

К.И. Аршинов, М.К. Аршинов

## Многочастотное лазерное зондирование нагретой газовой смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2$ -влияние горячих переходов молекулы $\text{CO}_2$

**Введение.** Измеряя спектральное распределение коэффициентов поглощения на линиях генерации перестраиваемого  $\text{CO}_2$ -лазера можно определить температуру и концентрацию  $\text{CO}_2$ , входящего в состав колебательно равновесных газовых сред [1, 2]. Данная методика может быть использована для контроля содержания  $\text{CO}_2$  в продуктах сжигания топлив при их выбросе в атмосферу. Однако нагретый углекислый газ поглощает зондирующее излучение не только на колебательно-вращательных линиях основных переходов  $10^0\text{--}00^01$  и  $02^0\text{--}00^01$ , но и на перекрывающихся с ними отдельных линиях горячих переходов  $11^10\text{--}01^11$ ,  $03^10\text{--}01^11$ ,  $12^00\text{--}02^01$  [3]. Схема расположения рассматриваемых основных и горячих колебательных уровней представлена на рис. 1.

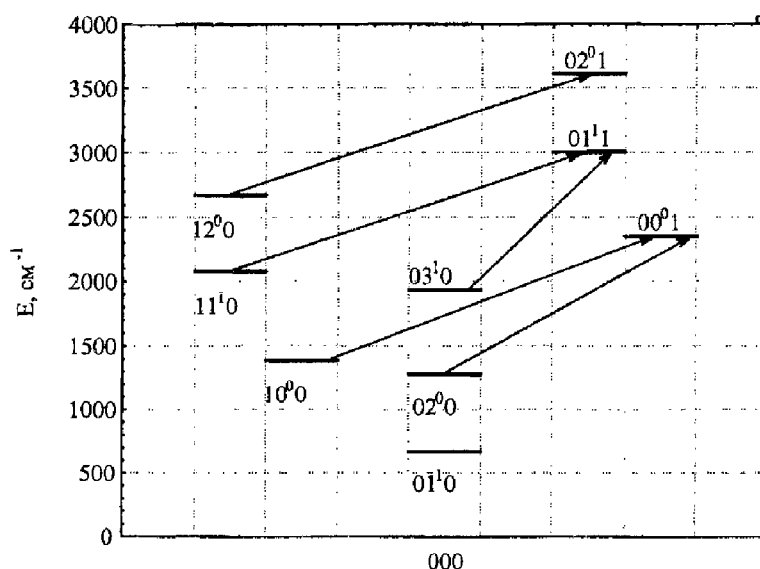


Рис. 1. Схема нижних колебательных уровней молекулы  $\text{CO}_2$ .

Стрелками показаны переходы при поглощении зондирующего излучения основными колебательными переходами молекулы  $\text{CO}_2$   $10^0\text{--}00^01$ ,  $02^0\text{--}00^01$  и горячими колебательными переходами молекулы  $\text{CO}_2$   $11^10\text{--}01^11$ ,  $03^10\text{--}01^11$ ,  $12^00\text{--}02^01$ .

Таким образом, поглощение зондирующего излучения перестраиваемого  $\text{CO}_2$ -лазера молекулами  $\text{CO}_2$  на линиях горячих переходов приводит к тому, что измеряемый спектр поглощения оказывается «искаженным» по сравнению со спектром поглощения только на основных колебательных переходах  $10^0\text{--}00^01$ ,  $02^0\text{--}00^01$ , что уменьшает точность определения искомых параметров: парциального давления  $\text{CO}_2$  ( $p_{\text{CO}_2}$ ) и температуры ( $T$ ). Исследование воз-

возможностей методики многочастотной диагностики в зависимости от количества и положения зондирующих линий показало, что данная методика может быть использована, даже если зондирование осуществляется не на всех, а только на части линий генерации перестраиваемого CO<sub>2</sub>-лазера [1, 2]. Этот результат может быть использован в случае лазерного зондирования нагретой газовой смеси CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>, когда возникает необходимость исключить из рассмотрения те зондирующие линии, которые вносят наибольший вклад в «искажение» спектрального распределения коэффициентов поглощения.

В данной работе проведен анализ результатов «искажения» спектра поглощения зондирующего излучения вкладами горячих переходов 11<sup>1</sup>0–01<sup>1</sup>1, 03<sup>1</sup>0–01<sup>1</sup>1 и 12<sup>0</sup>0–02<sup>0</sup>1 молекулы CO<sub>2</sub>, а также представлены результаты расчета влияния этих факторов на погрешности определения температуры и парциального давления CO<sub>2</sub>, входящего в состав газовой смеси CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub> при атмосферном давлении, методом многочастотного лазерного зондирования с использованием CO<sub>2</sub>-лазера, перестраиваемого по линиям основных лазерных переходов 00<sup>0</sup>1–[10<sup>0</sup>0,02<sup>0</sup>0]<sub>I,II</sub>.

**Результаты расчетов и их обсуждение.** В задаче определения парциального давления углекислого газа в атмосфере при выбросе в нее продуктов сжигания топлив методом многочастотного лазерного зондирования с использованием перестраиваемого CO<sub>2</sub>-лазера состав атмосферы можно моделировать смесью газов, основной компонентой которой, кроме молекул CO<sub>2</sub>, являются молекулы азота. В качестве источника зондирующего излучения рассматривался непрерывный CO<sub>2</sub>-лазер низкого давления с водяным охлаждением, в котором легко реализуется перестройка по линиям, имеющим большой коэффициент усиления. Этому диапазону соответствуют линии с вращательным квантовым числом  $J$  в диапазоне от 6 до 34 в каждой из четырех ветвей основных лазерных переходов 00<sup>0</sup>1–[10<sup>0</sup>0,02<sup>0</sup>0]<sub>I,II</sub>, т.е. лазер перестраивается по 60 спектральным линиям [4]. Частоты генерации такого лазера можно считать равными центральным частотам соответствующих поглощающих линий. Ненасыщенный коэффициент поглощения (КП)  $a_J(\nu)$  углекислого газа на частоте  $\nu$   $J$ -й линии колебательных переходов 10<sup>0</sup>0–00<sup>0</sup>1, 02<sup>0</sup>0–00<sup>0</sup>1 может быть представлен в виде [5]:

$$a_J(\nu) = \frac{hc^3 A_J}{4\pi\nu_{0J}^2 (k_B T)^2} p_{CO_2} g Q_V^{-1} B_{00^0 1} \left\{ \exp\left[-\frac{hc\omega_{10^0 0, 02^0 0} - hcB_{10^0 0, 02^0 0} J(J+1)}{k_B T}\right] - \exp\left[-\frac{hc\omega_{00^0 1} - hcB_{00^0 1} C_1}{k_B T}\right] \right\} F(\nu - \nu_0), \quad (1)$$

где  $J$  – вращательное квантовое число нижнего колебательного уровня рассматриваемого перехода;  $g = 2J-1$ ,  $C_1 = J(J-1)$  для линий  $P$ -ветви;  $g = 2J+3$ ,  $C_1 = (J+1)(J+2)$  для линий  $R$ -ветви;  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света;  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $\omega_{10^0 0}$ ,  $\omega_{02^0 0}$ ,  $\omega_{00^0 1}$ ,  $B_{10^0 0}$ ,  $B_{02^0 0}$ ,  $B_{00^0 1}$  [6] – волновые числа и вращательные константы колебательных уровней 10<sup>0</sup>0, 02<sup>0</sup>0, 00<sup>0</sup>1;  $\nu_0$  – центральная частота  $J$ -й линии;  $p_{CO_2}$  – парциальное давление CO<sub>2</sub>;  $A_J$  [7] – вероятность спонтанного излучения;  $F(\nu - \nu_0)$  – форм-фактор линии поглощения,  $Q_V^{-1} = [1 - \exp(-\frac{\Theta_1}{T})] \cdot [1 - \exp(-\frac{\Theta_2}{T})]^2 \cdot [1 - \exp(-\frac{\Theta_3}{T})]$  – колебательная статистическая сумма молекул CO<sub>2</sub> ( $\Theta_1=1997$  К,  $\Theta_2=960$  К,  $\Theta_3=3380$  К – характери-

ческие колебательные температуры для молекулы CO<sub>2</sub> в градусах К).

Молекулы CO<sub>2</sub> поглощают излучение CO<sub>2</sub>-лазера с частотой  $\nu_0$  на центральной частоте  $\nu_0^m$ , соответствующей линии основных переходов 10<sup>0</sup>0–00<sup>0</sup>1 или 02<sup>0</sup>0–00<sup>0</sup>1, так как  $\nu_0^m = \nu_0$ , и на частоте  $\nu_h$  линии, принадлежащей горячим переходам 11<sup>1</sup>0–01<sup>1</sup>1, 03<sup>1</sup>0–01<sup>1</sup>1 или 12<sup>0</sup>0–02<sup>0</sup>1 в случае перекрытия контуров линий этих переходов с линией генерации лазера, т.е. на частотах  $\nu_h = \nu_0$ . Задача заключается в определении для каждой линии генерации суммарного коэффициента поглощения и его сравнении с коэффициентом поглощения линией основных переходов. Контуров линий поглощения при атмосферном давлении являются лоренцевскими, или столкновительно уширенными, и для них форм-фактор в этом случае описывается известным выражением

$$F(\nu - \nu_0) = \frac{2 \cdot \Delta \nu_L}{\pi \left\{ (\Delta \nu_L)^2 + [2(\nu - \nu_0)]^2 \right\}}, \quad (2)$$

где  $\nu_0$  – центральная частота,  $\Delta \nu_L$  – столкновительная ширина линии поглощения. Выражение для столкновительной ширины линии поглощения молекулы CO<sub>2</sub> в рассматриваемой смеси может быть представлено в виде [8]

$$\Delta \nu_L = \gamma_C \cdot \left[ \frac{p_{CO_2}}{p_\Sigma} + C_{N_2} \cdot \frac{p_{N_2}}{p_\Sigma} \right] \cdot p_\Sigma \cdot \sqrt{\frac{300}{T}}, \quad (3)$$

где  $\gamma_C$  – столкновительная ширина линии поглощения в чистом CO<sub>2</sub> при давлении 1 Торр и температуре 300 К, или коэффициент столкновительного уширения линии поглощения молекулами CO<sub>2</sub>,  $C_{N_2}$  – относительный коэффициент уширения линии поглощения при столкновении молекул CO<sub>2</sub> с молекулами N<sub>2</sub>.

Из (2) следует, что выражение для форм-фактора в центре линий поглощения основных переходов ( $\nu_0^m = \nu_0$ ) имеет вид  $F_m(0) = \frac{2}{\pi \Delta \nu_L^m}$ , а для линий

горячих переходов на частоте  $\nu_h = \nu_0$  вид

$$F(\nu_h - \nu_0^h) = \frac{2 \cdot \Delta \nu_L^h}{\pi \left\{ (\Delta \nu_L^h)^2 + [2(\nu_h - \nu_0^h)]^2 \right\}}, \quad (4)$$

где  $\nu_0^h$  – центральная частота линии поглощения горячего перехода.

Для расчетов коэффициентов поглощения центральные частоты всех рассматриваемых линий, вращательные постоянные для горячих переходов 11<sup>1</sup>0–01<sup>1</sup>1, 03<sup>1</sup>0–01<sup>1</sup>1, 12<sup>0</sup>0–02<sup>0</sup>1 и энергии соответствующих колебательных уровней были взяты из [9–11]. Коэффициенты Эйнштейна  $A(J)$  и коэффициенты столкновительного уширения линий поглощения молекулами CO<sub>2</sub>  $\gamma_C(J)$  для горячих переходов считались такими же, как и для основных переходов и брались из работы [7]. Относительные коэффициенты уширения линии поглощения при столкновении молекул CO<sub>2</sub> с молекулами N<sub>2</sub>  $C_{N_2}$  были взяты из работы [12] и также предполагались одинаковыми для основных и горячих переходов.

При давлениях  $p_{CO_2} < 100$  Торр для расчета  $\Delta \nu_L$  с достаточно высокой точностью (погрешность < 5%) можно пользоваться более простым приближенным выражением

$$\Delta v_L = \gamma_C \cdot C_{N_2} \cdot p_\Sigma \cdot \sqrt{\frac{300}{T}}, \quad (5)$$

т.е. выражение для КП имеет линейную зависимость от парциального давления  $CO_2$ , что дает возможность использовать метод наименьших квадратов для одновременного определения парциального давления  $CO_2$  и температуры газовой смеси аналогично тому, как в [13] по спектральному распределению коэффициента усиления определялись населенности лазерных уровней и температура активной среды  $CO_2$ -лазера. Следует отметить, что, хотя при решении обратной задачи использовалось приближение (5), входные данные рассчитывались с помощью (3).

Таким образом, измеряемое экспериментально спектральное распределение КП описывается системой уравнений типа (1), линейных относительно  $p_{CO_2}$  и нелинейных относительно  $T$ . Связь между искомыми параметрами  $\{p_{CO_2}, T\}$  и результатами измерений КП  $\hat{a}_i$  на частоте  $\nu_i$  определяется системой уравнений:

$$a_i(p_{CO_2}, T) = \hat{a}_i \pm \Delta a_i, \quad (6)$$

где  $\Delta a_i$  – абсолютная погрешность  $i$ -го измерения.

В случае отсутствия информации о погрешностях измерений для корректного определения параметров  $\{p_{CO_2}, T\}$  необходимо проводить измерения КП на большом числе линий, получать избыточную систему уравнений и решать ее относительно искомым неизвестных параметров  $\{p_{CO_2}, T\}$  так, чтобы минимизировать совокупность взвешенных квадратов погрешностей

$$Z = \sum_{i=1}^n w_i \cdot [\hat{a}_i - a_i(p_{CO_2}; T)]^2, \quad (7)$$

где  $w_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го измерения. При заданной температуре из условия  $\frac{\partial Z}{\partial p_{CO_2}} = 0$ , нетрудно получить выражение для давления  $p_{CO_2}$ , которое

соответствует минимуму функционала  $Z$ :

$$p_{CO_2} = \frac{\sum_i w_i \cdot \hat{a}_i \cdot \varphi_i}{\sum_i w_i \cdot \varphi_i^2}, \quad (8)$$

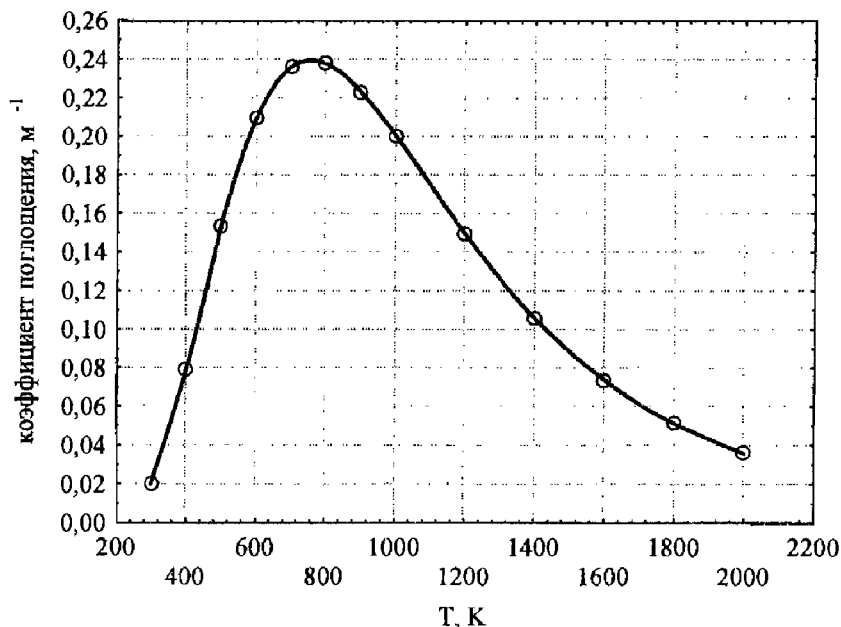
где  $\varphi_i = a_i(\nu) / p_{CO_2}$ . Алгоритм расчета состоит в том, что осуществляется сканирование по температуре с соответствующим расчетом давления по (8) и минимизируется функционал (7). Таким образом, выбирается та совокупность параметров  $\{p_{CO_2}, T\}$ , которой соответствует минимальное значение  $Z$ . Для первой итерации берутся весовые коэффициенты  $w_i^{(1)} = 1$ , а для  $(j+1)$ -й в виде [14]:

$$w_i^{(j+1)} = \frac{1}{[\hat{a}_i - a_i(p_{CO_2}^j, T^j)]^2}. \quad (8)$$

На рис. 2 представлена температурная зависимость коэффициента погло-

щения зондирующего излучения в газовой смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:9$  при  $p_\Sigma = 760$  Торр для линии R24 колебательного перехода молекулы  $\text{CO}_2$   $10^0-00^01$ . Видно, что в температурном диапазоне от 500 К до 1400 К наблюдается максимально возможное поглощение зондирующего излучения в рассматриваемой газовой смеси. При повышении температуры происходит возбуждение уровней с большей энергией и в спектре поглощения появляются «выбросы», соответствующие резонансам с горячими переходами. С повышением температуры уменьшается ширина линии поглощения (см., например, (3) и поэтому эффекты перекрытия становятся слабее. При выбросе продуктов сжигания топлив в атмосферу не ожидается, что температура образовавшейся смеси превысит  $T=1000$  К и для таких условий наблюдается наибольший вклад в показатель поглощения линий горячих переходов [15]. На этом основании температура рассматриваемой газовой смеси при расчетах была выбрана равной  $T=1000$  К.

Результаты измерений коэффициентов поглощения в такой смеси на линиях генерации перестраиваемого  $\text{CO}_2$ -лазера моделировались путем наложения гауссова шума (5% от минимального коэффициента поглощения) на рассчитанные коэффициенты поглощения.



**Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента поглощения зондирующего излучения в газовой смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:9$ ,  $p_\Sigma = 760$  Торр для линии R24 колебательного перехода молекулы  $\text{CO}_2$   $10^0-00^01$ .**

На рис. 3 представлены рассчитанные спектр поглощения только для линий основных колебательных переходов  $10^0-00^01$ ,  $02^0-00^01$  и спектр поглощения, в котором учтен вклад линий «горячих» переходов  $11^10-01^11$ ,  $03^10-01^11$ ,  $12^00-02^01$ . Наибольший вклад в поглощение излучения  $\text{CO}_2$ -лазера молекулами  $\text{CO}_2$  горячие переходы вносят на линиях, перекрывающихся с линиями основных переходов 10P14, 10P18, 10P20, 10P28, 10P34, 9P10, 9P22, 9R14, 9R24, 9R30, 9R32.

В таблице приведены результаты расчета искомых параметров  $\{p_{\text{CO}_2}, T\}$  и их относительных погрешностей  $\{\delta_p, \delta_T\}$  для случаев использования различных

наборов коэффициентов поглощения для всех зондирующих линий из области перестройки CO<sub>2</sub>-лазера и без тех зондирующих линий, которые перекрываются с соответствующими линиями горячих переходов 11<sup>1</sup>0–01<sup>1</sup>1, 03<sup>1</sup>0–01<sup>1</sup>1, 12<sup>0</sup>0–02<sup>0</sup>1. Видно, что при расчете параметров { $p_{CO_2}, T$ } исключение из рассмотрения вышеупомянутых линий приводит к снижению погрешности определения температуры  $\delta_T$  с 2.8% до 0.7% и снижению погрешности парциального давления диоксида углерода  $\delta_p$  с 6.9% до 3.5%.

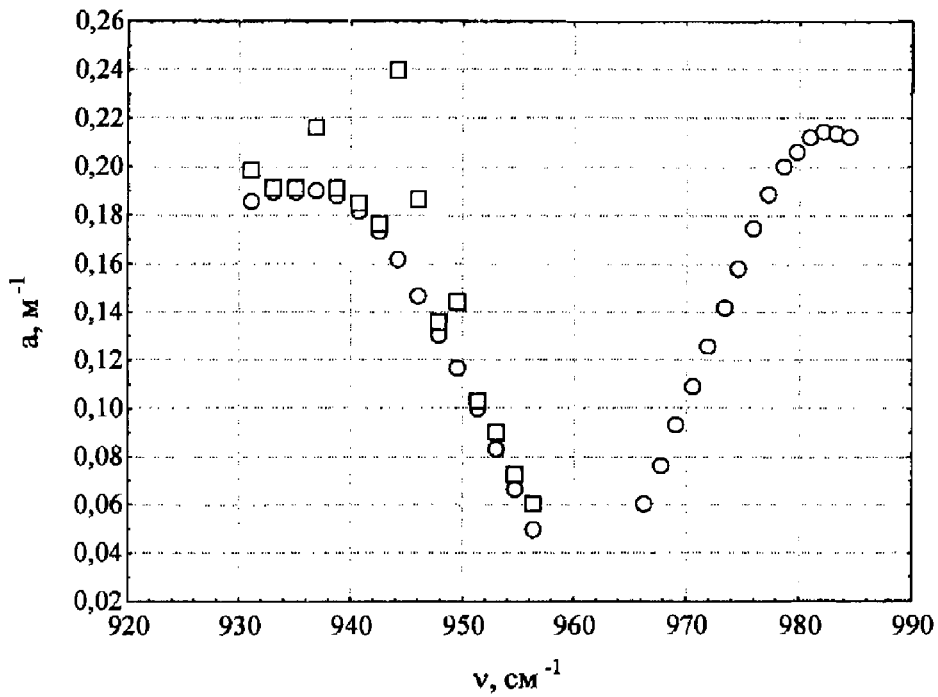
На рис. 4 представлена зависимость логарифма суммы взвешенных квадратов погрешностей  $\lg(Z)$  от парциального давления CO<sub>2</sub> ( $p_{CO_2}$ ) и температуры ( $T$ ). Рис. 4а соответствует ситуации, когда поглощение зондирующего излучения определяется основными и горячими колебательными переходами молекулы CO<sub>2</sub>, а рис. 4б соответствует случаю исключения из расчетов линий 10P14, 10P18, 10P20, 10P28, 10P34, 9P10, 9P22, 9R14, 9R24, 9R30, 9R32. В плоскости X0Y отображена эквипотенциальная контурная диаграмма сечения поверхности  $\lg(Z)$ . Из рис. 4а видно, что «искажение» спектрального распределения коэффициентов поглощения за счет горячих переходов (рис. 3) приводит к тому, что минимум поверхности  $\lg(Z)$  становится более пологим и определить искомые параметры { $p_{CO_2}, T$ } можно с большой погрешностью. Если при расчетах из рассмотрения изъять «неблагоприятные» линии, то  $\lg(Z)$  трансформируется в поверхность, обладающую более острым глобальным минимумом (см. рис. 4б) и, значит, искомые параметры будут определены с большей точностью.

Таким образом, «горячие» колебательные переходы молекулы CO<sub>2</sub> относятся к одним из основных факторов, ухудшающих точность метода многочастотного лазерного зондирования. Тем не менее, исключив из расчетов коэффициенты поглощения на 11 упомянутых колебательно-вращательных линиях можно достичь приемлемой точности метода при лазерном зондировании нагретых газовых смесей, содержащих углекислый газ.

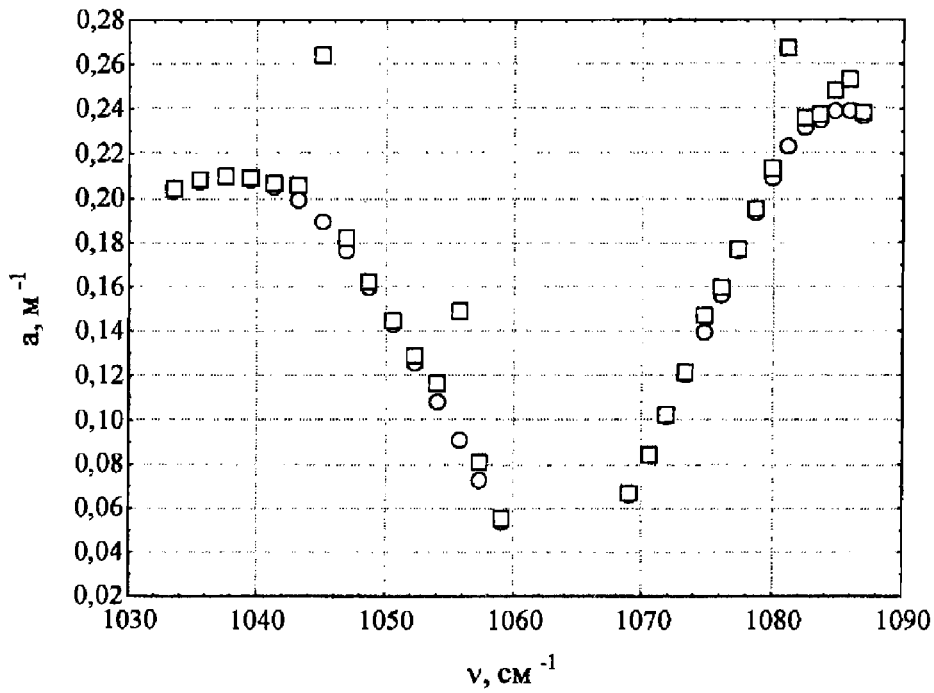
Таблица

**Результаты расчета парциального давления CO<sub>2</sub> ( $p_{CO_2}$ ) и температуры ( $T$ ) и их относительные погрешности  $\delta_T, \delta_p$**

Используемые линии поглощения	$T, K (\delta_T, \%)$	$p_{CO_2}, \text{Торр} (\delta_p, \%)$
Все линии перехода 00 <sup>0</sup> 1–[10 <sup>0</sup> 0,02 <sup>0</sup> 0] <sub>I</sub>	972.1 (2.79)	71.76 (6.9)
Линии перехода 00 <sup>0</sup> 1–[10 <sup>0</sup> 0,02 <sup>0</sup> 0] <sub>II</sub> , кроме линий P14, P18, P20, P28, P34	1021.0 (2.1)	75.26 (0.97)
Все линии перехода 00 <sup>0</sup> 1–[10 <sup>0</sup> 0,02 <sup>0</sup> 0] <sub>III</sub>	959.7 (4)	72.13 (5.1)
Линии перехода 00 <sup>0</sup> 1–[10 <sup>0</sup> 0,02 <sup>0</sup> 0] <sub>III</sub> , кроме линий P10, P22, R14, R24, R30, R32	998.3 (0.2)	74.74 (1.7)
Все линии переходов 00 <sup>0</sup> 1–[10 <sup>0</sup> 0,02 <sup>0</sup> 0] <sub>I,II</sub>	951.7 (4.8)	70.69 (7)
Линии переходов 00 <sup>0</sup> 1–[10 <sup>0</sup> 0,02 <sup>0</sup> 0] <sub>I,II,III</sub> , кроме линий 10P14, 10P18, 10P20, 10P28, 10P34, 9P10, 9P22, 9R14, 9R24, 9R30, 9R32	993.5 (0.7)	73.34 (3.5)



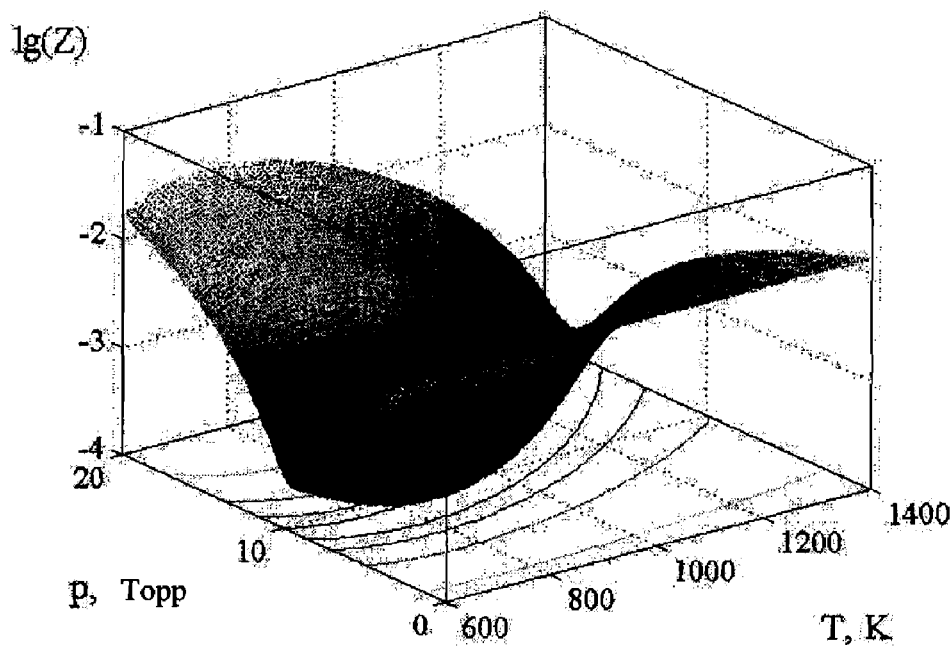
а)



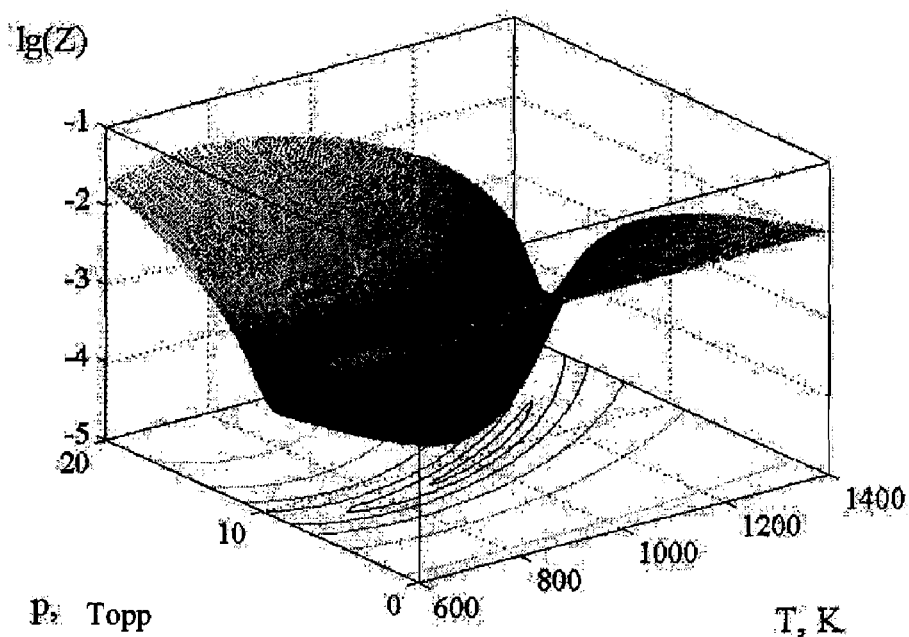
б)

Рис. 3. Спектры коэффициентов поглощения смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:9$  на линиях переходов  $10^0-00^0$  (а) и  $02^0-00^0$  (б): давление смеси  $p_{\Sigma}=760$  Торр, температура  $T=1000$  К.

○ – поглощение только на линиях основных переходов, □ – поглощение с учетом вклада горячих переходов.



а)



б)

Рис. 4. Зависимость  $\lg(Z)$  от температуры  $T$  и парциального давления  $\text{CO}_2$   $p_{\text{CO}_2}$ : а) расчет проведен для случая суммарного поглощения зондирующего излучения основными и горячими колебательными переходами молекулы  $\text{CO}_2$  (соответствует  $\square$  на рис. 3); б) при расчетах не рассматривались линии 10P14, 10P18, 10P20, 10P28, 10P34, 9P10, 9P22, 9R14, 9R24, 9R30, 9R32.

**Заключение.** При многочастотной лазерной диагностике нагретых продуктов сжигания топлив, выбрасываемых в атмосферу и содержащих молекулы  $\text{CO}_2$ , с помощью перестраиваемого  $\text{CO}_2$ -лазера следует исключить измерения коэффициентов поглощения на линиях P14, P18, P20, P28, P34 перехода  $[10^0 0,02^0 0] \rightarrow 00^0 1$ , а также на линиях P10, P22, R14, R24, R30 и R32 перехода  $[10^0 0,02^0 0] \rightarrow 00^0 1$ , заметный вклад на которых могут давать отдельные линии горячих переходов. Без этих линий



метод многочастотного лазерного зондирования для рассмотренных в работе условий газовой смеси позволяет определять искомые параметры  $\{p_{CO_2}, T\}$  с достаточно высокой точностью: при 5% погрешности измерения коэффициентов поглощения погрешность определения температуры газа не хуже, чем  $\delta_T=0.7\%$  и парциального давления  $CO_2$  не хуже, чем  $\delta_p=3.5\%$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аршинов, К.И. Многочастотная диагностика колебательно равновесной  $CO_2$ -содержащей газовой смеси / К.И. Аршинов, Н.С. Лешенюк, В.В. Невдах // Журнал прикладной спектроскопии. – 2001. – Т. 68, № 6. – С. 723–728.
2. Артемьев, В.В. Диагностика колебательно равновесной  $CO_2$ -содержащей газовой смеси при атмосферном давлении / В.В. Артемьев [и др.] // Оптика и спектроскопия. – 2004. – Т. 96, № 6. – С. 1004–1008.
3. Munyee, S.A. Mixed mode contributions to absorption in  $CO_2$  at 10,6  $\mu$ . / S.A. Munyee, W.H. Christiansen // Appl. Optics. – 1973. – Vol. 12. – P. 993–996.
4. Аршинов, К.И. Перестраиваемый стабилизированный по частоте  $CO_2$  лазер «Сатурн-В» / К.И. Аршинов, Н.Г. Каблуков, Н.С. Лешенюк // Приборы и техника эксперимента. – 1991. – № 1. – С. 237–238.
5. Ельяшевич, М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия / М.А. Ельяшевич. – М.: Физматлит, 1962. – 892 с.
6. Rothman, L.S. Infrared energy levels and intensities of carbon dioxide. Part 3 / L.S. Rothman // Appl. Opt. – 1986. – Vol. 25, № 11. – P. 1795–1816.
7. Невдах, В.В. Вероятности спонтанного излучения и столкновительные ширины линий лазерных переходов  $00^0_1-[10^0_0,02^0_0]_{I,II}$  молекулы  $CO_2$  / В.В. Невдах // Квантовая электроника. – 1984. – Т. 11, № 8. – С. 1622–1627.
8. Abrams, R.L. Broadening coefficient for the P(20)  $CO_2$  laser transition / R.L. Abrams // Appl. Phys. Lett. – 1974. – Vol. 25, № 10. – P. 609–611.
9. Rothman, L.S. The HITRAN molecular spectroscopic database and HAWKS (HITRAN atmospheric workstation): 1996 edition / L.S. Rothman [et al.] // J. Quant. Spectrosc. Radioact. Transfer. – 1998. – Vol. 60. – P. 665–710.
10. Андреев, Ю.М. Лидарные системы и их оптико-электронные элементы / Ю.М. Андреев [и др.]; под ред. М.В. Кабанова. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2004. – С. 410–412.
11. Витteman, В.  $CO_2$ -лазер / В. Витteman. – М.: Мир, 1990. – С. 40–69.
12. Rosenmann, L. Accurate calculated tabulations of IR and Raman  $CO_2$  line broadening by  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $O_2$  in the 300–2400 K temperature range / L. Rosenmann [et al.] // Appl. Opt. – 1988. – Vol. 27. – P. 3902–3907.
13. Аршинов, К.И. Расчет населенностей лазерных уровней  $CO_2$  и колебательных температур по спектральному коэффициенту усиления / К.И. Аршинов, Н.С. Лешенюк, В.В. Невдах // Квантовая электроника. – 1998. – Т. 25, № 8. – С. 679–682.
14. Мудров, В.И. Методы обработки измерений / В.И. Мудров, В.Л. Кушко. – М.: Радио и связь, 1983. – 304 с.
15. Ачасов, О.В. Диагностика неравновесных состояний в молекулярных лазерах / О.В. Ачасов [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1985. – С. 53–62.

## S U M M A R Y

The article offers the analysis of the errors added by the hot transitions  $11^1_0-01^1_1$ ,  $03^1_0-01^1_1$ ,  $12^0_0-02^0_1$  of a  $CO_2$  molecule to determining the temperature and partial pressure of  $CO_2$ , which is part of the gas mixtures  $CO_2-N_2$  under atmospheric pressure, by means of multi-frequency laser probing with application of a tunable  $CO_2$ -laser on the lines of the main laser transitions  $00^0_1-[10^0_0,02^0_0]_{I,II}$ .

Поступила в редакцию 27.08.2007