

Лазерная диагностика равновесной газовой смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2$

К.И. Аршинов¹, О.Н. Крапивная¹, В.В. Невдах^{2*}

¹Институт технической акустики НАН Беларуси
210023, г. Витебск, пр. Людникова, 13, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет
220013, г. Минск, ул. Я. Коласа, 13, Беларусь

Поступила в редакцию 30.10.2013 г.

Представлены методика и результаты определения парциального давления углекислого газа и его температуры в колебательно-равновесной газовой смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2$ при давлении, обеспечивающем лоренцевский контур линий поглощения, на основании спектрального распределения ненасыщенного коэффициента поглощения на линиях генерации перехода 10^0-00^0 перестраиваемого CO_2 -лазера.

Ключевые слова: CO_2 -лазер, коэффициент поглощения, многочастотное зондирование; CO_2 laser, absorption coefficient, multifrequency probing.

Введение

Молекулы углекислого газа участвуют в глобальных процессах, протекающих на Земле, таких как фотосинтез, растворение и выделение водами Мирового океана, гниение органических веществ и сгорание органических топлив, дыхание растений. Углекислый газ, входящий в состав атмосферы, участвует также в процессах теплового баланса атмосферы и поэтому рассматривается как один из парниковых газов [1]. Считается, что рост содержания этого газа в атмосфере, вызванный хозяйственной деятельностью людей, ведет к увеличению доли теплового излучения Земли, поглощаемого атмосферой и тем самым к глобальному потеплению [2]. Контроль содержания углекислого газа в атмосфере в местах его интенсивного выброса в результате работы крупных предприятий топливно-энергетического комплекса, а также энергозатратных производств важен как для экологии, так и для разработки методов оптимизации процессов, приводящих к его образованию.

Данные по концентрации углекислого газа в газовой смеси и его температуре могут быть получены различными диагностическими методами, в том числе и оптическими. Наибольшее распространение получили методы лазерной диагностики: спектроскопия комбинационного рассеяния (см., например, [3]), КАРС-спектроскопия (см., например, [4, 5]), лазерно-индуцированная флуоресценция и абсорбционная спектроскопия (см., например, [6]), а также оптические методы, использующие собственное излучение продуктов горения (см., например, [7]).

Обеспечивая определение концентрации углекислого газа и его температуры в продуктах сгорания с высоким пространственным и временным разрешением, все эти оптические методы достаточно сложны для практического применения.

После разработки стабилизированных по частоте перестраиваемых CO_2 -лазеров стало возможным реализовать сравнительно простой метод многочастотной лазерной диагностики газовых сред, содержащих молекулы CO_2 , основанный на измерениях коэффициентов поглощения на различных колебательно-вращательных линиях молекул CO_2 . Первоначально многочастотная лазерная диагностика с использованием излучения перестраиваемых CO_2 -лазеров применялась для исследования колебательно-неравновесных молекулярных газовых сред, содержащих CO_2 , т.е. активных сред CO_2 -лазеров [8].

В работах [9, 10] была показана возможность применения этого метода и для исследований колебательно-равновесных газовых сред, содержащих молекулы CO_2 , к которым относятся и газообразные продукты сгорания углеводородных топлив. При смешении этих продуктов с атмосферой содержащиеся в них молекулы CO_2 оказываются при давлении, обеспечивающем столкновительное уширение их линий поглощения. Так как атмосфера примерно на 98% состоит из азота и кислорода, то после смешения с ней основными столкновительными партнерами молекул CO_2 оказываются именно молекулы N_2 и O_2 , для которых, как известно, коэффициенты столкновительного уширения линий поглощения CO_2 близки (см., например, [8]).

Следует отметить, что в состав газовых продуктов сгорания различных топлив могут входить и другие типы молекул, которые будут вносить свой вклад в уширение линий поглощения CO_2 .

* Константин Иванович Аршинов (itaaki@yandex.ru); Ольга Николаевна Крапивная; Владимир Владимирович Невдах (v.v.nev@bk.ru).

Среди таких молекул следует выделить молекулы H_2O , которые в образующейся газовой смеси играют двойную роль. С одной стороны, молекулы H_2O имеют линии поглощения, частично перекрывающиеся с линиями $P(24)$, $R(8)$, $R(12)$, $R(16)$, $R(20)$ колебательного перехода 10^0-00^0 молекулы CO_2 [11]. При заметном количестве молекул воды в атмосфере они будут искажать спектральное распределение коэффициента поглощения молекул CO_2 , и поэтому измерения поглощения на упомянутых линиях следует исключать. С другой стороны, молекулы H_2O являются эффективным столкновительным партнером молекул CO_2 : например, коэффициенты столкновительного уширения для линии $R(22)$ колебательного перехода 10^0-00^0 молекул CO_2 при температуре $T = 300$ К $\gamma_{CO_2-CO_2} = 103,7 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$, $\gamma_{CO_2-N_2} = 75,8 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$, $\gamma_{CO_2-H_2O} = 136,7 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ [12]. В то же время простые оценки показывают, что замена, например, 17,5 торр молекул H_2O (парциальное давление насыщающих паров воды при температуре 20 °С) в смеси с таким же количеством молекул CO_2 и с молекулами азота при суммарном давлении 760 торр на молекулы N_2 уменьшает столкновительную ширину линии поглощения $R(22)$ колебательного перехода 10^0-00^0 молекул CO_2 примерно на 1%. При увеличении парциального давления паров воды до 50 торр их замена на молекулы N_2 увеличивает погрешность до ~5%. Так как парциальное давление паров воды в атмосфере обычно меньше, то можно считать, что замена в ней молекул воды на молекулы азота не приведет к существенной ошибке в ширине линии поглощения молекул CO_2 и, следовательно, к ошибке в величине измеренного коэффициента поглощения на этой линии.

Сказанное справедливо и в отношении других молекул, входящих в состав газовой смеси, образовавшейся в атмосфере после ее смешения с продуктами сгорания топлив. С этой точки зрения такую газовую смесь можно рассматривать как бинарную смесь $CO_2:N_2$ при атмосферном давлении. И если в такой смеси измерить спектральное распределение ненасыщенного коэффициента поглощения на линиях генерации перехода 10^0-00^0 перестраиваемого CO_2 -лазера, то можно одновременно определить концентрацию диоксида углерода и температуру смеси.

В настоящей статье представлены результаты проверки возможности экспериментальной реализации методики многочастотного лазерного зондирования колебательно-равновесной газовой смеси $CO_2:N_2$ при давлениях, обеспечивающих лоренцевский контур линий поглощения.

Методика

Была применена методика определения парциального давления углекислого газа и его температуры в колебательно-равновесной газовой смеси $CO_2:N_2$ по результатам измерения спектрального распределения ненасыщенного коэффициента поглощения (КП) на частотах генерации CO_2 -лазера,

перестраиваемого по линиям основного лазерного перехода 00^0-10^0 . При использовании в качестве источника зондирующего излучения стабилизированного по максимуму контура усиления CO_2 -лазера низкого давления можно с достаточно высокой точностью считать, что измерения КП осуществляются на центральных частотах линий поглощения ν_{0j} . Выражение для КП в центре рассматриваемых линий может быть представлено в виде [13]:

$$\alpha_{nm}(\nu_0) = N_{CO_2} A_{mn} \frac{c^2}{8\pi\nu_0^2} g_m Q_V^{-1} Q_{Rm}^{-1} \left(e^{-\frac{E_n}{kT}} - e^{-\frac{E_m}{kT}} \right) F(\nu_0), \quad (1)$$

где N_{CO_2} – плотность молекул CO_2 ; A_{mn} – вероятность спонтанного излучения [14]; $Q_{Rm} = kT/2hcB_m$,

$$Q_V = \left[1 - \exp\left(-\frac{1997K}{T}\right) \right]^{-1} \left[1 - \exp\left(-\frac{960K}{T}\right) \right]^{-2} \times \\ \times \left[1 - \exp\left(-\frac{3380K}{T}\right) \right]^{-1}$$

– вращательная и колебательная статистические суммы молекулы CO_2 ; $E_n = E_{100} + B_n J(J+1)$ и $E_m = E_{001} + B_m C_1(J)$ – энергии рассматриваемых уровней с $E_{100} = 1388,3 \text{ см}^{-1}$ и $E_{001} = 2349,3 \text{ см}^{-1}$; J – вращательное квантовое число уровня 10^0 ; $B_n = 0,39018783 \text{ см}^{-1}$ и $B_m = 0,38714044 \text{ см}^{-1}$ – вращательные константы; $g_m = 2J - 1$ – вырождение уровня m и $C_1 = J(J-1)$ для линий P -ветви и $g_m = 2J + 3$, $C_1 = (J+1)(J+2)$ – для линий R -ветви; $F(\nu_0)$ – форм-фактор в центре линии поглощения.

При давлениях исследуемых смесей газов от ~50 торр до 1 атм преобладающим механизмом уширения линий поглощения молекул CO_2 является механизм уширения давлением. По нашим оценкам, величина сдвига центра линий поглощения при таких условиях намного меньше величины долговременной нестабильности частоты генерации применяемого зондирующего CO_2 -лазера. Это позволяет считать, что измерения КП проводятся на центральных частотах линий поглощения, и использовать выражение для форм-фактора в центре линий в виде

$$F_i(\nu_0) = 2/\pi \Delta\nu_{Li}, \quad (2)$$

где $\Delta\nu_{Li}$ – полная ширина i -й столкновительно-уширенной линии на ее полувысоте. Для рассматриваемой газовой смеси $CO_2:N_2$ величина $\Delta\nu_{Li}$ может быть представлена в виде [15]:

$$\Delta\nu_{Li} = \Delta\nu_{CO_2-CO_2} + \Delta\nu_{CO_2-N_2} = \gamma_{iCO_2} p_{CO_2} (1 + b_{N_2} Y) \sqrt{\frac{300}{T}}. \quad (3)$$

Здесь γ_{iCO_2} – столкновительная ширина i -й линии, обусловленная столкновениями молекул CO_2 между собой при давлении 1 торр и температуре 300 К, или коэффициент столкновительного самоуширения

для молекулы CO_2 ; $b_{\text{N}_2} = \gamma_{\text{CO}_2-\text{N}_2} / \gamma_{\text{CO}_2-\text{CO}_2}$ — относительный коэффициент столкновительного уширения линий поглощения молекул CO_2 молекулами N_2 ; p_{CO_2} , p_{N_2} — парциальные давления молекул CO_2 и N_2 в смеси соответственно; $Y = p_{\text{N}_2} / p_{\text{CO}_2}$.

При подстановке (3) в (2), а потом в (1) получается система нелинейных уравнений относительно двух величин — температуры газа T и отношения парциальных давлений компонент смеси Y , представляющих интерес для диагностической задачи. Решение этой задачи упрощается, когда $Y \gg 1$. Учитывая, что $p_{\text{CO}_2} + p_{\text{N}_2} = p$, где p — давление газовой смеси, вместо строгой формулы (3) можно использовать приближенное выражение

$$\Delta v_{Li} \approx \gamma_{i\text{CO}_2} p b_{\text{N}_2} \sqrt{300/T}, \quad (4)$$

подстановка которого в (2) и (1) приводит к системе линейных относительно p_{CO_2} и нелинейных относительно T уравнений вида (1). Для определения искоемых параметров $\{p_{\text{CO}_2}, T\}$ используется метод наименьших квадратов [16]. Связь между параметрами $\{p_{\text{CO}_2}, T\}$ и результатами измерений коэффициентов поглощения определяется фундаментальной системой уравнений

$$\bar{\alpha}_i = \alpha_i(p_{\text{CO}_2}, T) \pm \Delta \alpha_i, \quad (5)$$

где $\bar{\alpha}_i$ — измеренный коэффициент поглощения на i -й длине волны λ_i ; $\Delta \alpha_i$ — абсолютная погрешность i -го измерения коэффициента поглощения. В системе уравнений (5) помимо $\{p_{\text{CO}_2}, T\}$ неизвестными остаются погрешности $\Delta \alpha_i$, и, следовательно, система всегда не определена. При экспериментальных измерениях спектрального распределения коэффициентов поглощения мы получаем систему уравнений, в которой отсутствует информация о погрешностях измерений. Для решения такой задачи необходимо проводить измерения коэффициентов поглощения на большом числе линий, получать избыточную систему уравнений, подобную системе (5), но без величин $\Delta \alpha_i$, и решать ее относительно искоемых неизвестных параметров $\{p_{\text{CO}_2}, T\}$ так, чтобы минимизировать взвешенную совокупность квадратов отклонений (невязок)

$$Z = \sum_{i=1}^n w_i [\bar{\alpha}_i - \alpha_i(p_{\text{CO}_2}; T)]^2, \quad (6)$$

где w_i — весовой коэффициент i -го измерения.

При заданной температуре из (1) и (6) нетрудно получить выражение для давления p_{CO_2} , которое соответствует минимуму функционала Z :

$$p_{\text{CO}_2} = \frac{\sum_i w_i \bar{\alpha}_i \varphi_i}{\sum_i w_i \varphi_i^2}, \quad (7)$$

где $\varphi_i = \alpha_i(v_0) / p_{\text{CO}_2}$.

Алгоритм расчета состоит в том, что осуществляется сканирование по температуре с соответствующим расчетом давления по (7) и минимизируется функционал Z (6). Таким образом, выбирается та совокупность параметров $\{p_{\text{CO}_2}, T\}$, которой соответствует минимальное значение Z . При расчетах для первой итерации весовые коэффициенты $w_i^{(1)}$ принимаются равными единице. Для $(j+1)$ -й итерации весовые коэффициенты назначаются в виде [16]:

$$w_i^{(j+1)} = \frac{1}{[\bar{\alpha}_i - \alpha_i(p_{\text{CO}_2}^j, T^j)]^2}. \quad (8)$$

Эксперимент

На практике измерение коэффициентов поглощения продуктов сгорания топлив, содержащих молекулы CO_2 , проще всего осуществлять в местах их выброса в атмосферу, которую, как отмечалось выше, в этом случае с достаточной точностью можно рассматривать как бинарную газовую смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2$ при атмосферном давлении. Следует отметить, что из выражений (1)–(3) нетрудно получить соотношение между коэффициентами поглощения для смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2$ $\alpha_{\text{C-N}}$ и для того же количества чистого CO_2 α_{C} в случае лоренцевских контуров линий поглощения в виде

$$\alpha_{\text{C-N}} = \frac{\alpha_{\text{C}}}{1 + b_{\text{N}_2} Y}. \quad (9)$$

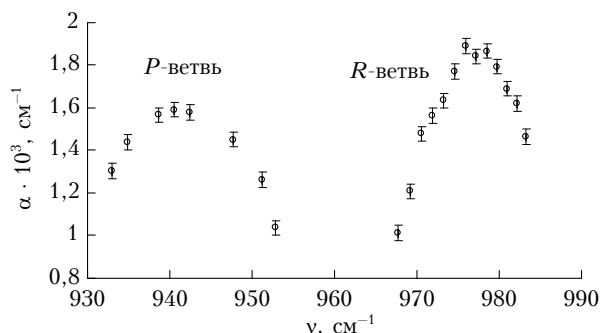
Из (9) видно, что КП одного и того же количества молекул CO_2 может быть понижен при добавлении к ним буферного газа, в частности азота, т.е. роль молекул азота для излучения CO_2 -лазера сводится к «просветлению» смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2$. Однако при проведении измерений такое снижение КП можно компенсировать увеличением длины пути зондирующего луча в смеси и повышением чувствительности приемно-усилительного тракта. В эксперименте давление и температура газовой смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2$ были выбраны нами исходя из возможностей экспериментального оборудования для наиболее точного измерения КП в смеси.

Экспериментальная установка для измерения КП в газах по двухлучевой компенсационной схеме на линиях генерации стабилизированного по частоте CO_2 -лазера, перестраиваемого по линиям основных лазерных переходов $00^0 1 - [10^0 0, 02^0 0]_{\text{I, II}}$, была подробно описана в работах [17, 18]. Долговременная нестабильность частоты генерации лазера не превышала $\pm 0,5$ МГц относительно центральной частоты линии генерации, позволяя при реализуемых экспериментально ширинах линий поглощения больше 50 МГц с достаточной точностью считать, что измерения КП проводились на центральных частотах линий поглощения. Известно, что при увеличении давления углекислого газа происходят не только уширение его колебательно-вращательных линий поглощения, но и их сдвиг. При необходимости это обстоятельство учитывается в соответствующем выражении для форм-фактора линий.

Однако при рассматриваемых в настоящей статье давлении и температуре сдвиг очень мал по сравнению с ширинами линий и обычно не учитывается, так как не приводит к заметным погрешностям при определении коэффициентов поглощения [19].

Измерительная двухпроходная кювета изготовлена из кварцевой трубы с внутренним диаметром 35 мм и длиной 1 м, к торцам которой с помощью высокотемпературного клея приклеены окна из ВаF₂. Кювета нагревается внешней нихромовой спиралью и помещена в контейнер с тепловой изоляцией. Контроль температуры осуществляется с помощью хромель-алюмелевой термопары. Система контроля и регулировки температуры позволяет нагревать стенки кюветы в диапазоне от комнатной температуры до 800 К и поддерживать ее с погрешностью $\Delta T = \pm 0,9^\circ$. Погрешность определения давления газа составляла $\Delta p = \pm 0,07$ торр. Диаметр зондирующего луча $\sim 1,5$ мм. Для приготовления газовых смесей использовались диоксид углерода чистоты 99,99% и азот чистоты 99,3%.

На рисунке представлены результаты измерений ненасыщенных коэффициентов поглощения в газовой смеси CO₂:N₂ = 1:9 на различных линиях P- и R-ветвей колебательного перехода 10⁰⁰–00⁰¹ молекулы CO₂.



Спектральное распределение ненасыщенных коэффициентов поглощения в газовой смеси CO₂:N₂ = 1:9 ($p = 100$ торр, $T = 500$ К) на линиях колебательного перехода 10⁰⁰–00⁰¹ молекулы CO₂

Из рассмотрения были исключены те спектральные линии P-ветви, которые перекрываются отдельными линиями вышележащих горячих переходов [11]. Поскольку используемая модельная газовая смесь не содержит молекул воды, не были исключены линии P(24), R(8), R(12), R(16) и R(20) колебательного перехода 10⁰⁰–00⁰¹ молекулы CO₂, которые частично перекрываются отдельными линиями молекулы H₂O [11], что позволило за счет увеличения объема входных данных повысить точность определяемых параметров.

Относительные коэффициенты столкновительного уширения линий поглощения молекулы CO₂ молекулами N₂ b_{N_2} , а также другими атомами и молекулами обычно рассматриваются в литературе как константы, не зависящие от температуры (см., например, [15, 20]). Однако тот факт, что коэффициент b_{N_2} входит в (3) как константа, по существу означает признание одинакового характера уширения

спектральной линии при взаимодействии молекул CO₂ со столкновительными партнерами, обладающими различными свойствами (CO₂–CO₂ и CO₂–N₂), что противоречит существующим представлениям о механизмах столкновительного уширения спектральных линий.

В [21] была экспериментально обнаружена температурная зависимость относительного коэффициента столкновительного уширения линии поглощения R(22) перехода 10⁰⁰–00⁰¹ молекулы CO₂ молекулами N₂ в диапазоне температур 300–700 К. Было установлено, что до температуры ~ 500 К коэффициент b_{N_2} остается практически неизменным, но при дальнейшем росте температуры наблюдается его явное увеличение. С учетом результатов работы [21], а также с целью упрощения расчетной программы при расчетах использовалась следующая модель температурной зависимости относительных коэффициентов столкновительного уширения линий поглощения $b_{N_2}(T, J)$:

$$b_{N_2} = \begin{cases} 0,74, & T < 500 \text{ К}, \\ m, & T \geq 500 \text{ К}, \end{cases}$$

$$m = \begin{cases} 0,8, & J \leq 10, \\ 0,997, & 10 < J \leq 22, \\ 0,92, & J > 22. \end{cases} \quad (10)$$

Используя представленные выше соотношения и константы при решении обратной задачи многочастотного лазерного зондирования исследуемой смеси, были получены следующие значения искомых параметров: $T = 487,7$ К, $p_{CO_2} = 11,78$ торр. Хотя для практического использования точность метода представляется приемлемой, потенциальная возможность целесообразно продолжить поиск более точных температурных моделей используемых параметров.

Следует отметить, что экспериментальная проверка предлагаемой методики многочастотной диагностики колебательно-равновесной газовой смеси CO₂:N₂ осуществлялась в контролируемых условиях на лабораторной установке с применением CO₂-лазера с ручной перестройкой по линиям генерации. Ясно, что корректное применение этой методики для диагностики атмосферы на выходе реальных сжигающих устройств предполагает использование CO₂-лазера с быстрой перестройкой по линиям генерации (см., например, [22]) для того, чтобы измерения КП на всех необходимых линиях осуществлялись в одинаковых условиях.

Заключение

В работе описана методика определения парциального давления углекислого газа и его температуры по спектральному распределению ненасыщенного коэффициента поглощения молекулами CO₂ в колебательно-равновесной газовой смеси CO₂:N₂ при давлении, обеспечивающем лоренцевский контур

линий поглощения. С помощью стабилизированного по частоте перестраиваемого CO₂-лазера измерены коэффициенты ненасыщенного поглощения в колебательно-равновесной газовой смеси CO₂:N₂ = 1:9 ($p = 100$ торр, $T = 500$ К) на линиях поглощения *P*- и *R*-ветвей колебательного перехода 10⁰⁰–00⁰¹ молекулы CO₂. На основании измеренных коэффициентов поглощения по представленной методике определены парциальное давление углекислого газа и температура газовой смеси с относительными погрешностями $\delta_p = 17,8\%$ и $\delta_T = 2,5\%$. Установлено, что точность определения парциального давления углекислого газа и температуры газовой смеси повышается, если в расчетах использовать модель температурной зависимости относительного коэффициента столкновительного уширения $b_{N_2}(T, J)$, основанной на измеренных значениях данного параметра.

1. Смирнов Б.М. Углекислый газ в атмосфере Земли // Успехи физ. наук. 1978. Т. 126, вып. 11. С. 527–530.
2. Скворцов В.А., Чудненко К.В. Термодинамическая модель эмиссии углерода в атмосфере и изменение климата // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 8. С. 688–693.
3. Лазерная аналитическая спектроскопия / Под ред. В.С. Летохова. М.: Наука, 1986. 318 с.
4. Ахманов С.А., Коротеев Н.И. Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света. М.: Наука, 1981. 544 с.
5. Верецагин К.А., Смирнов В.В., Стельмах О.М., Фабелинский В.И. КАРС-диагностика процесса горения H₂–O₂ и CH₄–O₂-смесей при высоких температурах и давлениях // Квант. электрон. 2012. Т. 42, № 1. С. 44–50.
6. Демтредер В. Лазерная спектроскопия. Основные принципы и техника эксперимента. М.: Наука, 1985. 608 с.
7. Немец В.М., Петров А.А., Соловьев А.А. Спектральный анализ неорганических газов. Л.: Химия, 1988. 240 с.
8. Ачасов О.И., Кудрявцев Н.Н., Новиков С.С., Солоухин Р.И., Фомин Н.А. Диагностика неравновесных состояний в молекулярных лазерах. Минск: Наука и техника, 1985. 208 с.
9. Аршинов К.И., Лешенюк Н.С., Невдах В.В. Многочастотная диагностика колебательно равновесной CO₂-содержащей газовой смеси // Ж. прикл. спектроскопии. 2001. Т. 68, № 6. С. 723–728.

10. Артемьев В.В., Аршинов К.И., Лешенюк Н.С., Невдах В.В. Диагностика колебательно равновесной CO₂-содержащей газовой смеси при атмосферном давлении // Оптика и спектроскопия. 2004. Т. 96, № 6. С. 1004–1008.
11. Аршинов К.И., Аршинов М.К., Невдах В.В., Perrin M.Y., Soufiani A., Яснов В.В. Точность определения температуры и парциального давления CO₂ в составе газовых смесей CO₂:N₂:H₂O:NO₂ методом многочастотного лазерного зондирования с использованием перестраиваемого CO₂-лазера // Ж. прикл. спектроскопии. 2007. Т. 74, № 6. С. 810–815.
12. Rosenmann L., Hartmann J.M., Perrin M.Y., Taine J. Accurate calculated tabulations of IR and Raman CO₂ line broadening by CO₂, H₂O, N₂, O₂ in the 300–2400 K temperature range // Appl. Opt. 1988. V. 27, N 18. P. 3902–3907.
13. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия. М.: ФМЛ, 1962. 892 с.
14. Невдах В.В. Вероятности спонтанного излучения и столкновительные ширины линий лазерных переходов 00⁰¹–[10⁰⁰, 02⁰⁰]_{ll} молекулы CO₂ // Квант. электрон. 1984. Т. 11, № 8. С. 1622–1627.
15. Abrams R.L. Broadening coefficients for the P20 CO₂ laser transition // Appl. Phys. Lett. 1974. V. 25, N 10. P. 609–611.
16. Мудров В.И., Кушко В.Л. Методы обработки измерений. М.: Радио и связь, 1983. 304 с.
17. Дударенок А.С., Лаврентьева Н.Н., Аршинов К.И., Невдах В.В. Столкновительное уширение линий CO₂ давлением N₂O // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 10. С. 858–863.
18. Аршинов К.И., Каблуков Н.Г., Тихонов Ф.В. Установка для абсорбционной диагностики нагретых газов // Приборы и техн. эксперим. 1996. № 1. С. 103–109.
19. Буланин М.О., Булычев В.П., Ходос Э.Б. Определение параметров колебательно-вращательных линий в полосах 9,4 и 10,4 мкм CO₂ при разных температурах // Оптика и спектроскопия. 1980. Т. 48, вып. 4. С. 732–737.
20. Robinson A.M., Weiss J.S. Absorption at 10 μm CO₂–He and CO₂–N₂ mixtures at elevated temperatures // Can. J. Phys. 1982. V. 60. P. 1656–1660.
21. Аршинов К.И., Аршинов М.К., Невдах В.В. О температурной зависимости столкновительных ширин линий лазерного перехода 10⁰⁰–00⁰¹ молекулы CO₂ // Квант. электрон. 2010. Т. 40, № 7. С. 629–633.
22. Якоби Ю.А. Перестройка спектра генерации лазера с помощью внутррезонаторной пространственной фильтрации // Квант. электрон. 1981. Т. 8, № 3. С. 555–564.

K.I. Arshinov, O.N. Krapivnaya, V.V. Nevдах. Laser diagnostics of equilibrium CO₂:N₂ gas mixture.

The technique and the results of the determination of the partial pressure of carbon dioxide and its temperature in a vibrationally equilibrium gas mixture CO₂:N₂ at a pressure that provides for the Lorentz contour of the absorption line and on the basis of the spectral distribution of the unsaturated absorption coefficient at lines of 10⁰⁰–00⁰¹ transition of a tunable CO₂ laser are presented.