

АНАЛИЗ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

Ключевые слова: топливо, продукты сгорания, спектральная полоса поглощения, коэффициент поглощения.

В рамках модели широкой полосы проанализирован спектр излучения продуктов сгорания газообразного топлива, состоящих из H₂O, CO₂ и окиси углерода CO. Модель спектра содержит двенадцать спектральных полос. Некоторые из них возникают вследствие перекрывания спектральных полос этих газов.

Keywords: fuel, combustion products, the spectral absorption band, absorption coefficient.

The model analyzed in a broad band emission spectrum of products of combustion of gaseous fuel consisting of H₂O, CO₂ and carbon monoxide CO. The model range includes twelve spectral bands. Some of them are due to the overlap of the spectral bands of these gases.

В трубчатых печах нефтехимической промышленности в качестве топлива, как правило, используются разные горючие газы. Эти газы существенно отличаются составом, теплотой сгорания и температурой горения. Природный газ, чаще остальных используемый в качестве топлива, кроме метана, содержит значительное количество более тяжелых углеводородов (пропана, бутана, бензина и т. д.). Количество сернистых соединений в них колеблется от 0 до 5%.

Для достижения полноты сгорания топливного газа необходимо обеспечить хорошее смешение газа с воздухом, сжигать газ с коэффициентом избытка воздуха $\alpha=1,05-1,15$. Это соответствует содержанию в продуктах сгорания топлива 1–3% кислорода. Несоблюдение этих условий приводит к значительным потерям тепла вследствие химической неполноты сгорания.

При выборе топливного газа большое значение имеет не только теплота сгорания, но и температура горения топлива. Максимальная температура горения топлива зависит как от теплоты сгорания, так и от количества образующихся топочных газов и их теплоемкости:

$$t_{\max} = t_0 + \frac{Q_p^H}{G \cdot c},$$

где t_0 – температура воздуха, подаваемого на горелки; Q_p^H – низшая теплота сгорания топлива;

G и c – количество продуктов сгорания и их теплоемкость. Поэтому оксид углерода CO, имеющий теплоту сгорания 12,7 МДж/м³, обладает более высокой температурой горения, чем метан с теплотой сгорания 35,7 МДж/м³.

В топочных газах содержатся азот N₂, продукты полного сгорания топлива H₂O и CO₂, а также в небольших количествах кислород O₂, оксид углерода CO и сернистые соединения. В тепловых расчетах трубчатых печей используется «серая» модель спектра излучения топочных газов или модель широкой полосы [1,2]. В этих работах радиационные свойства топочной среды определены

в предположении полного сгорания топлива, т.е. учтены спектры излучения только водяного пара H₂O и двуокиси углерода CO₂. Представляет интерес анализ спектра излучения продуктов сгорания, состоящих из H₂O, CO₂ и CO, с учетом перекрывания спектральных полос и их интенсивности. Водяной пар H₂O имеет четыре основные спектральные полосы с центрами $\lambda=10$ мкм; 6,3мкм; 2,7мкм; 1,5мкм. Спектральная полоса $\lambda=1,5$ мкм объединяет две полосы с центрами $\lambda=1,87$ мкм и $\lambda=1,38$ мкм. Двуокись углерода CO₂ имеет три спектральные полосы с центрами $\lambda=15$ мкм; 4,3мкм; 2,7мкм [3,4]. Окись углерода CO имеет две спектральные полосы с центрами $\lambda=4,67$ мкм и 2,35мкм [5].

На рис.1 представлено расположение и интенсивность спектральных полос поглощения газов H₂O, CO₂ и CO в интервале спектра от 1мкм до 3мкм при температуре T=1200К.

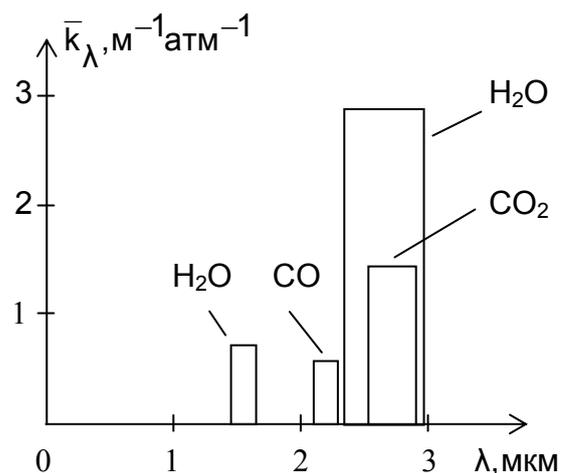


Рис. 1 – Расположение спектральных полос в области спектра от 1мкм до 3мкм

Параметры спектральных полос следующие.

Спектральная полоса $\lambda=1,5$ мкм H₂O. Центр полосы $\omega_0=6666\text{см}^{-1}$, нижняя граница $\omega_1=6321\text{см}^{-1}$, верхняя граница $\omega_2=6873\text{см}^{-1}$. Коэффициент линейного поглощения:

$$\bar{k}_\lambda = \frac{\bar{\alpha}_\lambda}{\Delta\omega} \quad (1)$$

Здесь $\Delta\omega$ – эффективная ширина спектральной полосы, коэффициент поглощения полосы $\bar{\alpha}_\lambda$ определяется по формуле:

$$\bar{\alpha}_\lambda = 20,59 \frac{T_0}{T},$$

где температура $T_0=300\text{K}$, $[\bar{\alpha}_\lambda] = \text{см}^{-2}\text{атм}^{-1}$.

Полоса $\lambda=2,35\text{мкм}$ CO . Центр полосы $\omega_0=4258\text{см}^{-1}$. Эффективная ширина полосы:

$$\Delta\omega = \Delta\omega_k + a \left(\frac{T}{1000} \right)^{0,5},$$

где $\Delta\omega_k=105\text{см}^{-1}$, $a=218\text{см}^{-1}$. Коэффициент поглощения полосы:

$$\bar{\alpha}_\lambda = 1.67 \frac{T_0}{T} \Phi(T),$$

где функция температуры имеет вид:

$$\Phi(T) = \frac{1 - \exp\left(-\frac{hc}{kT} \omega_{02}\right)}{\left[1 - \exp\left(-\frac{hc}{kT} \omega_{01}\right)\right]^2}.$$

Здесь $\frac{hc}{k} = 1,44\text{K} \cdot \text{см}$, $\omega_{01}=2143\text{см}^{-1}$, $\omega_{02}=4258\text{см}^{-1}$ – основные частоты колебаний окиси углерода CO .

Спектральная полоса $\lambda=2,7\text{мкм}$ H_2O . Центр полосы $\omega_0=3750\text{см}^{-1}$. Эффективная ширина полосы:

$$\Delta\omega = 256 \left(1 + \frac{T}{273} \right)^{0,5}.$$

Коэффициент поглощения полосы:

Спектральная полоса $\lambda=2,7\text{мкм}$ CO_2 . Центр полосы $\omega_0=3715\text{см}^{-1}$. Эффективная ширина полосы:

$$\Delta\omega = 41 + 407 \left(\frac{T}{1000} \right)^{0,5}.$$

Коэффициент поглощения полосы:

$$\bar{\alpha}_c = 18 \frac{273}{T}.$$

При температурах, характерных в радиантных камерах трубчатых печей, спектральная полоса $\lambda=2,7\text{мкм}$ H_2O полностью перекрывает аналогичную полосу CO_2 . Поэтому эти две спектральные полосы целесообразно объединить в

одну. Средний коэффициент линейного поглощения объединенной полосы определяется по формуле:

$$\bar{k}_\lambda = \bar{k}_W P_W + \bar{k}_C P_C \xi(T),$$

где P_W , P_C – парциальные давления H_2O и CO_2 .

Функция температуры $\xi(T)$ в диапазоне температур от 1000K до 2000K может быть представлена в виде зависимости [6]:

$$\xi(T) = \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_3} E_{\lambda,T} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_4} E_{\lambda,T} d\lambda} = 0,611 \left(\frac{T}{1000} \right)^{0,095}.$$

Здесь $E_{\lambda,T}$ – поверхностная плотность спектрального излучения а.ч.т., λ_1 , λ_4 – границы полосы поглощения H_2O ; λ_2 , λ_3 – границы полосы поглощения CO_2 .

Расположение и интенсивность спектральных полос $\lambda=4,3\text{мкм}$ CO_2 и $\lambda=4,67\text{мкм}$ CO при температуре $T=1200\text{K}$ в области спектра от 3мкм до 6мкм представлены на рис.2.

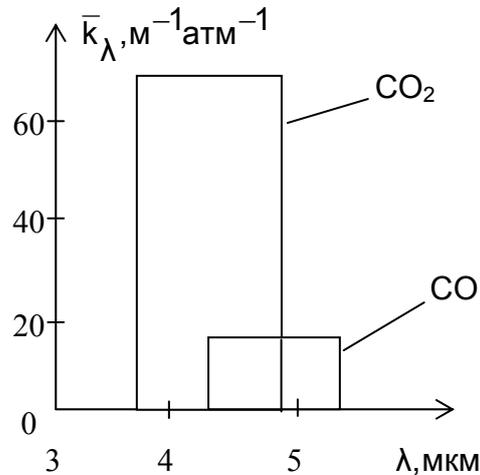


Рис. 2 – Расположение спектральных полос в области спектра от 3мкм до 6мкм

Спектральная полоса $\lambda=4,3\text{мкм}$ CO_2 . Центр полосы $\omega_0=2350\text{см}^{-1}$. Эффективная ширина полосы:

$$\Delta\omega = 49 + 396 \left(\frac{T}{1000} \right)^{0,5}.$$

Коэффициент поглощения полосы:

$$\bar{\alpha}_c = 2706 \frac{T_0}{T}.$$

Спектральная полоса $\lambda=4,67\text{мкм}$ CO . Центр полосы $\omega_0=2143\text{см}^{-1}$. Эффективная ширина полосы:

$$\Delta\omega = 438 \left(\frac{T}{1000} \right)^{0,5}$$

Коэффициент поглощения полосы:

$$\bar{\alpha}_{CO} = 237 \frac{T_0}{T} \quad (2)$$

Полосы $\lambda=4,3\text{мкм}$ CO_2 и $\lambda=4,67\text{мкм}$ CO перекрываются. Поэтому в расчетах следует выделить в отдельную спектральную полосу область перекрывания с коэффициентом линейного поглощения:

$$\bar{k}_\lambda = \frac{\bar{k}_C P_C + \bar{k}_{CO} P_{CO}}{P_C + P_{CO}},$$

где P_{CO} – парциальное давление CO ; \bar{k}_C , \bar{k}_{CO} – коэффициенты линейного поглощения CO_2 и CO , определенные по формуле (1). Нижняя и верхняя границы объединенной полосы:

$$\omega_1 = 2350 - 0,5 \left[49 + 396 \left(\frac{T}{1000} \right)^{0,5} \right];$$

$$\omega_2 = 2143 + 219 \left(\frac{T}{1000} \right)^{0,5}$$

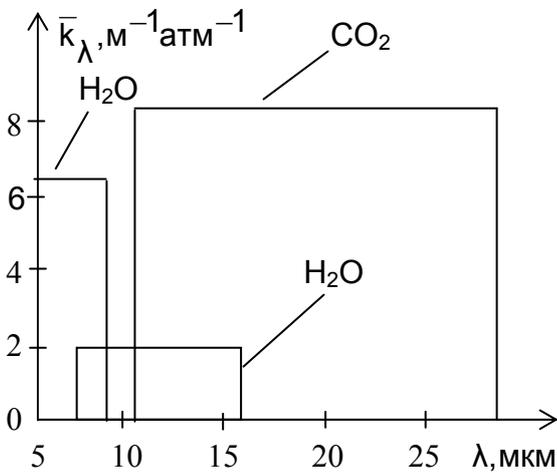


Рис. 3 – Расположение спектральных полос в области спектра 5 – 30мкм

Расположение и интенсивность спектральных полос $\lambda=6,3\text{мкм}$; 10мкм H_2O и $\lambda=15\text{мкм}$ CO_2 представлены на рис.3. Параметры полос следующие.

Спектральная полоса $\lambda=6,3\text{мкм}$ H_2O . Центр полосы $\omega_0=1600\text{см}^{-1}$. Эффективная ширина полосы:

$$\Delta\omega = 256 \left(1 + \frac{T}{273} \right)^{0,5}$$

Коэффициент поглощения полосы:

$$\bar{\alpha}_\lambda = 192,5 \frac{T_0}{T} \quad (3)$$

Спектральная полоса $\lambda=10\text{мкм}$ H_2O . Центр полосы $\omega_0=1000\text{см}^{-1}$. Эффективная ширина полосы:

$$\Delta\omega = 385 \left(\frac{T}{273} \right)^{0,5}$$

Коэффициент поглощения полосы:

$$\bar{\alpha}_\lambda = 64,2 \frac{T_0}{T} \quad (4)$$

Спектральная полоса $\lambda=15\text{мкм}$ CO_2 . Центр полосы $\omega_0=667\text{см}^{-1}$. Эффективная ширина полосы:

$$\Delta\omega = 300 \left(\frac{T}{273} \right)^{0,5}$$

Коэффициент поглощения полосы:

$$\bar{\alpha}_\lambda = 179,3 \frac{T_0}{T} \quad (5)$$

Как следует из рисунков 2 и 3, спектральные полосы $\lambda = 4,67\text{мкм}$ CO и $\lambda = 6,3\text{мкм}$ H_2O при температуре $T=1200\text{K}$, характерной продуктам сгорания в топках, перекрываются. Область перекрывания этих полос следует выделить в виде отдельной спектральной полосы. Нижняя и верхняя границы этой объединенной полосы определяются по формулам:

$$\omega_1 = 2143 - 219 \left(\frac{T}{1000} \right)^{0,5};$$

$$\omega_2 = 1600 + 128 \left(1 + \frac{T}{273} \right)^{0,5}$$

Суммарный коэффициент линейного поглощения \bar{k}_λ вычисляется по формулам (1), (2), (3) с учетом парциального давления газов и ширины полос $\Delta\omega$.

Две спектральные полосы возникают вследствие перекрывания полосой $\lambda=10\text{мкм}$ H_2O двух полос поглощения $\lambda=6,3\text{мкм}$ H_2O и $\lambda=15\text{мкм}$ CO_2 (рис.3). Параметры этих объединенных полос следующие.

Область перекрывания полос $\lambda=6,3\text{мкм}$ и $\lambda=10\text{мкм}$ H_2O . Нижняя и верхняя границы объединенной полосы:

$$\omega_1 = 1600 - 128 \left[1 + \left(\frac{T}{273} \right)^{0,5} \right];$$

$$\omega_2 = 1000 + 192,5 \left(\frac{T}{273} \right)^{0,5}.$$

Область перекрывания полос $\lambda=10\text{мкм}$ H_2O и $\lambda=15\text{мкм}$ CO_2 . Границы объединенной полосы:

$$\omega_1 = 1000 - 192,5 \left(\frac{T}{273} \right)^{0,5};$$

$$\omega_2 = 667 + 150 \left(\frac{T}{273} \right)^{0,5}.$$

Суммарный коэффициент линейного поглощения \bar{K}_λ этих объединенных полос вычисляются по формулам (1), (3) – (5).

Проведенный анализ показывает, что спектр излучения продуктов сгорания, состоящих из H_2O , CO_2 и CO , имеет достаточно сложный

характер. В приведенной модели необходимо выделить двенадцать спектральных полос, одну полосу образует «окно» прозрачности спектра излучения продуктов сгорания топлива.

Литература

1. Вафин, Д.Б. Дифференциальный метод теплового расчета топок. Д.Б. Вафин.- Казань: РИЦ «Школа», 2008.-114с.
2. Вафин, Д.Б. Д.Б Вафин, А.М.Абдуллин. Вестник Казанского технологического университета, 1, 2009.- С.90 – 96.
3. Пеннер, С.С. Количественная молекулярная спектроскопия и излучательная способность газов / С.С. Пеннер.- М: ИЛ, 1963.- 492с.
4. Edwards, D.K. Advances in Heat Transfer, New York, 12, 1979.- P.115–193.
5. Каменщиков, В.А. Радиационные свойства газов при высоких температурах / В.А.Каменщиков, Ю.А.Пластинин, В.М.Николаев, Л.А.Новицкий.- М: Машиностроение, 1971.- 440с.
6. Абдуллин, А.М. А.А.Казеннов, Р.А.Хаматгалеев, М.А.Харичко.- Казань, КХТИ: Межвуз. сб. Тепло- и массообмен в химической технологии, 1988.- С. 10–16.

© А.М. Абдуллин – канд. техн. наук, доцент кафедры физики НХТИ ФГБОУ ВПО «КНИТУ», dia.ram93@gmail.ru.