\Delta\Theta_K - \Delta\Theta + \eta)] - C(\Delta\Theta) + B(\Delta\Theta, \eta), & \text{при } \frac{\Delta\Theta_K}{2} < \Delta\Theta \leq \Delta\Theta_K, \end{cases}$$

где

$$C(\Delta\Theta) = \begin{cases} m_\Sigma(\Delta\Theta) - m_\Sigma(\Delta\Theta_K/2 - \Delta\Theta), & \text{при } 0 < \Delta\Theta \leq \Delta\Theta_K/2, \\ m_\Sigma(\Delta\Theta) - m_\Sigma(\Delta\Theta_K - \Delta\Theta), & \text{при } \frac{\Delta\Theta_K}{2} < \Delta\Theta \leq \Delta\Theta_K, \end{cases}$$

$$B(\Delta\Theta, \eta) = \begin{cases} m_\Sigma(\Delta\Theta + \eta) - m_\Sigma(\Delta\Theta_K/2 - \Delta\Theta + \eta), & \text{при } 0 < \Delta\Theta \leq \Delta\Theta_K/2, \\ m_\Sigma(\Delta\Theta + \eta) - m_\Sigma(\Delta\Theta_K - \Delta\Theta + \eta), & \text{при } \frac{\Delta\Theta_K}{2} < \Delta\Theta \leq \Delta\Theta_K. \end{cases}$$

Необходимо еще исключить влияние возможного сдвига зависимости частоты излучения лазера от параметра перестройки $\Delta\Theta$ относительно записанной при калибровке. Это достигается путем определения максимального значения нормированной взаимно-корреляционной функции

$$A = \max[A(\eta)] \approx \int_{0+\eta}^{\Theta_K-\eta} x(\Delta\Theta, \eta) y(\Delta\Theta) d(\Delta\Theta) / \int_0^{\Theta_K} y^2(\Delta\Theta) d(\Delta\Theta). \quad (20)$$

Очевидно, что искомая амплитуда сигнала или максимум $A(\eta)$ будет наблюдаться при $\eta = 0$. При этом выражение для $x(\Delta\Theta, \eta)$ упрощается (поскольку $B(\Delta\Theta, \eta = 0) - C(\Delta\Theta) = 0$) и (20) принимает вид

$$A = \frac{\int_0^{\Theta_k} P_k L_k \Delta k_H(\Delta\Theta) [P_k L_k \Delta k_H(\Delta\Theta) - P_a L \Delta k_H(\Delta\Theta)] d(\Delta\Theta)}{\int_0^{\Theta_k} (P_k L_k)^2 [\Delta k_H(\Delta\Theta)]^2 d(\Delta\Theta)} = \frac{P_k L_k - P_a L}{P_k L_k},$$

$$\text{где } \Delta k_H(\Delta\Theta) = \begin{cases} k_H(\Delta\Theta) - k_H(\Delta\Theta_k / 2 - \Delta\Theta), & \text{при } 0 < \Delta\Theta \leq \Delta\Theta_k, \\ k_H(\Delta\Theta) - k_H(\Delta\Theta_k - \Delta\Theta), & \text{при } \frac{\Delta\Theta_k}{2} < \Delta\Theta \leq \Delta\Theta_k. \end{cases}$$

Из последнего выражения легко получить удобную формулу для вычисления P_a :

$$P_a = P_k \frac{L_k}{L} (1 - A).$$

Использование модифицированного корреляционного метода для непрерывного контроля концентрации аммиака с применением перестраиваемого лазерного диода на основе GaInPAs и линий поглощения NH_3 в области 1.514 мкм показало, что пороговая чувствительность предлагаемого метода не хуже корреляционного, а эксплуатационная и метрологическая надежность обеспечивается следующими факторами: простотой калибровки, исключением влияния на результаты контроля возникающих в процессе эксплуатации загрязнений оптических поверхностей, нестабильности поддержания средней температуры кристалла лазера, изменений коэффициента передачи оптических и электронных трактов и т.п. Достижимая чувствительность зависит от особенностей оптической системы и тщательности ее юстировки, сводящей к минимуму амплитуду паразитных интерференционных колебаний на фотоприемнике, наблюдающихся во время перестройки частоты излучения лазера.

При использовании дорогих современных полупроводниковых лазеров с внешним резонатором и широким диапазоном перестройки частоты генерации (≈ 70 нм) становится возможным путем анализа нескольких линий поглощения контролируемого газа и временного усреднения (накопления) сигналов довести пороговую чувствительность регистрации величины поглощения до 10^{-4} от среднего потока излучения лазера, которое попадает на чувствительную площадку фотоприемника после прохождения контролируемой трассы [20]. Например, использование лазера ТЕС 100-1550-10 фирмы Sacher Lasertechnik позволяет работать в облас-

ти слабых обертоновых линий поглощения CO (1,57 мкм), где перекрытие линий поглощения CO с линиями поглощения паров воды и углекислого газа меньше, чем в диапазоне 2.3 мкм. Это хорошо видно из рис. 3, на котором приведены, рассчитанные с помощью базы данных по линиям поглощения газов HITRAN значения пропускания топочных газов при температуре 793 К [21]. Концентрация паров воды составляет 20 %, а углекислого газа – 10 %, что обычно наблюдается при сгорании углеводородного топлива. Заметим, что линии поглощения CO в этом диапазоне очень слабые и без использования модифицированного корреляционного метода получить пороговую чувствительность порядка 500 ppm затруднительно. Действительно, поглощение проходящего излучения самыми интенсивными линиями составляет лишь около 20 % при объемной концентрации CO 10 %. Очевидно, что при пороговой чувствительности 500 ppm необходимо уверенно регистрировать изменения поглощения проходящего излучения, составляющие 0.1 %, в то время как интенсивность перекрывающихся линий поглощения H₂O и CO₂ в десятки раз больше, и небольшие вариации концентрации паров воды и CO₂ будут вызывать значительные погрешности.

Одночастотные полупроводниковые лазеры с использованием перестраиваемого внешнего резонатора на дифракционной решетке (схема Литтрова) достаточно дорогие. Поэтому анализировались методические погрешности определения концентрации CO при использовании дешевых полупроводниковых лазеров без внешнего резонатора с перестройкой частоты изменением температуры кристалла лазера термоэлектрическим микрохолодильником. Программное обеспечение работы такого лазерного измерителя концентрации CO должно учитывать гистерезис перестроечной характеристики лазера. Во время перестройки длины волны излучения лазера в одну и другую стороны наблюдается сдвиг фиксируемых контуров поглощения контролируемого газа относительно друг друга. Это требует проведения дополнительных операций при временном усреднении получаемых сигналов и дальнейшей корреляционной обработке.

Для правильной калибровки лазерного многомодового измерителя концентрации CO в топочных газах необходимо в процессе создания образа калибровочного сигнала обязательно учитывать уширение с ростом температуры линий поглощения всех попадающих в анализируемую спектральную область газовых компонентов. Поэтому начальную калибровку проводят с помощью кювет, содержащих CO, H₂O и CO₂ при комнатной температуре, но с несколько увеличенным давлением. На рис. 4 представлены полученные при численном моделировании соответст-

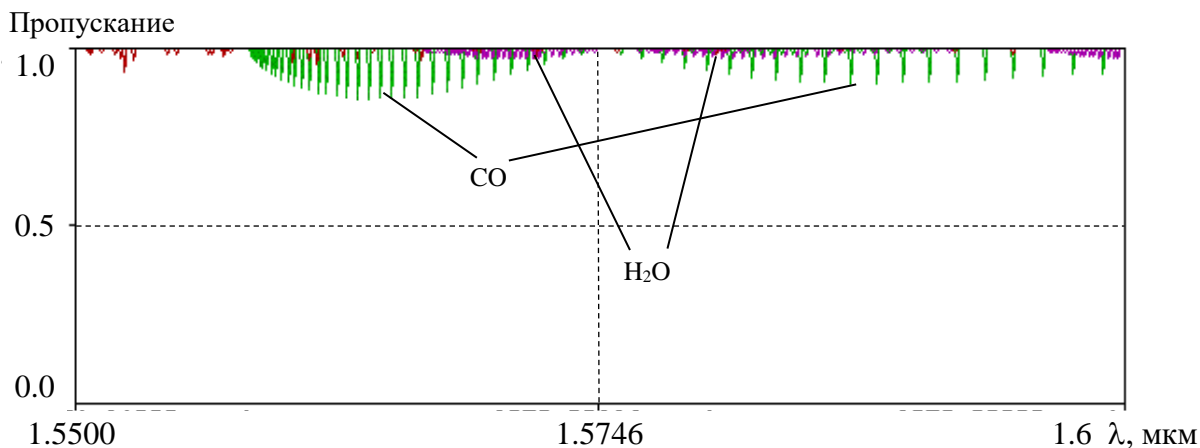


Рис. 3. Спектр пропускания топочных газов в области 1.57 мкм при длине трассы 5 м

вующие зависимости, показывающие, что при оптимальном выборе длины калибровочной кюветы l_c и давления СО в ней p_c^{CO} , методические погрешности при использовании многомодового излучения и модифицированного корреляционного метода измерений близки к требуемым [21].

8. Недисперсионные корреляционные трансмиссионные методы контроля концентрации газов

При контроле концентрации ряда газов (СО, СО₂, углеводородов и т. д.), которые имеют интенсивные линии поглощения в средней ИК-области спектра, где пока отсутствуют лазерные диоды, не требующие криогенного охлаждения, перспективно использование неохлаждаемых ИК-светодиодов, работающих в спектральной области до 7,0 мкм. В качестве примера можно привести светодиоды, изготавливаемые научно-технологическим центром «Physimpex» (ФТИ им. Иоффе, Санкт-Петербург). Светодиоды по сравнению с лазерами имеют широкий спектр излучения, что сильно сказывается как на пороговой чувствительности, так и селективности непрерывного контроля. К тому же существующая зависимость характеристик светодиодов и фотоприемников от температуры окружающей среды приводит к возникновению погрешностей, для учета которых необходима частая калибровка, осуществление которой при непрерывном контроле сильно усложняет аппаратуру. В состав прибора необходимо дополнительно вводить образцовую среду и средства ее помещения в измерительный канал. Погрешности традиционно используемых методик измерений (интегральных и дифференциальных) определяются указанными факторами. Например, при использовании интегрального ослабления излучения светодиода выбранной поло-

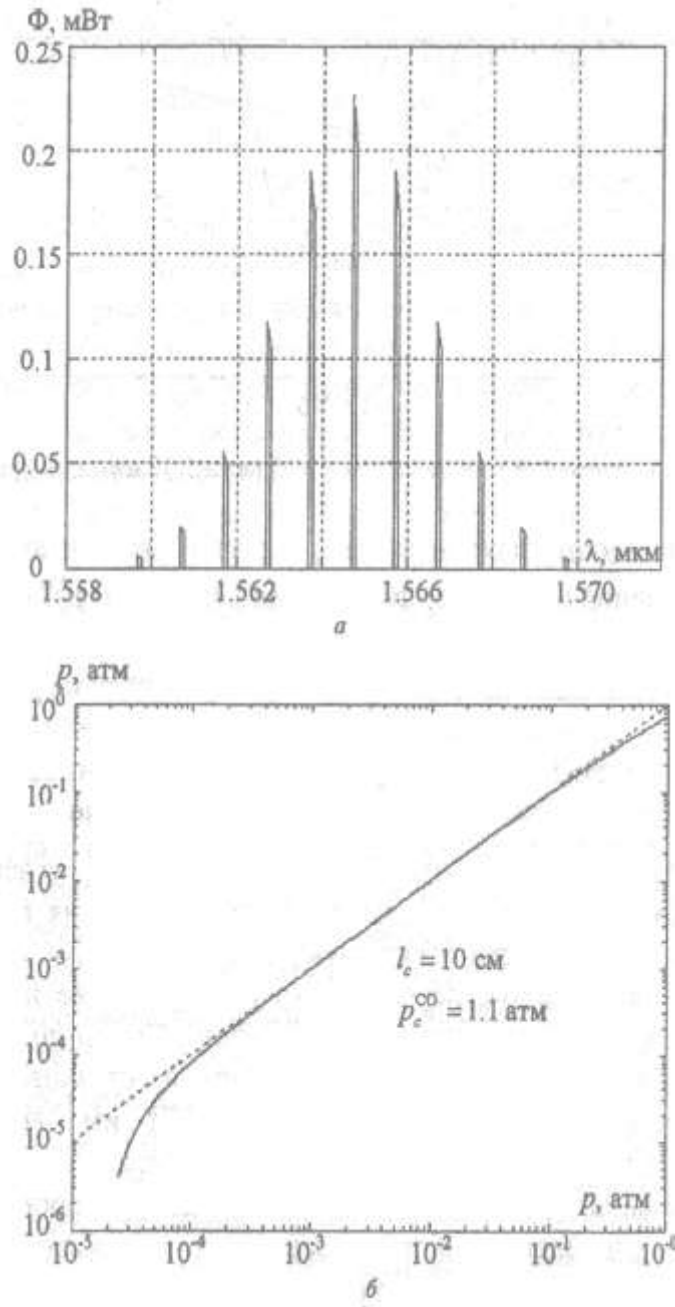


Рис. 4. Изменение мощности мод моделируемого лазера с длиной волны (а) и зависимости определяемых значений парциального давления СО от истинных (б) для одночастотного (штриховая линия) и многомодового (сплошная кривая) излучения

сой поглощения газа любые изменения его ватт-амперной характеристики или крутизны преобразования фотоприемника приводят к погрешностям контроля [22].

Для исключения этих недостатков обычно используют дифференциальный способ измерений, поскольку при вычислении отношения сигнала-

лов, фиксируемых в измерительном и опорном каналах, сокращаются неизвестные коэффициенты диссипативных потерь и крутизна преобразования приемника излучения. К недостаткам дифференциальной схемы измерений можно отнести сложность оптико-механической части и некоторое снижение отношения сигнал/шум за счет сужения спектральных интервалов измерительного и опорного каналов. Более существенным недостатком является невысокая селективность дифференциального метода. Отметим, что в промышленности в основном требуется вести непрерывный контроль состава сложных аэродисперсных сред и хорошая селективность контроля является неперенным условием. Например, при определении концентрации СО непосредственно в потоке дымовых газов

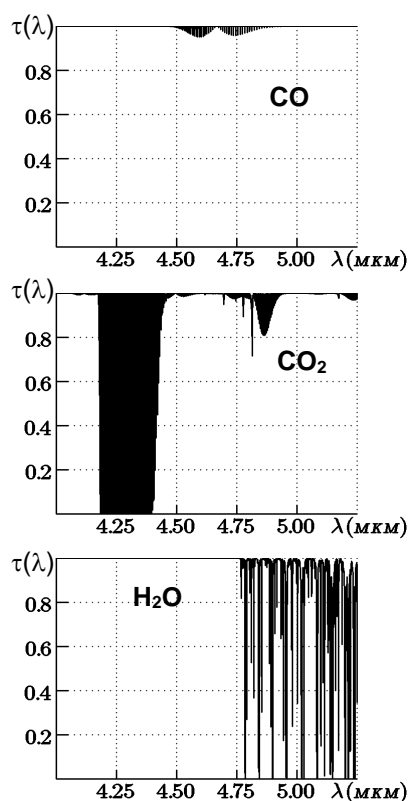


Рис.5. Спектры пропускания основных компонентов дымовых газов котлов

для оптимизации процесса горения топлива пороговая чувствительность интегральных и дифференциальных способов ограничена влиянием вариаций концентрации H_2O и CO_2 [22]. Это влияние возникает из-за перекрытия спектров. В качестве иллюстрации на рис. 5 представлены спектры поглощения СО при концентрации 10^{-3} % от объема, CO_2 при концентрации 10 % и H_2O с концентрацией 20 % от объема при температуре 373 °С. Указанные температуры и концентрации характерны для дымовых газов котлов. Длина трассы составляет 1 м.

Для повышения селективности контроля необходимо применение корреляционных методов контроля [17, 20], основанных на уникальности полос поглощения каждой компоненты. Хотя полосы поглощения разных газов контролируемой среды могут перекрываться, практически отсутствует их взаимная корреляция, что позволяет в десятки раз повысить селективность анализа.

Существенным достоинством корреляционных методов является возможность использования более широких, по сравнению с дифференциальными способами, спектральных интервалов регистрации излучения, что увеличивает отношение сигнал/шум и позволяет применять как неохлаждаемые приемники излучения с невысокой пороговой чувствительностью, так и светодиоды, которые имеют малую интенсивность, особенно на длинах волн более 4 мкм.

В целом аналитические методы корреляционной спектроскопии можно разделить на дисперсионные и недисперсионные. К дисперсионным относятся методы, в которых обязательным является спектральное разложение используемого источника излучения. Они требуют использования спектрометров, в которых вместо одной щели, применяется их набор, называемый поглощающей маской, пропускающей излучение лишь в линиях поглощения контролируемого газа. Маска совершает небольшие колебания вдоль спектра около центра линий с частотой несколько десятков герц и при наличии в спектре входящего излучения провалов, обусловленных линиями поглощения исследуемого газа, на выходе фотоприемника формируется модулированный по амплитуде сигнал. Основными недостатками корреляционных масочных приборов является их сложность, поскольку они требуют спектрометра высокого разрешения, и малая светосила.

Недисперсионные методы не требуют спектрального разложения используемого излучения. Необходимое ослабление излучения на длинах волн, коррелирующих с линиями поглощения анализируемого газообразного вещества, достигается путем пропускания зондирующего светового потока через кювету (обычно называемую корреляционной), которая заполнена таким же анализируемым газом. Попеременное пропускание излучения через корреляционную кювету и нейтральный ослабитель позволяет промодулировать только те спектральные составляющие, которые совпадают с линиями поглощения контролируемого газа. Поскольку функции диспергирующего элемента и маски выполняет корреляционная кювета с фиксированным количеством того же газа, который подлежит контролю, то недисперсионные корреляционные газоанализаторы обладают более простой оптической схемой по сравнению с дисперсионными. Как видно из рис. 6, поток излучения от внешнего источника подсветки, прошедший через контролируемую среду и попадающий на приемный объектив, делится на два пучка, один из которых проходит через корреляционную кювету, а второй через нейтральную, заполненную обычно сухим азотом.

Концентрация газа в корреляционной кювете (например, CO) должна быть такой, чтобы в спектре выходящего из корреляционной кюветы излучения отсутствовали соответствующие спектральные составляющие, поглощаемые им. Тогда поглощение CO, находящегося в контролируемой среде, практически не изменяет интенсивность потока на выходе корреляционной кюветы. Если же поток проходит через нейтральную кювету (обычно заполняемую сухим азотом), то поглощение CO, находящегося в контролируемой среде, будет вызывать ослабление сигнала,

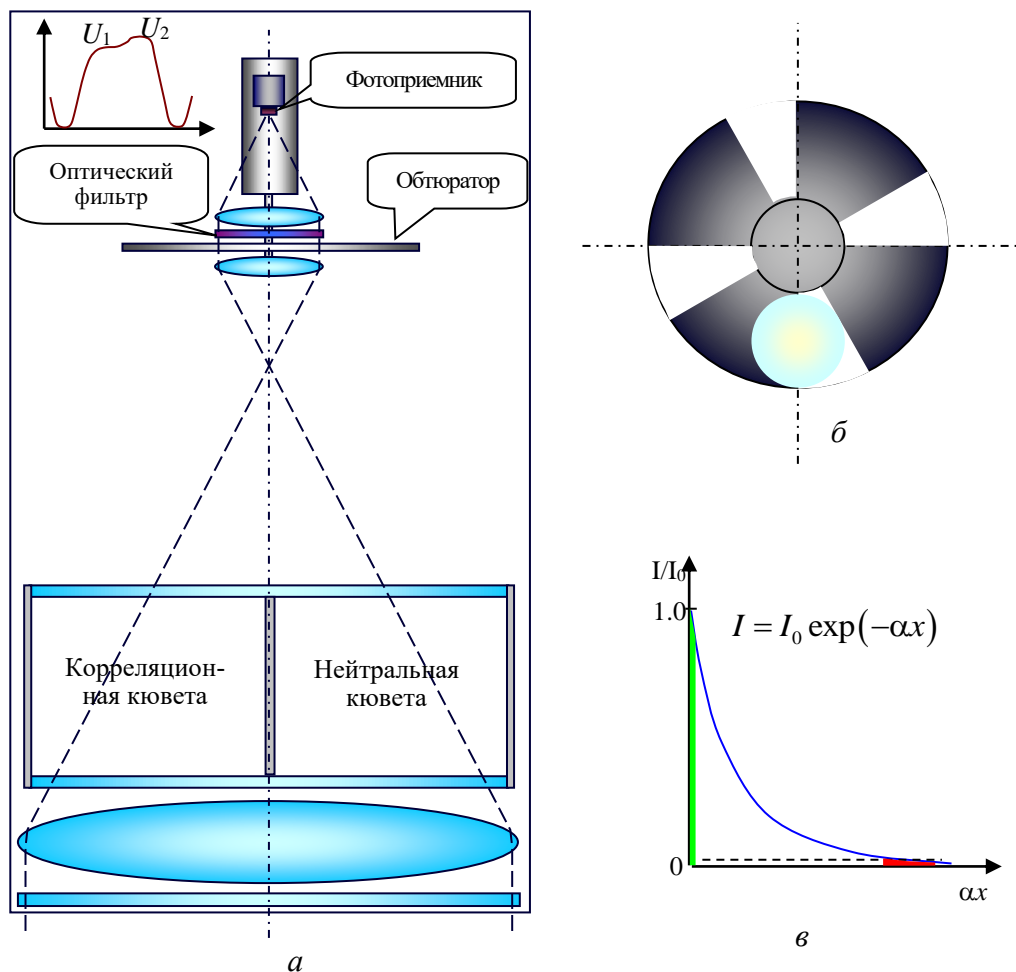


Рис. 6. Оптическая схема недисперсионного корреляционного газоанализатора, использующего немодулированную внешнюю подсветку (а), соотношения между размерами пучка излучения и лопастей обтюратора (б), интенсивности излучения прошедшего через нейтральную и корреляционную кюветы в спектральном диапазоне поглощения контролируемого компонента (в)

формируемого фотоприемником.

Можно предложить несколько оптических схем недисперсионных корреляционных газоанализаторов. Например, на рис. 7 показана оптическая схема газоанализатора с модуляцией зондирующего излучения, источником которого может являться как светодиод, так и тепловой излучатель. Достоинством этой схемы является использование одного излучателя и одного приемника.

Рассмотрим, каким образом обеспечивается метрологическая надежность схемы, представленной на рис. 8, которая не требует использования вращающихся механических узлов. При ее использовании о поглощающей массе газа на контролируемом участке судят по разности потоков от двух светодиодов, попадающих на фотоприемник.

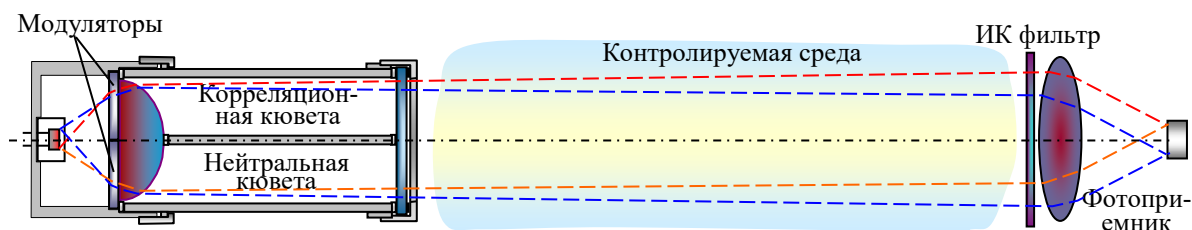


Рис.7. Функциональная оптическая схема недисперсионного корреляционного газоанализатора с модуляцией зондирующего излучения

Излучение первого светодиода проходит через коллимирующую линзу, корреляционную кювету, полупрозрачное зеркало, расположенное под углом 45° градусов к оптической оси системы, контролируемую среду, оптический фильтр и собирается приемной линзой на чувствительной площадке фотоприемника. Излучение второго светодиода после прохождения нейтральной кюветы поворачивается полупрозрачным зеркалом под углом 90° и далее идет по тому же пути, что и излучение первого светодиода. Найдем оценочное выражение для определения парциального давления контролируемого газа при измерениях. Поток от светодиодов, прошедшие через кюветы, можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}\Phi_{k1}(\lambda) &= \Phi_1(\lambda) \cdot \tau_{k1}(\lambda) \cdot \exp[-k(\lambda)P_{k1}l_1], \\ \Phi_{k2}(\lambda) &= \Phi_2(\lambda) \cdot \tau_{k2}(\lambda) \cdot \exp[-k(\lambda)P_{k2}l_2],\end{aligned}$$

где $\Phi_1(\lambda)$ и $\Phi_2(\lambda)$ - потоки излучения от светодиодов; τ_{k1} , τ_{k2} - коэффициенты пропускания окон кювет; $k(\lambda)$ - коэффициент поглощения контролируемого газа; $P_{k1}l_1$, $P_{k2}l_2$ - произведения парциального давления газов в кюветах на их длины.

При дальнейшем их прохождении через полупрозрачное зеркало, первое защитное стекло, анализируемую среду, второе защитное стекло получаем:

$$\begin{aligned}\Phi_{0k1}(\lambda) &= \tau_{31}(\lambda)\tau_{0k}(\lambda) \cdot \Phi_{k1}(\lambda) \cdot \exp\{-[k(\lambda)P_{cp} + k_{cp}(\lambda)P]l_{cp}\}, \\ \Phi_{0k2}(\lambda) &= \tau_{32}(\lambda)\tau_{0k}(\lambda) \cdot \Phi_{k2}(\lambda) \cdot \exp\{-[k(\lambda)P_{cp} + k_{cp}(\lambda)P]l_{cp}\},\end{aligned}$$

где $\tau_{31}(\lambda)$, $\tau_{32}(\lambda)$ - относительные потери потоков от первого и второго светодиодов при прохождении полупрозрачного зеркала; $\tau_{0k}(\lambda)$ - суммарный коэффициент пропускания защитных стекол; P_{cp} - парциальное давление контролируемого газа; $k_{cp}(\lambda)P$ - произведение коэффициента поглощения аэродисперсной среды на ее парциальное давление при отсутствии контролируемого газа; l_{cp} - длина контролируемой трассы.

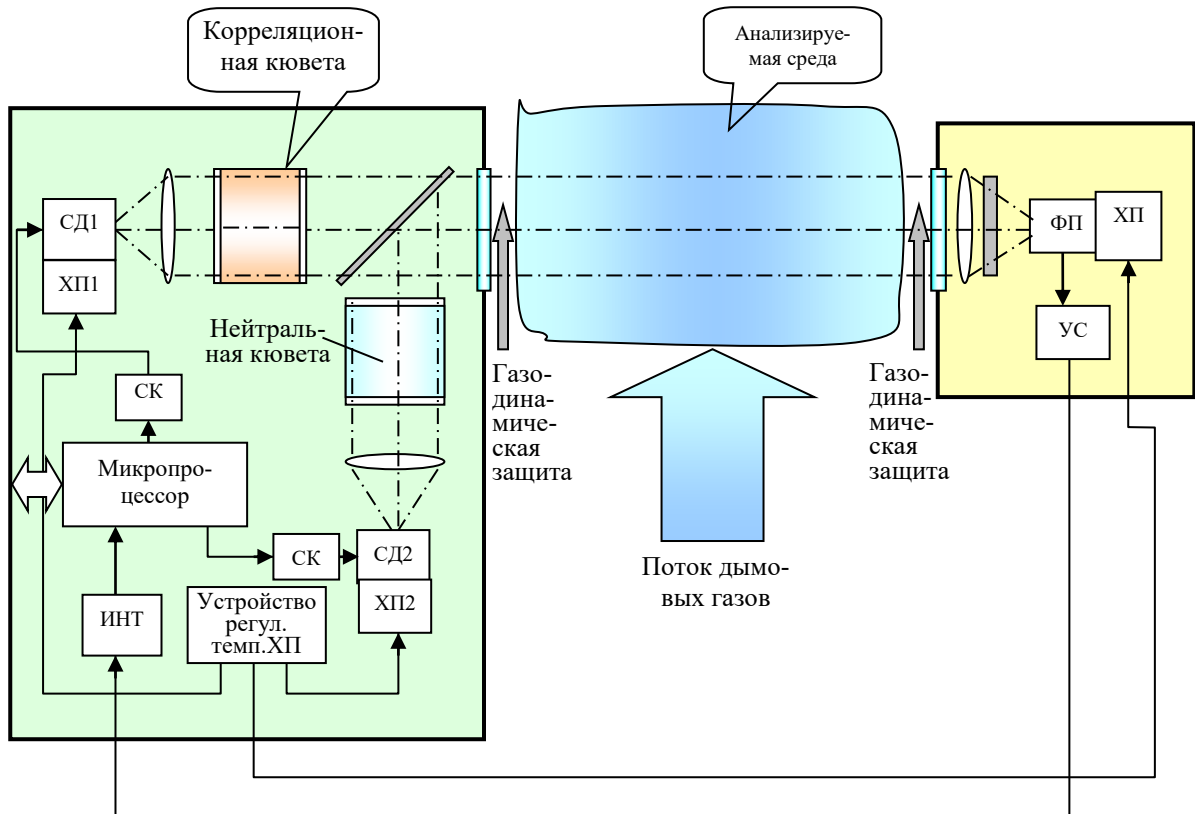


Рис. 8. Функциональная схема недисперсионного корреляционного светодиодного газоанализатора

ФП – фотоприемник, УС – усилитель, ИНТ – интегратор, СК – система контроля, ХП – холодильник Пельтье, СД – инфракрасные светодиоды

Интегральные потоки u_1 и u_2 от каждого излучателя, попадающие на фотоприемник, рассчитываются с помощью выражений:

$$u_1 = A_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\phi}(\lambda) \cdot \Phi_{k1} \cdot \exp[-k(\lambda)(P_{k1}l_{k1} + P_{cp}l_{cp}) - k_{cp}(\lambda)Pl_{cp}]d\lambda,$$

$$u_2 = A_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\phi}(\lambda) \cdot \Phi_{k2} \cdot \exp[-k(\lambda)(P_{k2}l_{k2} + P_{cp}l_{cp}) - k_{cp}(\lambda)Pl_{cp}]d\lambda,$$

где $A_1 = \tau_{k1}\tau_{31}\tau_{0k}$; $A_2 = \tau_{k2}\tau_{32}\tau_{0k}$; а $\tau_{\phi}(\lambda)$ – коэффициент пропускания фильтра.

Для упрощения дальнейших расчетов положим, что регулировкой тока инжекции можно добиться равенства коэффициентов

$$A_1 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_1(\lambda)d\lambda = A_2 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_2(\lambda)d\lambda = A, \text{ что легко достигается для идентич-}$$

ных излучателей, поскольку поведение $\Phi_1(\lambda)$, $\Phi_2(\lambda)$ в рабочем диапазоне $\lambda_1 - \lambda_2$ монотонное и примерно одинаковое.

С целью исключения влияния диссипативных потерь найдем разность и сумму потоков, а потом получим их отношение:

$$\frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} = \frac{B - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\phi}(\lambda) \cdot \tau_{\text{cp}}(\lambda) \exp[-k(\lambda)(P_{k2}l_2 + P_{\text{cp}}l_{\text{cp}})]d\lambda}{B + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\phi}(\lambda) \cdot \tau_{\text{cp}}(\lambda) \exp[-k(\lambda)(P_{k2}l_2 + P_{\text{cp}}l_{\text{cp}})]d\lambda},$$

где $\tau_{\text{cp}}(\lambda) = \exp[-k_{\text{cp}}(\lambda)Pl_{\text{cp}}]$, а $B = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\phi}(\lambda) \cdot \tau_{\text{cp}}(\lambda) \exp[-k(\lambda)P_{k1}l_1]d\lambda$.

После дальнейших преобразований можно получить зависимость определяемого парциального давления от основных параметров

$$P_{\text{cp}} = \frac{1}{l_{\text{cp}}} \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\phi}(\lambda) \cdot \tau_{\text{cp}}(\lambda) \exp[-k_{\text{cp}}(\lambda)P_{k2}l_2]d\lambda - \frac{u_2}{u_1} B}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\phi}(\lambda) \cdot \tau_{\text{cp}}(\lambda) k(\lambda) d\lambda}.$$

Определяемое парциальное давление будет слабо зависеть от $\tau_{\text{cp}}(\lambda)$, поскольку этот коэффициент содержится во всех членах знаменателя и числителя. Полностью исключается влияние вариаций параметров приемного тракта (загрязнений оптических поверхностей, нестабильности крутизны преобразования и т. д.) на погрешности измерений, так как перечисленные величины сокращаются при вычислении отношения регистрируемых потоков u_2/u_1 . Наблюдается лишь влияние вариаций концентрации сопутствующих газов, возникающее при перекрытии полос поглощения. Для иллюстрации на рис. 9 представлены зависимости влияния содержания CO_2 на измеряемые значения концентрации CO [21-23]. При добавлении в калибровочную смесь сопутствующего газа в соответствующей концентрации эти погрешности могут быть снижены на порядок.

Заключение

Таким образом, применение полупроводниковых излучателей позволяет придать конструкциям создаваемых газоаналитических средств свойство портативности, а использование принципов концепции «безап-

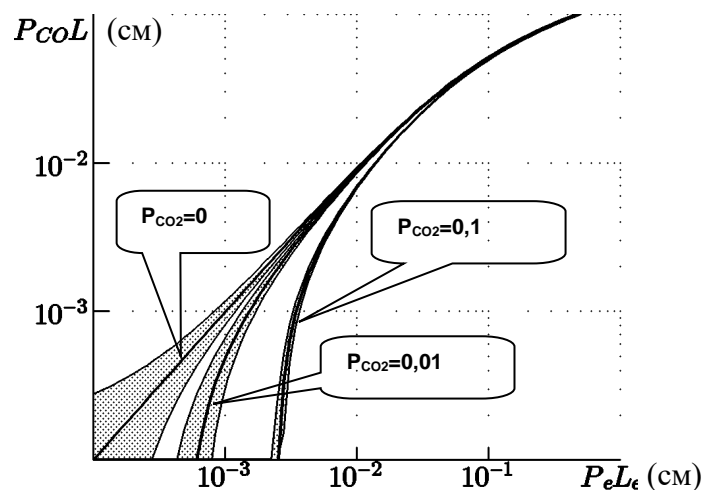


Рис. 9. Результаты моделирования влияния содержания CO_2 в дымовых газах на результаты определения концентрации CO при использовании калибровочной смеси, содержащей только CO и N_2

риорности» – максимально устранить влияние на результаты измерений вариаций аппаратурных параметров и неконтролируемых изменений среды.

Литература

1. Кугейко М. М., Малевич И. А. Системный подход к анализу и синтезу структур автоматизированных систем оптико-физической диагностики рассеивающих сред. // Измерительная техника. 1996. № 9. С. 40–44.
2. Кугейко М. М., Малевич И. А., Оношко Д. М. Анализ моделей и физических ограничений методов восстановления оптических и микрофизических характеристик неоднородных рассеивающих сред. // Сб. научн. тр. «Новые информационные технологии». Мн.: Белгосуниверситет, 1997. С. 56–90.
3. Кугейко М. М., Малевич И. А., Оношко Д. М. Разработка теории диагностики слоисто неоднородных сред (в условиях минимума априорной и дополнительной измерительной информации). // Сб. научн. тр. «Новые информационные технологии». – Мн.: Белгосуниверситет, 1997. С. 91–123.
4. Кугейко М. М. Принципы построения оптико-физических систем локальной диагностики. // Сб. научн. тр. «Новые информационные технологии». – Мн.: Белгосуниверситет, 1997. С. 124–129.
5. Kugeiko M. M., Onoshko D. M. Remote sensing of atmosphere and water media under condition of a priori uncertainty. // Proc. SPIE. 1997. Vol. 3110. P. 180–184.
6. Кугейко М. М. Лазерные системы (в условиях априорной неопределенности). – Мн.: БГУ, 1999. – 196 с.
7. Кугейко М. М., Оношко Д. М. Диагностика первичных характеристик переходных участков многочастотных рассеивающих сред (в рамках концепции «безаприор-

- ности»). // Сб. научн. тр. «Оптика и спектроскопия молекулярных и немолекулярных систем». – Мн.: БГУ, 2000. С. 130–158.
8. *Кугейко М. М., Фираго В. А.* Концепция «безаприорности» в диагностике аэрозольных сред. // Сб. научн. тр. «Радиофизика и электроника», вып. 5. – Мн.: БГУ, 2001. С. 79–87.
 9. *Кугейко М. М.* О «бескалибровочных» оптико-физических измерениях. // Измерительная техника, 1997. № 9. С. 35–38.
 10. *Kugeiko M. M., Barkova A. V.* Principles of development of “calibration-free” systems of optical biomedical diagnostics // Proc. SPIE. 2001. Vol. 4535. P. 11–19.
 11. Laser diagnostics of aerosol and gas emissions from factory chimneys (concept of elimination of a priori data) / M. M. Kugeiko, V. A. Firago, A. V. Barkova, S. Belezuyak // Proc. SPIE. 2002. Vol. 4680. P. 112–121.
 12. *Кугейко М. М., Оношко Д. М.* К теории томографического зондирования рассеивающих сред. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11, № 12. С. 1333–1336.
 13. *Kugeiko M. M., Onoshko D. M.* Bistatic tomographic sensing of the environment. // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4887. P. 32–40.
 14. *Кугейко М. М., Оношко Д. М.* Связь параметров рассеивающей среды и измерительной аппаратуры в бистатическом томографическом зондировании. // Оптика и атмосфера океана. 2002. Т. 15, № 2. С. 125–131.
 15. *Кугейко М. М., Оношко Д. М.* Способ определения оптических характеристик рассеивающих сред. // Патент РБ № 3670.
 16. *Кугейко М. М., Умрейко Д. С.* Спектрально-томографический метод определения компонентного состава рассеивающих сред. // ЖПС. 2002. Т. 69, № 6. С. 778–781.
 17. *Кугейко М. М., Фираго В. А.* Лазерные методы контроля компонентного состава аэрозольных сред. // ЖПС. 2001. Т. 68, № 4. С. 520–525.
 18. *Кугейко М. М., Фираго В. А.* Прецизионный лазерный измеритель коэффициента ослабления, прозрачности, мутности жидких сред. // Сб. ст. 3-й конф. по лазерной физике и спектроскопии. Т. 1. Гродно, 1997. С. 101–104.
 19. *Кугейко М. М., Фираго В. А.* Лазерный измеритель коэффициента ослабления в жидких средах. // Материалы научн. техн. конф. «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления», Мн.: МГИЭП, 1998. С. 149–152.
 20. *Дрозд С. Н., Манак И. С., Фираго В. А.* Методы и средства лазерной диодной спектроскопии в газоаналитических задачах (обзор) // Лазерная и оптоэлектронная техника: Сб. науч. тр. Вып. 4. Мн.: БГУ, 1999. С. 45–84.
 21. Корреляционные газоаналитические средства непрерывного контроля на основе полупроводниковых источников излучения / В. Вуйчик, В. А. Фираго, М. М. Кугейко, И. С. Манак // Квантовая электроника: Материалы IV Междунар. конф. Мн.: БГУ, 2002. С. 157–161.
 22. Компьютерное моделирование светодиодных газоанализаторов / А. А. Афоненко, С. Н. Дрозд, И. С. Манак, В. А. Фираго // Лазерная и оптоэлектронная техника: Сб. науч. тр. Вып. 4. Мн.: БГУ, 1999. С. 85–111.
 23. LED’s and laser gas analyzers intended for an increase of fuel firing in the heat-and-power engineering / W. Wojcik, V. A. Firago, M. M. Kugeiko, et al. // New Electrical and Electronic Technologies and Their Industrial Implementation: III Int. sympos. Zakopane, 2003. P. 230–234.