

МНОГОЧАСТОТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ФАКЕЛА ПЛАМЕНИ ПРОПАНА С ПОМОЩЬЮ CO₂-ЛАЗЕРА

Аршинов К.И., Бобровский В.В., Крапивная О.Н., Шедьков В.В., Шут В.Н.

Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск

e-mail: itaaki@yandex.ru

Определение концентрации CO₂ и температуры в факеле пламени представляет собой достаточно сложную задачу. К недостаткам измерений температуры термопарами следует отнести инерционность и малый срок их использования в высокотемпературных агрессивных средах. Перспективными методами диагностики пламени являются оптические методы [1], но они все еще не получили широкого распространения и являются только объектами исследований [2-7]. Известно, что факел пламени углеводородных топлив это равновесная нестационарная газообразная смесь с неоднородным распределением концентраций продуктов сгорания M_i (H₂O, CO, NO_x, CO₂ и др.) и температуры как в продольном, так и радиальном направлениях распространения пламени. Многочастотная лазерная диагностика пламени с использованием перестраиваемого CO₂-лазера дает возможность получать правдоподобные квазирешения обратной задачи, если использовать корректные температурные зависимости спектральных параметров молекулы CO₂. Цель работы состоит в проведении многочастотной диагностики факела пламени пропана. В качестве источника зондирующего излучения используется стабилизированный по максимуму контура усиления перестраиваемый по линиям основного лазерного перехода 00⁰1-10⁰ CO₂-лазер. Сдвиг центра линий поглощения CO₂ в пламени был принят равным $\delta=9 \cdot 10^{-3}$ см⁻¹ [8]. Оценка доплеровского и ударного уширения линии поглощения R(22) перехода 00⁰1-10⁰ CO₂ в пламени для смеси CO₂:N₂=1:75 и T=1300 K дает следующие величины: $\Delta v_D \approx 0.0038$ см⁻¹, $\Delta v_L \approx 0.0498$ см⁻¹. Таким образом, в факеле доминирующим механизмом уширения линий поглощений CO₂ являются столкновения и форм-фактор в центре лоренцевской линии с учетом сдвига центра имеет вид

$$F_L(0) = \frac{2\Delta v_L}{\pi(\delta^2 + \Delta v_L^2)}, \quad (1)$$

где $\Delta v_L = \gamma_{CO_2-CO_2}(296K) \cdot (p_{CO_2} + \beta_{CO_2-N_2} \cdot p_{N_2}) \cdot (296/T)^n$.

Выражение для КП рассматриваемых линий может быть представлено в виде

$$\alpha_{if} = N_{CO_2} A_{fi} \frac{c^2}{8\pi v_0^2} g_f Q_V^{-1} Q_{Rf}^{-1} \left(e^{-\frac{E_i}{kT}} - e^{-\frac{E_f}{kT}} \right) F, \quad (2)$$

где индекс *i* соответствует нижнему уровню 10⁰ с энергией *E_i*, *f* – верхнему уровню 00⁰1 с энергией *E_f*; *N_{CO₂}* – концентрация молекул CO₂; *A_{fi}* – вероятность спонтанного излучения; *Q_{Rf}* – вращательная, *Q_V* – колебательная статистические суммы молекулы CO₂, соответственно; *g_f*=2*J_f*+1 – вырождение уровня *f*; *F* – форм-фактор линии поглощения.

Используя значения спектральных параметров {*A_{fi}*, *γ_{if}*, *n*} из банка данных HITRAN2012 и выражения (1) и (2) для двух условий, когда $\delta=0$ и $\delta=9 \cdot 10^{-3}$ см⁻¹ были рассчитаны спектральные распределения КП в газовой смеси CO₂:N₂=1:75 для температурного диапазона 300–2000 K (см. рис.1). Используя методику определения парциального давления CO₂ и температуры [7], были рассчитаны относительные погрешности искомых параметров δT , δp .

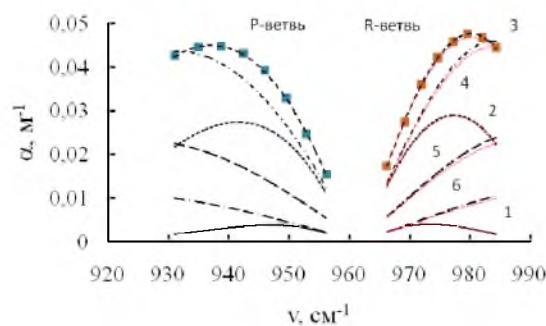


Рисунок 1 - Спектральные зависимости коэффициентов поглощения в газовой смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:75$ для температурного диапазона 300–2000 К и давления смеси $p_\Sigma=1$ атм: 1– $T=300$ К, 2–500 К, 3–700 К, 4–1000 К, 5–1500 К, 6–2000 К

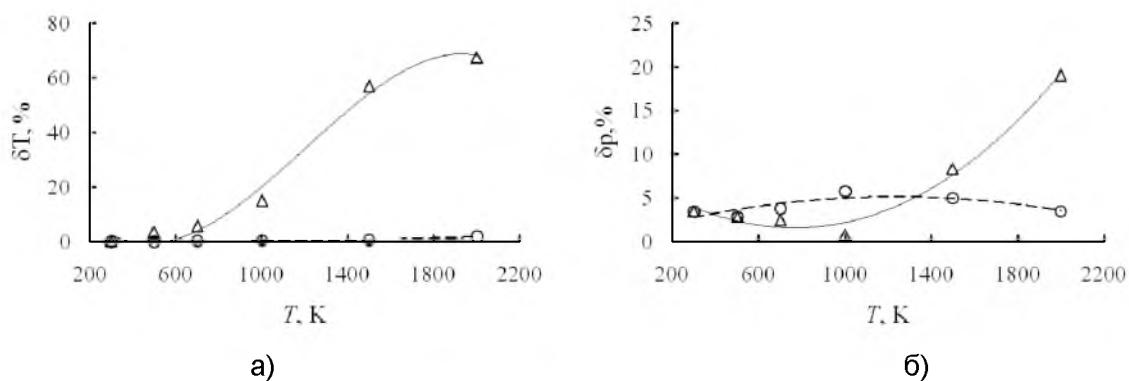


Рисунок 2 - Температурные зависимости относительных погрешностей определения температуры δT (а) и парциального давления $\text{CO}_2 \delta p$ (б) в газовой смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:75$ для температурного диапазона 300–2000 К и давления смеси $p_\Sigma=1$ атм: \circ –учтен сдвиг центра линии поглощения; Δ –сдвигом центра линии пренебрегли

На рис. 2 видно, что пренебрежение сдвигом центра линий поглощения приводит к значительным относительным погрешностям искомых параметров при высоких температурах – $\delta T > 20\%$ при $T > 1000$ К и $\delta p > 10\%$ при $T > 1500$ К.

Погрешности искомых параметров в зависимости от точности измерения КП определялись путем расчета ковариационных матриц [9, 10]. На рисунке 3 представлены температурные зависимости относительных погрешностей искомых параметров δp , δT . Расчеты были проведены для абсолютных погрешностей КП равных $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ и для 30 линий P - и R -ветвей перехода 10^00-00^1 . Видно, что рассматриваемый метод целесообразно использовать в температурном диапазоне 350–1200 К.

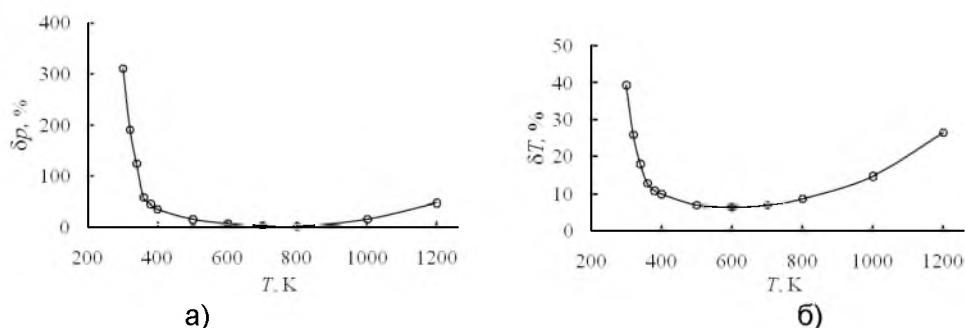


Рисунок 3 - Температурные зависимости относительных погрешностей искомых параметров $\{p, T\}$ для абсолютной погрешности КП $\Delta\alpha=2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$: а) – $\delta p=f(T)$, б) – $\delta T=f(T)$

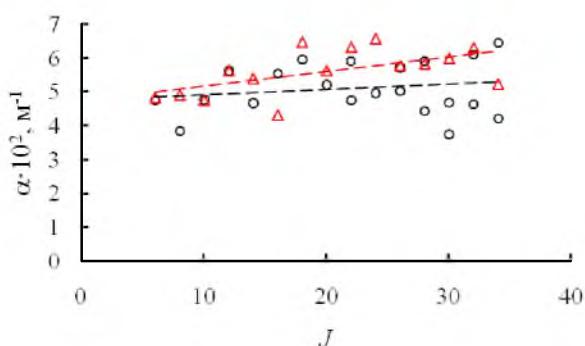


Рисунок 4 - Спектральное распределение КП в факеле пламени пропана для перехода 10^00-00^01 молекулы CO_2 : \circ – P -ветвь, Δ – R -ветвь

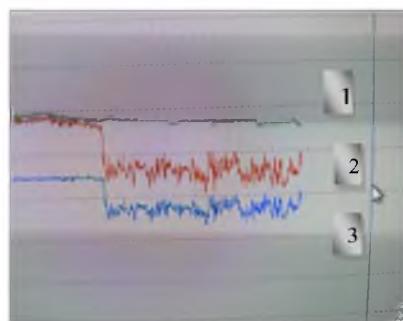


Рисунок 5 - Осциллограмма сигналов опорного 1, приемного 2 каналов и сигнала коэффициента поглощения 3

Контроль температуры пламени осуществлялся с помощью платинородий-платиновой термопары, подключенной к терморегулятору TPM500 Кл 0.25-0.5 фирмы «Овен» (Россия). Регулировка расхода газа осуществлялась с помощью ротаметра типа РМ-А-0,063Г-УЗ. При постоянном расходе газа, поступающего в горелку, сигнал 3, соответствующий коэффициенту поглощения, изменяется в пределах 50%, что указывает на нестационарный характер горения газа.

Значения коэффициентов Эйнштейна A_J и коэффициентов столкновительного самоуширения γ_J спектральных линий CO_2 при температуре $T=296$ К, необходимые для решения обратной задачи с целью определения температуры и концентрации углекислого газа, были взяты из базы данных HITRAN2012. Решение обратной задачи с использованием входных данных представленных на рис.4 дает следующие значения искомых параметров $p=6.28$ Тор, $T=1500$ К, что соответствует точности $\delta T=15\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.М. Немец, А.А. Петров, А.А. Соловьев Спектр.анал.неорг.газ. Л.: Химия, 1988. 240с.
2. К.И. Аршинов, Н.С. Лещенюк, В.В. Невдах Жур. прикл. спектр. 68, №6. 723-728 (2001).
3. А.А. Ионин, Ю.М. Климанчев, А.Ю. Козлов, А.А. Котков, О. А. Рулев, Л.В. Селезнев, Д.В.Синицын Квант. электр. 37, № 3. 231–236 (2007).
4. Е.Н. Чесноков, П.В. Кошляков, А.Г. Шмаков, О.П. Коробейничев, Д.А. Князьков, С.А. Якимов Физ. гор. и взр. 48, №4. 16-22 (2012).
5. К.А.Верещагин, В.В. Смирнов, О.М. Стельмах, В.И. Фабелинский Квант. электр. 42. №1. 44-50 (2012).
6. Д.Н. Козлов, В.Д. Кобцев, О.М. Стельмах, В.В. Смирнов, Е.В. Степанов Квант. электр. 43, № 1. 79–86 (2013).
7. К.И. Аршинов, О.Н. Крапивная, В.В. Невдах Опт. атм. и ок. 27. №5. 387-391 (2014).
8. Ю.Г. Агалаков, М.О. Буланин, В.В. Берцев, А.П. Бурцев, Ю.А. Рубинов Опт. и спектр. 58. вып.3. 493-495 (1985).
9. Герасимович А.И. Математическая статистика. Мн.: Вышэйшая школа, 1983.-279с.
10. Лещенюк Н.С., Пашкевич В.В. Жур. прикл. спектр. 46, №4. 567-573 (1987).