

В.В. Зуев, А.А. Мицель, И.В. Пташник

О ТОЧНОСТИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ УГАРНОГО ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 2-й ГАРМОНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕА-CO₂-ЛАЗЕРА

Исследовано влияние конечной ширины излучения лазерного импульса на эффективный коэффициент дифференциального поглощения CO при зондировании трассовым методом с использованием второй гармоники ТЕА-CO₂-лазера. Показано, что при давлении лазерной смеси ~ 1 атм неучет эффекта спектрального усреднения может приводить к погрешности определения коэффициента поглощения, а следовательно, и концентрации CO, от 10 до 100%. Предложена нетрадиционная методика обработки данных зондирования с целью исключения указанной погрешности. Приведены оценки погрешностей определения концентрации CO, которые возникают вследствие сдвига линий зондирующего излучения.

Эффективность использования 2-й гармоники излучения перестраиваемого CO₂-лазера для зондирования угарного газа (CO) методом дифференциального поглощения (МДП) на длинных трассах с применением зеркального отражателя неоднократно подтверждалась экспериментами [1–4]. В них использовались вторые гармоники линий излучения сначала 2 * 9R(18) [1, 2], а затем 2 * 9P(24) [3, 4], попадающих в линии поглощения CO с центрами соответственно 2154, 596 и 2086, 322 см⁻¹ примерно равной интенсивности. В качестве референтных частот излучения выбирались 2-е гармоники на соседних линиях 2 * 9R(16) и 2 * 9R(28) соответственно (2151, 976 и 2082, 558 см⁻¹).

Концентрация CO из данных зондирования МДП для трассовой схемы измерений с отражателем определяется по известному соотношению [5]

$$\rho[\text{ppm}] = \frac{1}{K [\text{см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}] z} \ln \frac{P_0(v_{on}) \eta_{on} P(v_{off}, z)}{P_0(v_{off}) \eta_{off} P(v_{on}, z)}, \quad (1)$$

где $K = K(v_{on}) - K(v_{off})$ — коэффициент дифференциального поглощения CO, усредненный по трассе длиной z ; $P_0(v_i)$ — мощность излучения на входе в атмосферный канал на частотах v_i ; $P(v_i, z)$ — регистрируемая мощность сигнала на выходе из атмосферного канала на частотах v_i ; $i = on$, либо off (в линии и вне линии поглощения); η_{on} , η_{off} — константа калибровки лазерной системы.

При использовании отражателя зеркального типа, как известно, к мощности лазерного передатчика предъявляются самые минимальные требования. Поэтому в такой схеме измерений можно применять непрерывные CO₂-лазеры низкого давления, несмотря на малую эффективность удвоения частоты излучения таких лазеров (в [3], например, показано, что достигаемая в нелинейных кристаллах ZnGeP₂ или CdGeAs₂ эффективность удвоения частоты до нескольких сотых долей процента приемлема для зондирования CO на трассе 1 ... 2 км). Для дистанционных методов зондирования CO с использованием отражения зондирующего излучения от топографических мишеней или тем более от распределенных по трассе аэрозолей, необходимо применять мощные импульсные лазерные передатчики. Для импульсных ТЕА-CO₂-лазеров с длительностями импульса генерации 200 нс, эффективность удвоения частоты в кристаллах ZnGeP₂ или CdGeAs₂ могут достигать нескольких десятков процентов [3]. При этом известно, что эффективность удвоения частоты повышается с увеличением мощности ТЕА-CO₂-лазера, напрямую связанной с давлением лазерной среды P_L . По существу, лазерные передатчики на основе 2-х гармоник излучения перестраиваемых импульсных ТЕА-CO₂-лазеров можно считать достаточно эффективными для дистанционного зондирования CO при значениях $P_L = 200$ Торр. В этом случае ширина линии излучения такого передатчика даже в одномодовом режиме генерации становится сравнимой с шириной линии поглощения CO. Это приводит, как известно, к искажению результатов зондирования за счет влияния аппаратной функции лазерного источника $I(v_i - v)$ (форма контура линии излучения с центральной частотой v_i). В настоящей статье мы рассмотрим два аспекта, связанных с этой проблемой при дистанционном зондировании CO, а именно: влияние конечной ширины линии излучения лазерного передатчика, обусловленной давлением P_L , на точность определения концентрации CO и чувствительность измерительной системы.

Для конечной ширины линии лазерного излучения Δv_L значение коэффициента дифференциального поглощения $K_{эф}(\rho, z)$ можно представить в виде эффективной величины, усредненной по спектру лазерного излучения.

$$K_{эф}(\rho, z) = \frac{1}{2\rho z} \ln \frac{\int I(v_{off} - v) T^2(v, \rho, z) dv}{\int I(v_{on} - v) T^2(v, \rho, z) dv}, \quad (2)$$

где $I(v_i - v)$ – спектральное распределение мощности лазерного излучения; $T^2(v, \rho, z)$ – квадрат прозрачности среды по трассе длиной z :

$$T^2(v, \rho, z) = \exp \{-2K(v)\rho z - 2\beta(v)z\}. \quad (3)$$

Здесь $\beta(v)$ – объемный коэффициент поглощения «мешающих» газов. При записи (2) мы полагаем выполнение условий:

$$a) \eta = 1; \quad б) P_0(v_{on}) = P_0(v_{off}); \quad в) \int I(v_i - v)dv = 1.$$

Из (2) и (3) видно, что эффективный коэффициент поглощения $K_{эф}$ зависит от искомой концентрации ρ и длины трассы z , а также от мешающего поглощения, если оно не компенсируется. Зависимость $K_{эф}$ от ρ и z является следствием конечной ширины $\Delta v_{л}$ линии лазерного излучения. При $I(v_i - v) \rightarrow \delta(v_i - v)$ из (2) и (3) следует $K_{эф}(\rho, z) \rightarrow (K_{on} - K_{of}) + (\beta_{on} - \beta_{of})$ и при $K_{of} \ll K_{on}$, $\beta_{on} - \beta_{of} \ll K_{on}$ мы получим $K_{эф}(\rho, z) \rightarrow K$, т.е. приходим к классическому определению коэффициента поглощения в методе дифференциального поглощения.

Чем больше ширина линии излучения $\Delta v_{л}$, тем в большей степени $K_{эф}$ зависит от ρ и z . Впервые этот вопрос исследовался нами в [6] для трасс с распределенным отражателем.

Рассмотрим вопрос о точности определения СО из данных зондирования, обусловленной погрешностью задания коэффициента поглощения в формуле (1). В отличие от монохроматического случая эффективный коэффициент дифференциального поглощения зависит от искомой концентрации СО (см. (2) и (3)), и это вызывает неопределенности при обращении данных зондирования по формуле (1) в условиях больших вариаций СО. Большие вариации СО характерны для условий промышленного центра, когда концентрация СО может меняться более чем на два порядка: практически от фоновых значений $\sim 0,1$ ppm до значений, характеризующих сильно загрязненную городскую атмосферу ~ 10 ppm [5], особенно при залповых аварийных выбросах. Кроме того, выполненные расчеты коэффициентов поглощения СО на основе атласа спектральных данных HITRAN (версия 1991 г.) показали, что вблизи центров линий СО 2154,596 и 2086,322 см^{-1} имеется поглощение водяным паром.

На рис. 1 приведены рассчитанные горизонтальные профили эффективных значений коэффициента дифференциального поглощения СО по формулам (2) и (3) (сплошные линии) для трех значений $\rho_{CO} = 0,1; 1$ и 10 ppm для пары частот 2086,327 – 2082,558 см^{-1} . Точками показаны $K_{эф}$ с учетом мешающего поглощения H_2O . Модель атмосферы – лето средних широт [7]. Штриховой линией изображены ошибки определения $K_{эф}(z)$ без учета H_2O (или, что то же самое, систематические ошибки восстановления концентрации СО) в предположении, что наиболее типичное значение концентрации СО составляет ~ 1 ppm. Расчеты эффективных коэффициентов поглощения проводились для фойгтовского контура линии излучения с учетом уширения в $\sqrt{2}$ раза при удвоении частоты излучения. Видно, что ошибка определения $K_{эф}$ в диапазоне концентраций СО от 0,1 до 10 ppm может достигать (при $z = 6$ км и $P_{л} = 760$ Торр) 60% с учетом мешающего поглощения H_2O (кривая помечена крестиками) и 100% – без учета H_2O . С уменьшением $P_{л}$ (и соответственно, $\Delta v_{л}$) погрешность определения $K_{эф}$, естественно, уменьшается и не превышает 30% (при $P_{л} = 250$ Торр) даже без учета H_2O .

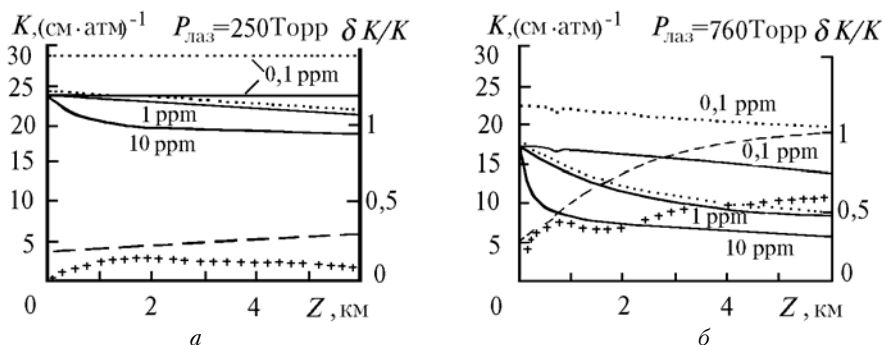


Рис. 1. Зависимости эффективного дифференциального коэффициента поглощения СО (точки и сплошные кривые) и относительной погрешности $\delta K/K$ (штриховые кривые и крестики) от длины трассы (z – длина трассы до отражателя) и среднего давления СО на трассе для пары длин волн 2086,326 – 2082,558 см^{-1} ($2 * 9P(24) - 2 * 9P(26)$). Зависимости приведены для давлений $P_{л}$, лазерной среды CO_2 -лазера: a – 250 и b – 760 Торр. Сплошные кривые и кривые из крестиков построены с учетом, точечные и штриховые – без учета селективного поглощения H_2O . (Фоновая концентрация H_2O принималась равной $1,8 \cdot 10^4$ ppm)

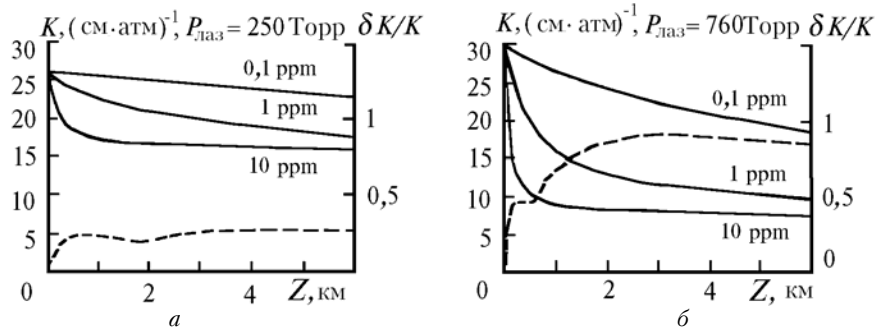


Рис. 2. Зависимости эффективного дифференциального коэффициента поглощения CO и относительной погрешности $\delta K/K$ (штриховые кривые) от длины трассы и среднего давления CO на трассе для пары длин волн $2169,270 - 2169,960 \text{ см}^{-1}$ ($2 * 9R(30) - 2 * 9R(28)$)

На рис. 2, а и 2, б представлены аналогичные результаты для пары длин волн $2169,270 - 2166,960 \text{ см}^{-1}$ ($2 * 9R(30) - 2 * 9R(28)$). Линия излучения $2 * 9R(30)$ попадает в линию поглощения CO ($2169,198 \text{ см}^{-1}$). Преимуществом этой пары является значительно меньшее (на два порядка величины) влияние мешающего поглощения, а также возможность одновременного зондирования двух загрязняющих атмосферу газов NH_3 и CO на основных частотах и вторых гармониках соответственно. Однако и здесь с увеличением P_l относительная погрешность определения $K_{\text{эф}}$ в диапазоне концентрации CO от 0,1 до 10 ppm увеличивается и достигает $\sim 85\%$ на трассе длиной 2 км при $P_l = 760$ Торр.

Таким образом, из рис. 1, 2 следует один важный вывод: если не принимать специальных мер по сужению спектра излучения (например, путем введения в оптическую схему диспергирующих элементов), то с увеличением давления лазерной смеси P_l увеличивается влияние концентрации CO и длины трассы z на эффективный коэффициент поглощения. Так, для больших ρ_{CO} величина $K_{\text{эф}}$ сначала быстро (на коротких трассах z), а затем медленно уменьшается с ростом z . При этом отличие $K_{\text{эф}}$ от квазимонохроматического коэффициента поглощения K может достигать для пары $2 * 9R(30) - 2 * 9R(28)$ (см. рис. 2) от 70 ($P_l = 250$ Торр, $\rho_{\text{CO}} = 10$ ppm) до 300% ($P_l = 760$ Торр, $\rho_{\text{CO}} = 10$ ppm).

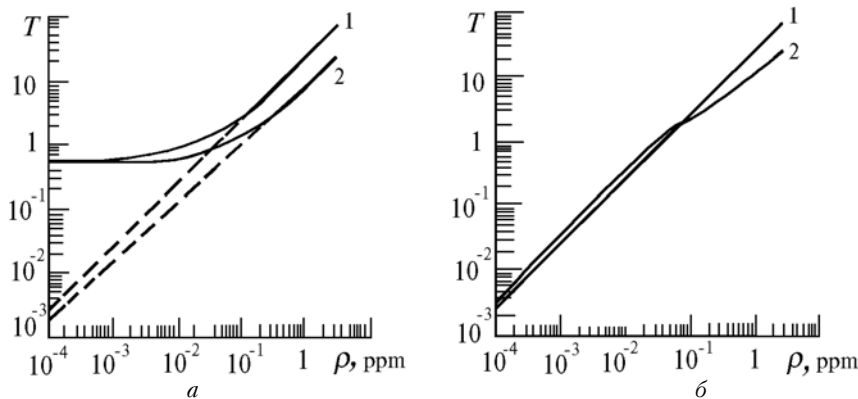


Рис. 3. Зависимость полной оптической толщины $\tau = 2K\rho z$ от концентрации CO для трассы длиной 5 км. Штриховые прямые — без учета селективного поглощения H_2O . 1— $P_l = 1$ Торр; 2— $P_l = 760$ Торр. а) пара $2 * 2P(24) - 2 * 9P(26)$; б) пара $2 * R(30) - 2 * 9R(28)$

Для устранения возникающей систематической погрешности восстановления концентрации газа ρ_{CO} из данных лазерного зондирования необходимо использовать итерационную процедуру решения уравнения

$$\rho = \frac{\tau}{2K_{\text{эф}}(\rho) z}, \quad (4)$$

где τ — измеренная оптическая толщина трассы «туда—обратно». При этом необходимо знать форму контура линии излучения зондирующих импульсов. Одним из способов решения этого уравнения является графический.

На рис. 3, а изображены рассчитанные зависимости

$$\tau(\rho_{\text{CO}}) = \ln \frac{\int I(v_{\text{off}} - v) T_{\text{off}}^2(v, \rho, z) dv}{\int I(v_{\text{on}} - v) T_{\text{on}}^2(v, \rho, z) dv} \quad (5)$$

от концентрации газа ρ_{CO} для двух значений P_{λ} , равных 1 и 760 Торр (пара $2 * 9P(26) - 2 * 9(24)$; $z = 5$ км): с учетом H_2O — сплошные и без учета — штриховые линии. Видно, что вследствие влияния мешающего поглощения H_2O кривые $\tau(\rho_{CO})$ при малых значениях «насыщаются». На рис. 3, б «насыщение» для пары $2 * 9R(30) - 2 * 9R(28)$ не наблюдается.

Представленные на рис. 3 кривые могут быть использованы для восстановления ρ_{CO} из данных зондирования. Для этого необходимо по оси ординат отложить измеренное значение τ и провести горизонтальную линию до пересечения с кривой $\tau(\rho_{CO})$. Точка пересечения дает значение искомой концентрации. Если известна ошибка измерения $\Delta\tau$ оптической толщи, то с помощью этого же графика можно найти ошибку $\Delta\rho$. Необходимо отметить здесь также, что измеренная τ может отличаться от (5) на величину $A = \frac{1}{2} \ln [P_0(v_{on})\eta_{on}/P_0(v_{off})\eta_{off}]$ (см. (1)), которая является калибровочной константой лазерной системы. При расчете τ по формуле (5) мы полагали $A = 0$. В действительности же величина A может и отличаться от нуля. В этом случае следует сверить кривые на рис. 3 с учетом A .

Рассмотрим теперь вопрос о влиянии ширины спектра излучения на чувствительность по концентрации измерительной системы. В качестве концентрационной чувствительности будем использовать минимально обнаруживаемую концентрацию (МОК) ρ_{min} . Для определения МОК часто используют формулу [5]

$$\rho_{min} = \frac{0,02}{2Kz} \quad (6)$$

в которой принято значение минимально детектируемого логарифма отношения сигналов, равное 0,02, что характерно согласно [5] для большинства систем цифровой регистрации и обработки данных. Прежде чем применять эту формулу, установим границы применимости (6). Нетрудно показать, что (6) справедлива: а) при отсутствии влияния мешающего поглощения; б) при условии, что K не зависит от ρ и τ . Приведенные выше результаты на рис. 1, 3, а для пары $2 * 9P(26) - 2 * 9P(24)$ показывают существенное влияние мешающего поглощения H_2O , поэтому для указанной пары условие «а» не выполнено. Этот факт наглядно демонстрируется рис. 3, а, на котором оптическая толщина при малых ρ_{CO} «насыщается». Если (6) переписать в форме

$$\rho_{min} = \frac{\tau_{min}}{2Kz} \quad (6a)$$

то из (6) и (6a) мы получим $\tau_{min} = 0,02$, т.е. минимально обнаруживаемая оптическая толщина составляет 0,02, в то время как τ при малых значениях ρ_{CO} на рис. 3, а не может быть меньше чем $\sim 0,5$. Условие «б» выполняется строго лишь при использовании лазерного измерения с очень узким спектром ($\Delta\nu_{\lambda} \ll \gamma_0$, где γ_0 — ширина линии поглощения). В этом случае на графике $\tau(\rho)$, откладывая $\tau_{min} = 0,02$, получим ρ_{min} . Так, для пары $2 * 9R(30) - 2 * 9R(28)$ при $\Delta\nu_{\lambda} \ll \gamma_0$ (кривая 1 на рис. 3, б) $\rho_{min} \sim 6 \cdot 10^{-4}$ ppm. В случае $\Delta\nu_{\lambda} \sim \gamma_0$ условие «б» нарушается и критерии (6) будет давать искаженные оценки МОК, причем искажение может быть как в сторону занижения ρ_{min} , так и в сторону завышения.

В связи со сказанным воспользуемся более строгим критерием оценки МОК, развитым в [8, 9]. Для рассматриваемой схемы эксперимента МОК оценивается из соотношений

$$L = B[\bar{T}^2(\rho = 0) - \bar{T}^2(\rho)] \geq L_0; \quad (7)$$

$$B = \frac{P_{off} \eta}{[\sigma_{on}^2 + \sigma_{off}^2 \eta^2 \bar{T}^2(\rho = 0) + \sigma_{\eta}^2 P_{off}^2 \bar{T}^2(\rho = 0)]^{1/2}}; \quad (8)$$

$$\bar{T}^2 = \frac{\int I(v_{on} - v) e^{-2\beta_{on}(v)z} e^{-2K_{on}(v)\rho z} dv}{\int I(v_{off} - v) e^{-2\beta_{off}(v)z} e^{-2K_{off}(v)\rho z} dv} \quad (9)$$

Величина L имеет смысл информационного расстояния в пространстве искомого параметра ρ ; B представляет собой обобщенный показатель отношения сигнал/шум; \bar{T}^2 — квадрат прозрачности среды на трассе длиной z для заданной пары частот ν_{on}, ν_{off} , $\eta = P_0(\nu_{on})\eta_{on}/P_0(\nu_{off})\eta_{off}$ — калибровочная константа измерительной системы; β_{on}, β_{off} — коэффициенты мешающего поглощения в линии и вне линии поглощения; $\sigma_{on}, \sigma_{off}, \sigma_{\eta}$ — погрешности измерения сигналов P_{on}, P_{off} и константы системы η .

Критерий (7) имеет вероятностный смысл, заключающийся в том, что для найденной из (7) концентрации газа можно указать вероятность того, что прибор «почувствует» газ при этой концентрации ρ .

$$P = \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{L}{2\sqrt{2}} \right) \right], \quad (10)$$

где $\Phi(x)$ — интеграл ошибок ($\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$). Величину P называют также вероятностью обнаружения. При $L = 1$, $P \approx 0,7$; при $L = 2$, $P = 0,84$; при $L = 3,3$, $P = 0,95$.

Установим связь между (6) и (7). Пусть $I(\nu_l - \nu) = \delta(\nu_l - \nu)$ — дельта-функция (монохроматический случай), $\beta_{on} = \beta_{off}$. Тогда при $2K\rho z \ll 1$ из (7) получим

$$L = B[1 - e^{-2K\rho z}] \approx 2BK\rho z \geq L_0,$$

откуда

$$\rho_{min} = \rho_0 = \frac{L_0}{2BKz}, \quad (11)$$

где $K = K_{on} - K_{off}$

Если положить $L_0/B = 0,02$, то (11) переходит в (6). Тогда при $B = 50$, $L_0 = 1$ найденную из (6)) ρ_{min} можно интерпретировать как МОК, вероятность обнаружения которой составляет 0,7. Мы будем использовать пороговое значение $L_0 = 3,3$, при котором $P = 0,95$. В дальнейшем будем использовать значение $B = 100$, характеризующее более высокую точность измерений.

На рис. 4, а, б приведены результаты расчетов ρ_{min} по формулам (7)–(9) при $B = 100$ для двух пар длин волн, рассматриваемых в данной статье. Видно, что для первой пары с увеличением P_{π} чувствительность уменьшается, при этом вследствие мешающего поглощения H_2O ρ_{min} возрастает с $4 \cdot 10^{-4}$ до $6 \cdot 10^{-4}$ ppm при $P_{\pi} = 1$ Торр, $L = 1$ и с $7 \cdot 10^{-4}$ до 10^{-3} ppm при $P_{\pi} = 760$ Торр, $L = 1$. Как указывалось выше, при $L = 1$ надежность P равнялась 0,7. Если ориентироваться на более надежную оценку МОК ($P = 0,95$), то получим для ρ_{min} значения $1,7 \cdot 10^{-3}$ и $3 \cdot 10^{-3}$ ppm при $P_{\pi} = 1$ и 760 Торр соответственно.

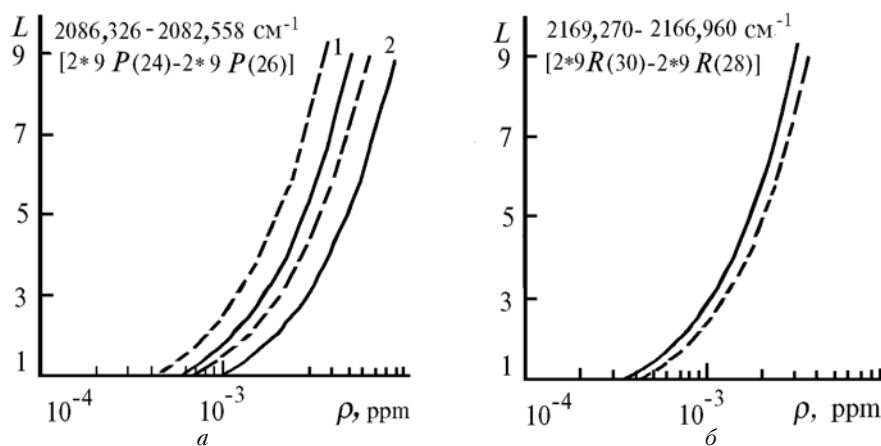


Рис. 4. Зависимость информационного расстояния L от концентрации CO для трассы длиной 5 км. Штриховые кривые — $P_{\pi} = 1$ Торр; сплошные — $P_{\pi} = 760$ Торр. 1 — без учета H_2O ; 2 — с учетом H_2O . а) пара $2 * 9P(24) - 2 * 9P(28)$; б) пара $2 * 9R(30) - 2 * 9R(28)$

Для второй пары мешающее поглощение отсутствует, а уширение спектра излучения сказывается в значительно меньшей степени на оценку МОК, при этом в отличие от первой пары наблюдается обратная ситуация, т.е. с увеличением $\Delta\nu_l$ величина ρ_{min} убывает (чувствительность увеличивается). Это объясняется тем, что линия излучения $\nu_{on} = 2169, 270$ cm^{-1} смещена относительно линии поглощения CO на $0,072$ cm^{-1} (порядка полуширины γ_0 линии CO).

На основании изложенного выше можно сделать следующие выводы. Во-первых, с увеличением мощности передатчика можно существенно увеличить дистанцию трассы зондирования (до 10 км), используя топографическую мишень, при этом чувствительность зондирования CO может как уменьшаться (при резонансном взаимодействии) из-за влияния аппаратурной функции лазерного источни-

ка, так и увеличиваться (при нерезонансном взаимодействии), если повышение мощности связано с простым увеличением давления активной среды ТЕА-СО₂-лазера. Во-вторых, традиционная методика обработки данных зондирования, полученных с помощью ТЕА-СО₂-лазера среднего и тем более высокого давления, может приводить к весьма значительным погрешностям определения ρ_{CO} в условиях сильных вариаций СО, характерных для атмосферы города при промышленных или транспортных выбросах. Предложенная нетрадиционная методика обработки данных требует знания спектрального состава излучения зондирующих импульсов. Подчеркнем, что описанные выше проблемы отсутствуют для когерентных лидаров на основе гетеродинного приема зондирующего излучения, поскольку в них, как известно, используются узкие стабилизированные линии излучения [10].

Следует здесь отметить, что из двух рассмотренных пар длин волн $2 * 9P(24) - 2 * 9P(26)$ и $2 * 9R(30) - 2 * 9R(28)$ вторая пара более предпочтительна по следующим признакам: а) отсутствие мешающего поглощения; б) более высокое значение дифференциального коэффициента поглощения; в) возможность использования первой гармоники пары длин волн $2 * 9R(30) - 2 * 9R(28)$ для зондирования NH₃.

В заключение укажем еще на один источник погрешности определения СО из данных зондирования с помощью ТЕА-СО₂-лазера высокого давления. С увеличением давления рабочей смеси лазера начинает расти столкновительный сдвиг линии излучения. Величина сдвига, оцененная авторами работы [11] на основе литературных данных для различных переходов *P*- и *R*-ветвей полосы 9,4 мкм, составило $0,0075 \pm 0,009 \text{ см}^{-1}$. Диапазон изменения столкновительных сдвигов может колебаться в зависимости от состава газовой смеси лазера. При удвоении частоты величина сдвига удваивается. Кроме того, центр линии поглощения СО также смещается вследствие столкновительного сдвига. Если эти сдвиги противоположных знаков, то суммарный сдвиг может оказаться весьма значительным, что неизбежно приведет к изменению эффективного коэффициента поглощения. Выполненные предварительные оценки $K_{эф}$ с учетом только сдвига линии излучения дали следующие результаты: для обеих пар максимальная погрешность расчета $K_{эф}$ достигает ~ 27% при $P_{л} = 250 \text{ Торр}$, $z = 5 \text{ км}$, $\rho_{CO} = 10 \text{ ppm}$. При $P_{л} = 760 \text{ Торр}$ погрешность расчета составляет 33 и 14% соответственно для пар $2 * 9P(24) - 2 * 9P(26)$ и $2 * 9R(30) - 2 * 9R(28)$.

1. Killenger D.F., Menyuk N., Defeo W.E. //Appl. Opt. 1980. V. 36. № 6. P. 402–405.
2. Андреев Ю.М., Воеводин В.Г., Гребенюков А.И. и др. //ЖПС. 1987. Т. 47. № 1. С. 15–20.
3. Зуев В.Е., Кабанов М.В., Андреев Ю.М. и др. //Изв. АН СССР. Сер. Физическая. 1988. Т. 52. № 6. С. 1142–1148.
4. Андреев Ю.М., Васин И.Л., Гейко П.П. и др. //Результаты комплексных экспериментов «Вертикаль-86» и «Вертикаль-87». Томск: ТНЦ СО АН СССР. 1989. С. 77–95.
5. Коллис Р.Т.Х. и Рассел П.Б. //Лазерный контроль атмосферы /Под ред. Е.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. С. 91–180.
6. Войцеховская О.К., Макушкин Ю.С., Маричев В.Н. и др. //Изв. вузов. Физика. 1977. № 1. С. 62–70.
7. Ипполитов И.И., Комаров В.С., Мицель А.А. //Спектроскопические методы зондирования атмосферы /Под ред. И.В. Самохвалова. Новосибирск: Наука, 1985. С. 4–44.
8. Мицель А.А. //Оптика атмосферы. 1992 Т. 5. № 9. С. 978–985.
9. Катаев М.Ю., Мицель А.А. //Оптика атмосферы, 1992. Т. 5. № 9. С. 986–994.
10. Мензис Р.Т. //Лазерный контроль атмосферы /Под ред. Е.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. С. 345–408.
11. Борисова Н.Ф., Букова Е.С., Осипов В.М., Цуканов В.В. //Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 1. С. 60–66.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
25 июня 1992 г.

V.V. Zuev, A.A. Mitsel, I.V. Ptashnik. **On the Accuracy of Remote Sensing of the Carbon Monoxide Using the Second Harmonic of a TEA-CO₂-laser.**

Influence of a finite width of a laser pulse radiation on the effective differential absorption coefficient of CO in a long path absorption technique of measurements is investigated. It is shown that at ~1 atm pressure of a laser medium the effect of spectral averaging, if not accounted for, can result in a 10 to 100% error of the absorption coefficient determination and hence in the determination of the CO concentration. The errors in CO concentration determination that can occur due to a shift of sounding radiation line are estimated.