

## РАДИАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТОПОЧНЫХ ГАЗОВ ПРИ СЖИГАНИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

А.Б. ШИГАПОВ, А.В. ШАШКИН, Д.А. УСКОВ, Р.В. БУСКИН

Казанский государственный энергетический университет

*Приводятся результаты расчета спектрального коэффициента поглощения топочных газов по высоте топки.*

Более 95% тепловых потоков к парогенерирующим поверхностям в топках энергетических котлов передается радиацией – излучением высокотемпературных топочных газов. Для корректного расчета радиационного теплообмена необходимы данные по коэффициентам поглощения и методика их определения в интерактивном режиме с программными средствами.

Ниже представлены методика и результаты расчета основных радиационных свойств: коэффициента поглощения топочных газов, образующихся при сжигании природного газа. Расчеты выполнены в интервале длин волн [0 – 40] мкм поглощения теплового излучения.

Для моделирования необходимо располагать расчетными либо экспериментальными данными о распределении температуры и составе топочных газов.

Распределение температуры  $T$  и степени выгорания природного газа  $\psi$  приведены в работе [1], которые получены позонными расчетами. В данной работе использованы эти результаты (рис. 1, 2) в виде математических аппроксимаций при  $z = [0; 0,3333]$ :

$$T(z) = 560 + 5667,883 \cdot z - 48211,7 \cdot z^2 + 487440 \cdot z^3 - 1749033 \cdot z^4 + 2043201 \cdot z^5;$$

при  $z = [0,3333; 0,885]$ :

$$T(z) = -4446,857 + 72476,21 \cdot z - 329861,8 \cdot z^2 + 780168,6 \cdot z^3 - 1021608 \cdot z^4 + \\ + 701609 \cdot z^5 - 197225,7 \cdot z^6.$$

Полином для степени выгорания топлива имеет вид: в интервале  $z = [0; 0,11428]$ :

$$\psi(z) = 3,652221 \cdot 10^{-8} + 10,7915 \cdot z - 178,6206 \cdot z^2 + 785,973 \cdot z^3 - 6250,088 \cdot z^4;$$

для интервала  $z = [0,11428; 0,885]$ :

$$\psi(z) = 3,798505 \cdot 10^{-2} + 5,227544 \cdot z - 12,045336 \cdot z^2 + 12,81041 \cdot z^3 - 5,115856 \cdot z^4;$$

где  $\bar{z}$  – относительная высота топки котла, отсчитываемая от сечения горелок [1].

Принята следующая модель процессов. Топочные газы представляют смесь продуктов сгорания, с массовой долей  $\psi$ , и свежей газовоздушной смеси, с массовой долей  $(1-\psi)$  соответственно. В пределах модели принималось допущение о выполнении полного термодинамического и химического равновесия. В этом случае продукты сгорания представляют смесь компонентов, образующихся при стехиометрии, свежая ТВС – смесь газа и воздуха.

Состав продуктов сгорания получен термодинамическим расчетом с помощью программного комплекса TDSOFT, разработанного Р.Р. Назыровой [2].

© А.Б. Шигапов, А.В. Шашкин, Д.А. Усков, Р.В. Бускин

Проблемы энергетики, 2005, № 5-6

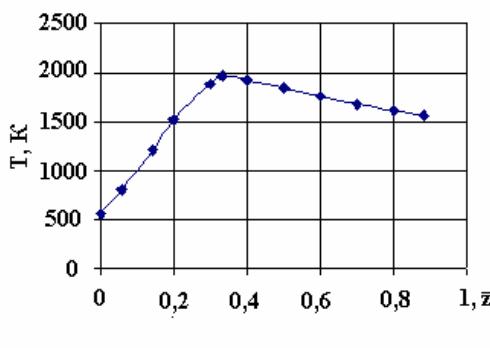


Рис.1. Зависимость температуры ядра факела по высоте топки котла

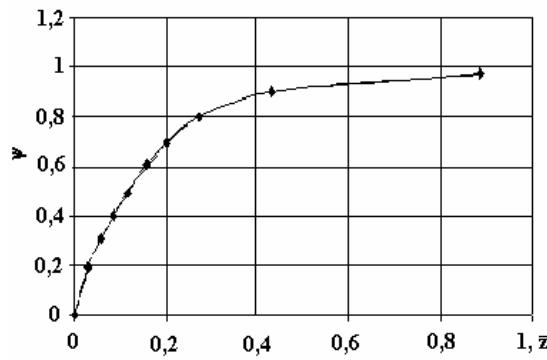


Рис.2. Степень выгорания топлива по высоте топки котла

В соответствие с заданным распределением  $T(\bar{z})$  температура газов рассчитывалась при изменении энталпии топлива на некоторую величину  $\Delta I_\Gamma$ . Значение  $\Delta I_\Gamma$  подбиралось опытным путем при выполнении вариантов термодинамических расчетов. Снижение энталпии топлива  $\Delta I_T$  учитывает естественный отвод теплоты продуктов сгорания к поверхностям парогенерирующих труб.

В результате термодинамических расчетов получают мольные (объемные) доли компонентов, среднюю молекулярную массу и плотность газов,  $\rho_{nc}$ . Следовательно, при сгорании  $\psi$  доли 1 кг топлива образуется  $V_{nc} = \psi / \rho_{nc} \text{ м}^3$  продуктов сгорания.

Определим объем не вступившей в реакцию окисления газовоздушной смеси. Возьмем для расчетов 1 моль природного газа, заданного составом в объемных долях:  $\text{CH}_4 - 0,94$ ;  $\text{N}_2 - 0,033$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6 - 0,012$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8 - 0,007$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10} - 0,004$ ;  $\text{CO}_2 - 0,002$ ;  $\text{C}_5\text{H}_{12} - 0,002$ . Условная формула горючего, записанная на молекулярную массу 1000 условных единиц,  $\text{C}_{62,345}\text{H}_{247,75}\text{O}_{0,0916}$  [3]. Мольное стехиометрическое соотношение воздуха, заданного условной формулой  $\text{N}_{53,91}\text{O}_{14,48}\text{Ar}_{0,3204}\text{C}_{0,01045}$  для условной молекулярной массы 1000, к горючему равно  $\alpha_0 = 17,2$  моль ок/моль гор. Поскольку  $\alpha_0$  рассчитано для  $\mu_{ок} = \mu_\Gamma = 1000$ , это же значение соответствует и массовому соотношению воздуха к горючему  $g_0 = G_0 / G_\Gamma = 17,2$  кг воздуха/кг горючего. Здесь  $G_0$  - масса воздуха для сжигания 1 кг природного газа при стехиометрии  $\alpha=1$  ( $G_0$  называют теоретическим расходом воздуха).

Масса газовоздушной смеси, не вступившей в реакцию горения, в расчете на 1 кг природного газа равна  $1 + \alpha g_0$ .

Объем, занимаемый свежей газовоздушной смесью, представляет сумму объемов, занятых газом и воздухом, соответственно, которые рассчитываются по соотношению

$$V_{TBC} = V_\Gamma + V_B = 1 / \rho_\Gamma + \alpha g_0 / \rho_B, \quad (1)$$

где плотности компонентов топлива определяются с учетом их нагрева до локальной температуры среды  $T_z$ ,  $\rho_i = \rho_{oi} T_0 / T_z$ .

В расчетах плотности компонентов при стандартной температуре  $T_0 = 288,15$  К приняты равными [3] для природного газа  $\rho_\Gamma = 0,7013$  и воздуха  $\rho_B = 1,1242$  кг/м<sup>3</sup>, соответственно.

Следовательно, объем не вступившей в реакцию горения (1- $\psi$ ) части 1 кг природного газа

$$V_{TBC} = (1-\psi)(1/\rho_\Gamma + \alpha g_0 / \rho_B) / (1 + \alpha g_0). \quad (2)$$

Суммарный объем продуктов сгорания свежей ТВС

$$V_\Sigma = \psi / \rho_{PC} + \frac{(1-\psi)}{(1 + \alpha g_0)} \left[ \frac{1}{\rho_{0\Gamma}} + \frac{\alpha g_0}{\rho_{0B}} \right] \frac{T_z}{288,15}. \quad (3)$$

Компонентами, имеющими полосы поглощения в продуктах сгорания, являются: H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CO, OH, NO<sub>2</sub>, NO. Поглощение остальных компонент из-за малой концентрации не учитывается. В составе свежей ТВС учитывалось только поглощение CH<sub>4</sub>.

Коэффициенты поглощения метана определялись обработкой экспериментальных данных работы [4], в которой представлены коэффициенты спектрального пропускания  $\tau$  при трех значениях температур 295,15; 669,15; 1138,15(1084,15) К: в области трех полос поглощения 7,65; 3,31; и 2,37 мкм. Эксперименты проведены при атмосферном давлении для оптической толщины кюветы  $d=7,72$  см.

Обработка выполнялась по стандартной методике, коэффициент поглощения рассчитывался по соотношению  $k_\lambda = -\ln(\tau_\lambda / d)$ .

Представляет интерес сообщение [4] о том, что термическое разложение метана при температуре 1073,15 К составляет около 3%. Факт разложения подтвержден массспектрометрическим анализом. Авторы экспериментов не учли возможное влияние на радиационные свойства температурного разложения метана ввиду малой степени термической диссоциации. В принципе, имея надежные данные по термическому разложению, нетрудно было учесть поправку на диссоциацию в виде уменьшения оптической толщины кюветы  $d=0,97d$ .

Наши расчеты термической диссоциации метана с использованием программного пакета [2] дают степень разложения близкую к экспериментальной.

Мольные объемные доли поглощающих компонентов в топочных газах, представляющих смесь продуктов сгорания и свежей ТВС, определяются по соотношениям:

- для компонентов продуктов сгорания

$$r_i = r_{0i} V_{PC} / V_\Sigma, \quad (4)$$

- для метана

$$r_{CH_4} = ((1-\psi) / \rho_\Gamma) / V_\Sigma, \quad (5)$$

где  $r_{0i}$  - мольные доли поглощающих компонентов в продуктах сгорания.

Принято также, что природный газ состоит только из метана, остальные компоненты имеют наименьшую концентрацию, менее 3%, полосы их перекрываются с полосами поглощения  $\text{CH}_4$ .

Результаты расчетов коэффициентов поглощения для различных высот топки котла представлены на рис. 3, 4. Расчеты проводились при фиксированных значениях относительной координаты по высоте топки:  $\bar{z}=0,01; 0,03; 0,05; 0,07; 0,10; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$  и температуре ядра факела  $612,32; 698,43; 773; 849; 977; 1520; 1920; 1920; 1759; 1619$  К соответственно. На графиках приведена также идентификация полос поглощения компонентов топочных газов.

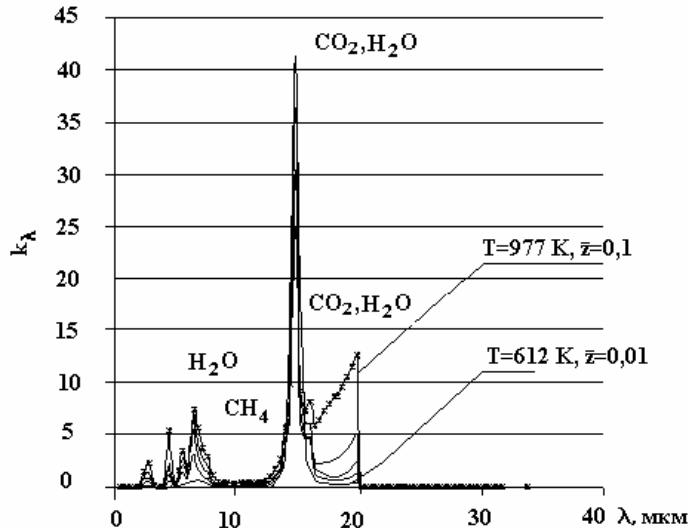


Рис.3. Спектральный коэффициент поглощения газовой смеси при различных температурах

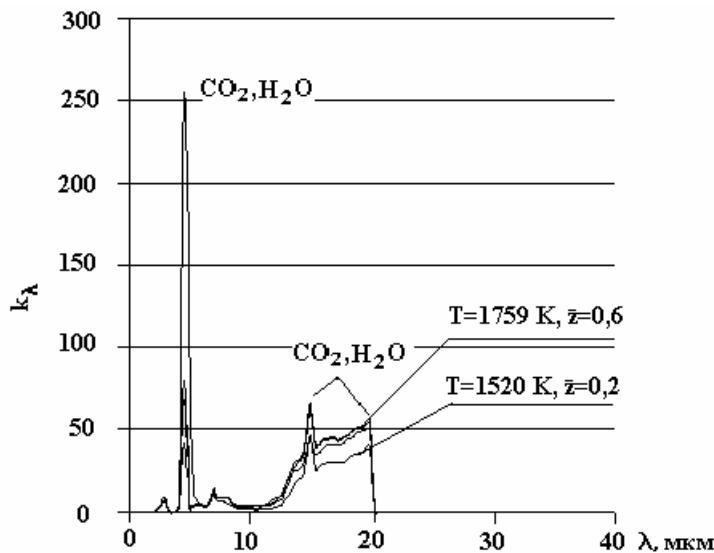


Рис. 4. Спектральный коэффициент поглощения газовой смеси при различных температурах

На начальном участке топки котла (рис. 3) наблюдается непрерывный рост спектральных коэффициентов поглощения от  $\bar{z}$  во всем диапазоне длин волн,

который вызван увеличением концентраций продуктов сгорания, следовательно, и поглощающих компонентов.

Увеличение коэффициентов поглощения происходит и при дальнейшем росте относительной высоты топки (рис. 4). Однако темп роста  $k_\lambda$  замедляется, степень выгорания топлива воздушной смеси приближается к своему максимальному значению. Результаты расчета  $k_\lambda$ , выполненные при относительных высотах  $\bar{z} = 0,6$  и  $0,8$ , соответствующих температурам 1759 и 1619, практически совпадают.

Разработанная методика расчета спектральных коэффициентов позволяет получить экспресс информацию о  $k_\lambda$  сложной смеси топочных газов. Методика реализована в программе расчета и может быть использована как самостоятельно, так и в интерактивном режиме взаимодействия с пакетом программ расчета переноса энергии излучения в высокотемпературных установках, в частности в энергетических котлах.

### Summary

*The outcomes of calculation of a spectral absorption coefficient, furnace gases on an altitude of a furnace are resulted.*

### Литература

1. Сокращение выбросов окислов азота применением трехступенчатого сжигания газа и мазута на котле ТГМ-94/ Цирульников Л.М., Васильев В.П., Соколова Я.И. и др. //Теплоэнергетика.- 1988.- №8.
2. Назырова Р.Р. Исследование операций в оценке термодинамических характеристик. – Казань: АБАК, 1998.
3. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания // Справочник ВНИТИ/Под редакцией академика В.П. Глушко, Т.З.-М: 1973.
4. Richard Lee and John Happel. Thermal Radiation of Methan Gase// I&EC Fundamentals, 1964, vol 3, No 3, pp.167-176.

Поступила 22.02.2005