

Канд. техн. наук Е.Ю. Пигида,  
докт. техн. наук Л.М. Васильев,  
м.н.с. С.В. Демченко  
(ИГТМ НАН Украины)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ УГЛЯ В КАМЕРЕ ГЕНЕРАТОРА ГАЗОВОЙ СТРУИ

Розглянуто процес термічного перетворення вугілля в камері генератору газового струменю та приведена методика розрахунку основних параметрів процесу згоряння. На прикладі розрахунку показників повного згоряння вугілля показана доцільність підігріву окислювача-повітря.

## THE RESEARCH OF THE THERMAL CONVERSION OF COAL IN GAS JET GENERATOR CHAMBER

The process of the thermal conversion of coal in gas jet generator chamber is observed and it is processed the calculation method of main parameters of the combustion. The expediency of the air-oxidant preheating is achieved for example in the index calculation of coal complete combustion.

Органическое топливо (газообразное, жидкое и твердое) широко используют в разного рода тепловых установках: топках паровых котлов паротурбинных электростанций, промышленных печах, камерах сгорания газовых турбин и воздушно-реактивных двигателей, цилиндрах поршневых двигателей внутреннего сгорания и т.д. Твердые топлива можно рассматривать с той же самой точки зрения, что и обычные жидкие и газообразные топлива. Многие характеристики процесса горения твердых топлив подобны характеристикам жидких и газообразных топлив. Однако имеются и достаточно большие различия.

Важными характеристиками процесса термического превращения топлива в камере сгорания являются количество энергии, выделяемой в результате химической реакции, и температура продуктов полного сгорания (дымовых газов) или продуктов газификации.

В работе рассматривается случай полного сгорания пылевидного угля в камере генератора газовой струи. Процесс горения в разрабатываемом устройстве следует проводить с наибольшей скоростью, потому что это позволяет создать малогабаритный генератор газовой струи с выделением при сгорании топлива большого количества тепла и с развитием высокой температуры.

Расчеты процесса горения топлива основываются на известных термо- и газодинамических зависимостях и полученном экспериментальном материале применительно к разработке метода интенсификации процесса горения и газификации твердого топлива.

Методика включает расчеты следующих тепловых, газодинамических параметров генератора газовой струи и режимов его работы:

а) теоретический расход воздуха  $V_0$ , необходимого для сгорания единицы количества топлива (1 кг для жидкого и твердого топлива) и действительный расход воздуха  $V_в$ , м<sup>3</sup>/кг;

б) объем продуктов сгорания  $V_г$ , м<sup>3</sup>/кг;

в) состав продуктов сгорания в процентах по объему при заданном коэффициенте избытка воздуха;

г) энтальпию продуктов сгорания при требующихся температурах и избытках воздуха;

д) калориметрическую температуру сгорания топлива.

Исходные данные по топливу (элементарный его состав, теплота сгорания и др.) берут на основании лабораторных анализов, а если точные анализы отсутствуют, - из справочных таблиц по топливу.

Состав твердого топлива задается в процентах по массе.

Для упрощения расчета количество серы, содержащейся в твердом топливе, присоединяют к количеству углерода. Определяемое таким способом расчетное количество углерода  $K^p$ , выраженное в процентах и называемое приведенным количеством углерода, определяется по формуле

$$K^p = C^p + 0,375S_l^p,$$

где  $C$ ,  $S$  – масса соответственно углерода и серы в топливе, %.

Индексом  $p$  обозначается рабочая масса вещества, а индексом  $l$  – летучая сера.

Если известен элементарный состав топлива, то низшая теплота сгорания твердого топлива может быть определена по формуле Д.И. Менделеева

$$Q_n^p = 339,5C^p + 1256H^p - 109(O^p - S_l^p) - 25,8(9H^p + W^p),$$

где  $Q_n^p$  - низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;  $W^p$  - влага рабочей массы топлива, %;  $H, O$  – масса соответственно водорода и кислорода в топливе, %.

Для полного сгорания топлива требуется некоторый избыток воздуха против теоретического расхода. Его можно выразить следующей формулой

$$\Delta V_\epsilon = V_\epsilon - V_0. \quad (1)$$

Этот избыток воздуха, характеризуемый так называемым коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$ , зависит от способа сжигания топлива, качества смешения топлива с воздухом и ряда других факторов.

Коэффициент избытка воздуха представляет собой отношение действительно затрачиваемого объема воздуха  $V_\epsilon$  к теоретически определенному его объему  $V_0$ , т.е.

$$\alpha = V_\epsilon / V_0. \quad (2)$$

При полном сгорании топлива  $\alpha > 1$ , а при газификации топлива  $\alpha < 1$ .

Из уравнений (1) и (2) следует, что избыток воздуха определяется выражением

$$\Delta V_g = V_g - V_0 = \alpha V_0 - V_0 = (\alpha - 1)V_0.$$

Расчет горения топлива ведется на 1 кг твердого топлива. Таким образом, буквенные обозначения  $V$  с соответствующими индексами выражают объем воздуха или дымовых газов, приходящихся на 1 кг сжигаемого топлива.

Продукты полного сгорания (дымовые газы) представляют собой смесь сухих газов и водяных паров.

Общий объем дымовых газов  $V_\Gamma$  складывается из объема сухих газов  $V_{c.z.}$  и объема водяных паров  $V_{H_2O}$

$$V_\Gamma = V_{c.z.} + V_{H_2O}.$$

Объем сухих дымовых газов представляет сумму

$$V_{c.z.} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{0N_2} + \Delta V_g = V_{RO_2} + V_{0N_2} + (\alpha - 1)V_0,$$

где  $V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2}$  - объем сухих трехатомных газов, м<sup>3</sup>/кг;  $V_{0N_2}$  - минимальный объем азота, поступившего в камеру сгорания (при  $\alpha=1$ ), м<sup>3</sup>/кг.

Калориметрическую температуру сгорания топлива определяют по уравнению

$$T_\kappa = \frac{Q_H^p + I_T + I_B}{V_{RO_2} \cdot c_{CO_2} + V_{0N_2} \cdot c_{N_2} + V_0(\alpha - 1)c_B + V_{H_2O} \cdot c_{H_2O}}, \quad (3)$$

где  $I_T, I_B$  - энтальпия соответственно топлива и воздуха, кДж/кг;  $c_{CO_2}, c_{N_2}, c_B, c_{H_2O}$  - средняя массовая теплоемкость соответственно углекислого газа, азота, водяного пара, избыточного воздуха, кДж/(кг·К).

Решение уравнения (3) осуществляют методом последовательных приближений, так как входящие в знаменатель средние теплоемкости являются функцией искомой температуры.

Для иллюстрации применения описанной методики может быть приведен пример расчета показателей полного сгорания угля в камере генератора газовой струи. Расчеты проведены для следующих исходных данных: топливо – Донецкий каменный уголь марки Д; распыливание в камере сгорания – воздушное ( $W_{out} = 0$ );  $\alpha=1,2$ ; температура угля  $t_T=20^0C$ ; удельная теплоемкость угля  $C_T=1,3$  кДж/(кг·К); температура воздуха, подаваемого для горения  $t_6=50$  и  $400^0C$ .

Физико-химическая характеристика угля:  $C^r=75,5\%$ ;  $H^r=5,5\%$ ;  $N^r=1,6\%$ ;  $O^r=13,2\%$ ;  $S_{д}^r=4,2\%$ ;  $A^c=18\%$ ;  $W^p=13\%$ ;  $Q_N^p=23,56$  МДж/кг.

Здесь символ А – зола, а индексы г и с обозначают горючую и сухую массу

топлива.

После пересчета горючей и сухой массы топлива в рабочую получим следующую характеристику угля:  $C^p=53,83\%$ ;  $H^p=3,92\%$ ;  $N^p=1,14\%$ ;  $O^p=9,41\%$ ;  $S_{\text{д}}^p=3\%$ ;  $A^p=15,7\%$ ;  $W^p=13\%$ .

Приведенное количество углерода составит

$$K^p = C^p + 0,375S_{\text{д}}^p = 53,83 + 0,375 \cdot 3 = 54,96\%.$$

Теоретически необходимый расход воздуха определяется по формуле

$$V_0 = 0,0889K^p + 0,265H^p - 0,0333O^p = 0,0889 \cdot 54,96 + 0,265 \cdot 3,92 - 0,0333 \cdot 9,41 = 5,61 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Действительный расход воздуха

$$V_{\text{е}} = \alpha \cdot V_0 = 1,2 \cdot 5,61 = 6,73 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

В результате полного сгорания пылевидного угля в камере генератора образуются следующие газы: углекислый газ, азот, водяной пар, избыточный воздух.

Количество углекислого газа определяется по формуле

$$V_{\text{CO}_2} = 1,866 \frac{K^p}{100} = 1,866 \frac{54,96}{100} = 1,025 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем азота в теоретически необходимом количестве воздуха находим по формуле

$$V_{0\text{N}_2} = 0,79V_0 + 0,8 \frac{N^p}{100} = 0,79 \cdot 5,61 + 0,8 \frac{1,14}{100} = 4,44 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем избыточного воздуха  $\Delta V_{\text{е}}$  при  $\alpha=1,2$  составит

$$\Delta V_{\text{е}} = (\alpha - 1)V_0 = (1,2 - 1) \cdot 5,61 = 1,12 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем водяных паров определяется по формуле

$$\begin{aligned} V_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{9H^p + W^p + 100W_{\text{дym.}}}{100 \cdot 0,804} + 0,016V_0\alpha = \\ &= \frac{9 \cdot 3,92 + 13 + 100 \cdot 0}{100 \cdot 0,804} + 0,016 \cdot 5,61 \cdot 1,2 = 0,71 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned}$$

Общее количество газов

$$V_{\Gamma} = V_{RO_2} + V_{0_{N_2}} + \Delta V_{\epsilon} + V_{H_2O} = 1,025 + 4,44 + 1,12 + 0,71 = 7,295 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Энтальпия угля

$$I_T = c_T \cdot t_T = 1,3 \cdot 20 = 26 \text{ кДж/кг}.$$

Энтальпия воздуха при температуре  $50^{\circ}\text{C}$

$$I_{\epsilon} = V_0 \alpha c_{\epsilon} t_{\epsilon} = 5,61 \cdot 1,2 \cdot 1,29 \cdot 50 = 434,2 \text{ кДж/кг}.$$

Задаваясь предварительно значением  $t_{\kappa}=1700^{\circ}\text{C}$ , находим средние теплоемкости газов и определяем по формуле (3) калориметрическую температуру горения

$$\begin{aligned} T_{\kappa} &= \frac{Q_H^p + I_T + I_{\epsilon}}{V_{RO_2} \cdot c_{CO_2} + V_{0_{N_2}} \cdot c_{N_2} + V_0(\alpha - 1)c_{\epsilon} + V_{H_2O} \cdot c_{H_2O}} = \\ &= \frac{23560 + 26 + 434,2}{1,025 \cdot 2,375 + 4,44 \cdot 1,454 + 1,12 \cdot 1,476 + 0,71 \cdot 1,899} = 2020^{\circ}\text{C} = 2293\text{K}. \end{aligned}$$

После последовательных приближений находим

$$T_{\kappa}=1950^{\circ}\text{C}=2223 \text{ K}.$$

Энтальпия воздуха при  $t_{\epsilon}=400^{\circ}\text{C}$

$$I_{\epsilon}=5,61 \cdot 1,2 \cdot 1,333 \cdot 400=3589,5 \text{ кДж/кг}.$$

Задаваясь предварительно значением  $t_{\kappa}=2250^{\circ}\text{C}$ , находим средние теплоемкости газов, а затем калориметрическую температуру сгорания

$$T_{\kappa} = \frac{23560 + 26 + 3589,5}{1,025 \cdot 2,395 + 4,44 \cdot 1,464 + 1,12 \cdot 1,5 + 0,71 \cdot 1,939} = 2263^{\circ}\text{C} = 2536 \text{ K}.$$

Отсюда видно, что повышение температуры воздуха, идущего на сгорание, позволяет поднять калориметрическую температуру сгорания топлива (рис. 1).

Это достигается при работе генератора газовой струи на пылевидном угле, в котором камера сгорания выполнена с регенеративным охлаждением (например, экспериментальный образец ТБВ-56). Здесь при горении в качестве окислителя используется охлаждающий камеру сгорания воздух.

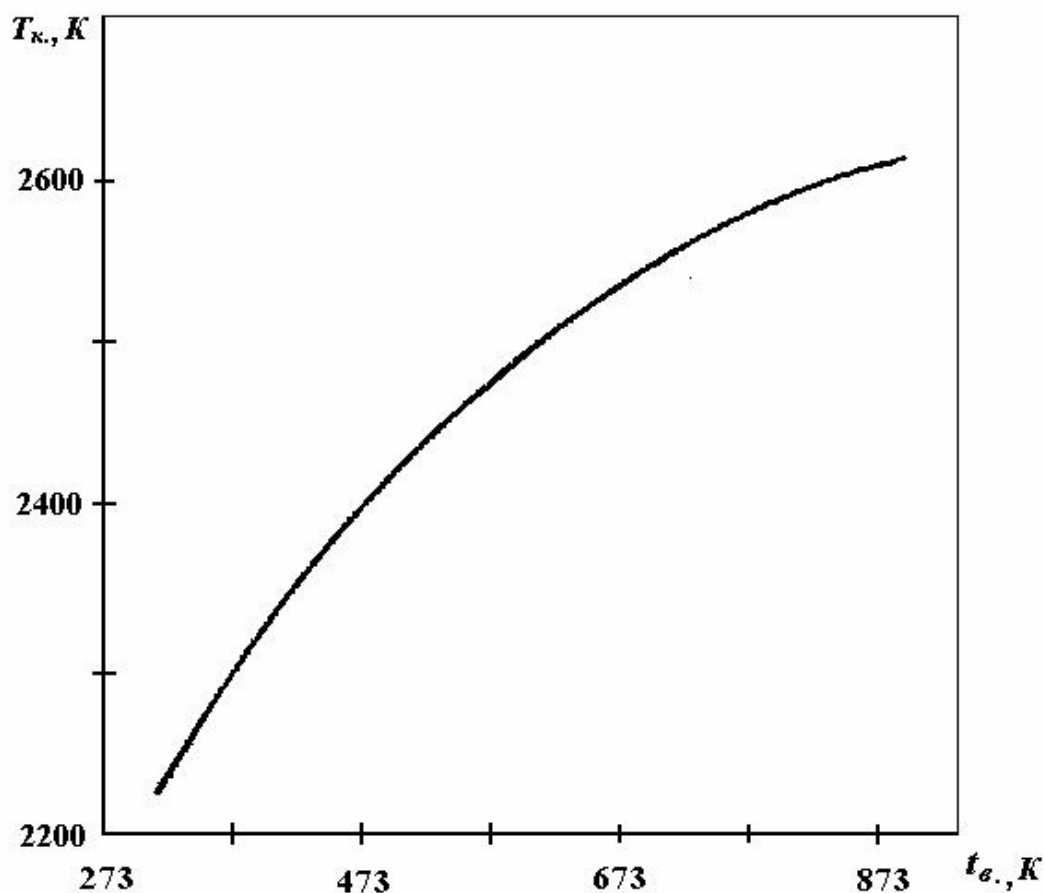


Рис. 1 – Влияние подогрева воздуха на температуру продуктов сгорания угля.

При расходе газа через сопло  $m_r=0,06$  кг/с= $0,047$  м<sup>3</sup>/с (нормальный режим работы камеры сгорания) расход пылевидного угля составит

$$m_T = \frac{0,047}{7,3} = 0,0064 \text{ кг/с} = 23 \text{ кг/ч.}$$

Таким образом, расчет по изложенной методике в сочетании с результатами экспериментальных исследований позволит определить основные энергетические, конструктивные и режимные параметры генератора газовой струи при его работе на твердом топливе.