

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: $T_{\text{max}} = \frac{Q_{\text{сг}}}{V_{\text{пр}} \cdot c_p}$, где T_{max} – температура воздуха, подаваемого на горелки; $Q_{\text{сг}}$ – низшая теплота сгорания топлива; $V_{\text{пр}}$ и c_p – 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 $\lambda=10\text{мкм}$; $6,3\text{мкм}$; $2,7\text{мкм}$; $1,5\text{мкм}$. Спектральная полоса $\lambda=1,5\text{мкм}$ объединяет две полосы с центрами $\lambda=1,87\text{мкм}$ и $\lambda=1,38\text{мкм}$. Двуокись углерода CO₂ имеет три спектральные полосы с центрами $\lambda=15\text{мкм}$; $4,3\text{мкм}$; $2,7\text{мкм}$ [3,4]. Окись углерода CO имеет две спектральные полосы с центрами $\lambda=4,67\text{мкм}$ и $2,35\text{мкм}$ [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 $T=1200\text{K}$. 3 H₂O 2 CO₂ H₂O CO 1 0 1 2 3 Рис. 1 – Расположение спектральных полос в области спектра от 1мкм до 3мкм

Параметры спектральных полос следующие. Спектральная полоса $\lambda=1,5\text{мкм}$ 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: $\mu = \frac{1}{\Delta\lambda} \ln \frac{I_0}{I}$. (1) Здесь – эффективная ширина спектральной полосы, коэффициент поглощения полосы определяется по формуле: $\mu = \frac{1}{\Delta\lambda} \ln \frac{I_0}{I}$, где температура $T_0=300\text{K}$, λ – Полоса $\lambda=2,35\text{мкм}$ CO.

Центр полосы $\omega_0=4258\text{см}^{-1}$. Эффективная ширина полосы: , где $\omega_1=105\text{см}^{-1}$, $a=218\text{см}^{-1}$. Коэффициент поглощения полосы: , где функция температуры имеет вид: . Здесь , $\omega_{01}=2143\text{см}^{-1}$, $\omega_{02}=4258\text{см}^{-1}$ – основные частоты колебаний окиси углерода CO. Спектральная полоса $\lambda=2,7\text{мкм}$ H₂O. Центр полосы $\omega_0=3750\text{см}^{-1}$. Эффективная ширина полосы: . Коэффициент поглощения полосы: Спектральная полоса $\lambda=2,7\text{мкм}$ CO₂ . Центр полосы $\omega_0=3715\text{см}^{-1}$. Эффективная ширина полосы: . Коэффициент поглощения полосы: . При температурах, характерных в радиантных камерах трубчатых печей, спектральная полоса $\lambda=2,7\text{мкм}$ H₂O полностью перекрывает аналогичную полосу CO₂. Поэтому эти две спектральные полосы целесообразно объединить в одну. Средний коэффициент линейного поглощения объединенной полосы определяется по формуле: , где , – парциальные давления H₂O и CO₂. Функция температуры в диапазоне температур от 1000K до 2000K может быть представлена в виде зависимости [6]: . Здесь – поверхностная плотность спектрального излучения а.ч.т., λ_1 , λ_4 – границы полосы поглощения H₂O; λ_2 , λ_3 – границы полосы поглощения CO₂. Расположение и интенсивность спектральных полос $\lambda=4,3\text{мкм}$ CO₂ и $\lambda=4,67\text{мкм}$ CO при температуре T=1200K 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 $\lambda=4,3\text{мкм}$ CO₂ . Центр полосы $\omega_0=2350\text{см}^{-1}$. Эффективная ширина полосы: . Коэффициент поглощения полосы: . Спектральная полоса $\lambda=4,67\text{мкм}$ CO. Центр полосы $\omega_0=2143\text{см}^{-1}$. Эффективная ширина полосы: . Коэффициент поглощения полосы: . (2) Полосы $\lambda=4,3\text{мкм}$ CO₂ и $\lambda=4,67\text{мкм}$ CO перекрываются. Поэтому в расчетах следует выделить в отдельную спектральную полосу область перекрывания с коэффициентом линейного поглощения: , где – парциальное давление CO; , – коэффициенты линейного поглощения CO₂ и CO, определенные по формуле (1). Нижняя и верхняя границы объединенной полосы: CO₂ H₂O 8 6 4 H₂O 2 0 5 10 15 20 25

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

Расположение и интенсивность спектральных полос $\lambda=6,3\text{мкм}$; 10мкм H₂O и $\lambda=15\text{мкм}$ CO₂ представлены на рис.3. Параметры полос следующие. Спектральная полоса $\lambda=6,3\text{мкм}$ H₂O. Центр полосы $\omega_0=1600\text{см}^{-1}$. Эффективная ширина полосы: . Коэффициент поглощения полосы: . (3) Спектральная полоса $\lambda=10\text{мкм}$ H₂O. Центр полосы $\omega_0=1000\text{см}^{-1}$. Эффективная ширина полосы: . Коэффициент поглощения полосы: . (4) Спектральная полоса $\lambda=15\text{мкм}$ CO₂ . Центр полосы $\omega_0=667\text{см}^{-1}$. Эффективная ширина полосы: . Коэффициент поглощения полосы: . (5) Как следует из рисунков 2 и 3, спектральные полосы $\lambda=4,67\text{мкм}$ CO и $\lambda=6,3\text{мкм}$ H₂O при температуре T=1200K, 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: . Суммарный коэффициент линейного поглощения вычисляется по формулам (1), (2), (3) с

учетом парциального давления газов и ширины полос . 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: Область перекрывания полос $\lambda=10\text{мкм}$ H_2O и $\lambda=15\text{мкм}$ CO_2 . Границы объединенной полосы: Суммарный коэффициент линейного поглощения 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.