

# МНОГОЧАСТОТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ФАКЕЛА ПЛАМЕНИ ПРОПАНА С ПОМОЩЬЮ CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub> 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  $M_i$  (H<sub>2</sub>O, CO, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> и др.) и температуры как в продольном, так и радиальном направлениях распространения пламени. Многочастотная лазерная диагностика пламени с использованием перестраиваемого CO<sub>2</sub>-лазера дает возможность получать правдоподобные квази-решения обратной задачи, если использовать корректные температурные зависимости спектральных параметров молекулы CO<sub>2</sub>. 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 00<sup>0</sup>1-10<sup>0</sup>0 CO<sub>2</sub>-лазер. Сдвиг центра линий поглощения CO<sub>2</sub> в пламени был принят равным  $\delta \approx 9 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$  [8]. Оценка доплеровского и ударного уширения линии поглощения R(22) перехода 00<sup>0</sup>1-10<sup>0</sup>0 CO<sub>2</sub> в пламени для смеси CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>=1:75 и  $T=1300 \text{ К}$  дает следующие величины:  $\Delta \nu_D \approx 0.0038 \text{ см}^{-1}$ ,  $\Delta \nu_L \approx 0.0498 \text{ см}^{-1}$ . Таким образом, в факеле доминирующим механизмом уширения линий поглощений CO<sub>2</sub> являются столкновения и форм-фактор в центре лоренцевской линии с учетом сдвига центра имеет вид

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

где  $\Delta \nu_L = \gamma_{\text{CO}_2-\text{CO}_2}(296\text{K}) \cdot (p_{\text{CO}_2} + \beta_{\text{CO}_2-\text{N}_2} \cdot p_{\text{N}_2}) \cdot (296/T)^n$ .

Выражение для КП рассматриваемых линий может быть представлено в виде

$$\alpha_{if} = N_{\text{CO}_2} A_{fi} \frac{c^2}{8\pi \nu_0^2} g_f Q_V^{-1} Q_{Rf}^{-1} \left( e^{-\frac{E_i}{kT}} - e^{-\frac{E_f}{kT}} \right) F, \quad (2)$$

где индекс  $i$  соответствует нижнему уровню 10<sup>0</sup>0 с энергией  $E_i$ ,  $f$  – верхнему уровню 00<sup>0</sup>1 с энергией  $E_f$ ,  $N_{\text{CO}_2}$  – концентрация молекул CO<sub>2</sub>;  $A_{fi}$  – вероятность спонтанного излучения;  $Q_{Rf}$  – вращательная,  $Q_V$  – колебательная статистические суммы молекулы CO<sub>2</sub>, соответственно;  $g_f = 2J_f + 1$  – вырождение уровня  $f$ ;  $F$  – форм-фактор линии поглощения.

Используя значения спектральных параметров  $\{A_{fi}, \gamma_{fi}, n\}$  из банка данных HITRAN2012 и выражения (1) и (2) для двух условий, когда  $\delta=0$  и  $\delta=9 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$  были рассчитаны спектральные распределения КП в газовой смеси CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>=1:75 для температурного диапазона 300–2000 К (см. рис.1). Используя методику определения парциального давления CO<sub>2</sub> и температуры [7], были рассчитаны относительные погрешности искомых параметров  $\delta T$ ,  $\delta p$ .

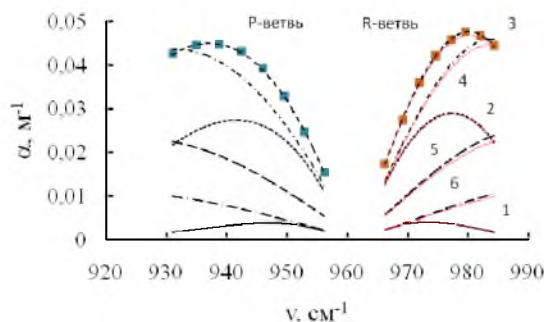


Рисунок 1 - Спектральные зависимости коэффициентов поглощения в газовой смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:75$  для температурного диапазона 300–2000 К и давления смеси  $p_{\Sigma}=1$  атм: 1– $T=300$  К, 2–500 К, 3–700 К, 4–1000 К, 5–1500 К, 6–2000 К

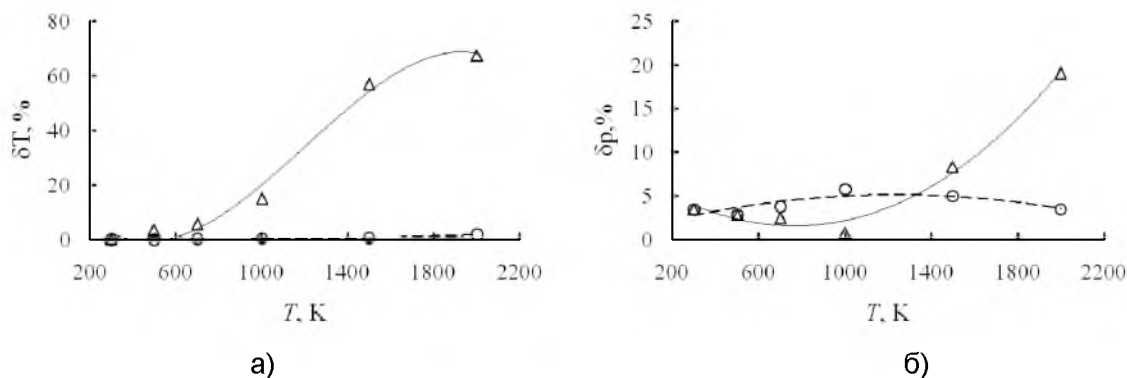


Рисунок 2 - Температурные зависимости относительных погрешностей определения температуры  $\delta T$  (а) и парциального давления  $\text{CO}_2$   $\delta p$  (б) в газовой смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:75$  для температурного диапазона 300–2000 К и давления смеси  $p_{\Sigma}=1$  атм:  $\circ$ -учтен сдвиг центра линии поглощения;  $\Delta$ - 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  $\delta p$ ,  $\delta T$ . Расчеты были проведены для абсолютных погрешностей КП равных  $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$  и для 30 линий  $P$ - и  $R$ -ветвей перехода  $10^0-00^0_1$ . Видно, что рассматриваемый метод целесообразно использовать в температурном диапазоне 350–1200 К.

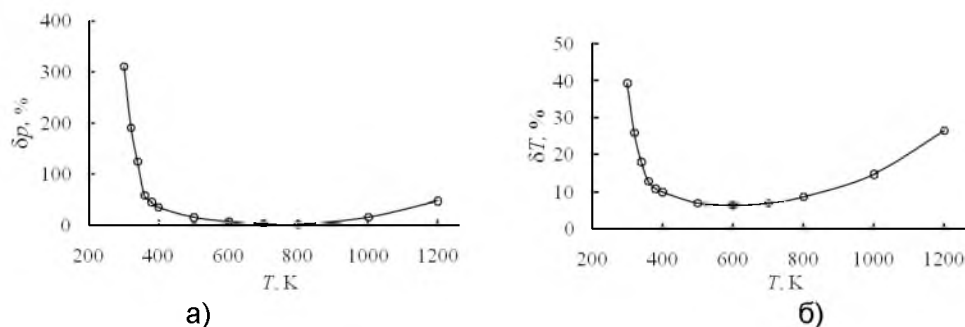


Рисунок 3 - Температурные зависимости относительных погрешностей искомых параметров  $\{p, T\}$  для абсолютной погрешности КП  $\Delta\alpha=2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ : а) –  $\delta p=f(T)$ , б) –  $\delta T=f(T)$

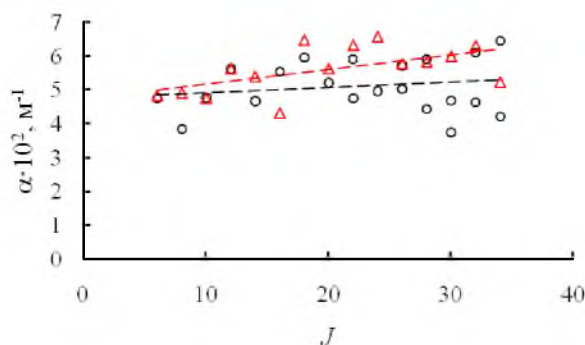


Рисунок 4 - Спектральное распределение КП в факеле пламени пропана для перехода  $10^0-00^0_1$  молекулы  $\text{CO}_2$ :  $\circ$  –  $P$ -ветвь,  $\Delta$  –  $R$ -ветвь

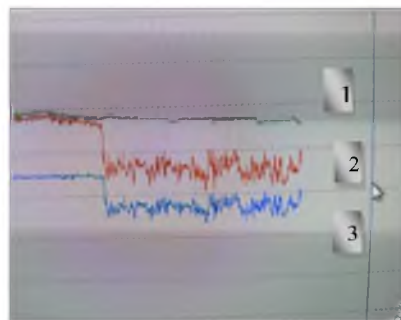


Рисунок 5 - Осциллограмма сигналов опорного 1, приемного 2 каналов и сигнала коэффициента поглощения 3

Контроль температуры пламени осуществлялся с помощью платинородий-платиновой термопары, подключенной к терморегулятору ТРМ500 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  $\gamma_J$  спектральных линий  $\text{CO}_2$  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. Лешенюк, В.В. Невдах Жур. прикл. спектр. 68, №6. 723-728 (2001).
3. А.А. Ионин, Ю.М. Климачев, 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. Лешенюк Н.С., Пашкевич В.В. Жур. прикл. спектр. 46, №4. 567-573 (1987).