

## Дисциплина «Газотурбинные установки»

### Теоретическая часть к контрольной работе №2

1. При подготовке к контрольной работе № 2 следует обратиться в подраздел «Лекции», 3 модуль, лекция «Топливо и рациональное его сжигание в камерах сгорания ГТУ».

2. Необходимо ознакомиться с дополнительным материалом, приведенным ниже.

### Дополнительный материал для контрольной работы № 2

#### «Материальный и тепловой балансы камер сгорания»

Основными физико-химическими характеристиками топлива являются его элементарный состав и теплота сгорания (теплотворная способность).

Стабильную часть любого топлива составляет его горючая масса - массовые процентные содержания углерода ( $C_r$ ) водорода ( $H_r$ ), горючей серы ( $S_{r,л}$ ), кислорода ( $O_r$ ) и азота ( $N_r$ ) [3]:

$$\begin{array}{c} \text{Горючие компоненты} \\ C_r + H_r + S_{r,л} + O_r + N_r = 100\%. \end{array} \quad (1)$$

В состав рабочего топлива входит, кроме элементов горючей массы, так называемый балласт топлива ( $A$ ,  $W$  – процентные массовые содержания механических примесей и влаги):

$$\begin{array}{c} \text{Рабочие компоненты} \\ C_p + H_p + S_{r,л} + O_r + N_r + A_p + W_p = 100\% \end{array} \quad (2)$$

Взаимосвязь массового состава рабочего топлива и его горючей массы осуществляется соотношениями:

$$C_p = \left(1 - \frac{A_p + W_p}{100}\right) \cdot C_r; \quad H_p = \left(1 - \frac{A_p + W_p}{100}\right) \cdot H_r. \quad (3)$$

Горючая масса газообразного топлива обычно характеризуется мольным (объемным) содержанием индивидуальных газов - водорода ( $H_2$ ) различных углеводородов ( $C_m H_n$ ), окиси углерода ( $CO$ ), углекислого газа ( $CO_2$ ), азота ( $N_2$ ) и т.п.

Средняя молекулярная масса или молекулярный вес газообразного топлива определяется следующим известным термодинамическим соотношением:

Сумма произведений молярных концентраций на молярный вес газовых компонентов

$$\mu_m = \sum r_i \mu_i \quad (4)$$

Весовая горючая концентрация газовой смеси:

$$C_z = \frac{12,01}{\mu_m} \sum r_i \cdot m_i, \quad C_z = \frac{12,01}{\mu_m} \cdot (r_{C_1} + 2r_{C_2} + 3r_{C_3} + 4r_{C_4} + r_{CO_2})$$

$$H_z = \frac{1,008}{\mu_m} \sum r_i \cdot n_i \cdot 100 \%,$$

$$S_{zn} = \frac{32,06}{\mu_m} \sum r_i \cdot p_i \cdot 100 \%,$$

$$O_z = \frac{32}{\mu_m} \sum r_i \cdot q_i \cdot 100 \%,$$

$$N_z = \frac{14,08}{\mu_m} \sum r_i \cdot v_i \cdot 100 \%.$$

где  $m_i, n_i, p_i, q_i, v_i$  - общие символы компонентов газовой смеси - соответственно число атомов углерода, водорода, серы, кислорода и азота в молекуле компонента газообразного топлива (например, для  $C_3H_8$   $m_i = 3, n_i = 8$ ; для  $H_2S$   $n_i = 2, p_i = 1$ )  $\mu_i$  - мольная масса компонента.

Теоретически необходимый расход кислорода для полного окисления горючих элементов единицы количества (1 кг) рабочего топлива:

$$O_{\min} = \left( \frac{C^p}{12,01} + \frac{H^p}{4 \cdot 1,008} + \frac{S^{p,n}}{32,06} - \frac{O^p}{32} \right) \cdot \frac{1}{100} = (1 + E) \cdot \left( \frac{C^p}{12,01} + \frac{S^{p,n}}{32,06} \right) \cdot \frac{1}{100}, \text{ моль } (O_2)/\text{кг},$$

где  $E$  - характеристика элементарного состава горючей массы топлива, определяемая как отношение расхода кислорода на окисление свободного водорода ( $H_p - 0,126 \cdot O_p$ ) к расходу кислорода на окисление углерода и серы ( $C_p + 0,375 \cdot S_{pl}$ ):

$$E = \frac{\frac{H_p}{4,032} - \frac{O_p}{32}}{\frac{C_p}{12,01} + \frac{S_{pl}}{32,06}} = 2,979 \cdot \frac{H_p - 0,126 \cdot O_p}{C_p + 0,375 \cdot S_{pl}}. \quad (5)$$

Отсюда теоретически необходимый расход сухого воздуха (массовое содержание кислорода в воздухе равно 0,2315, что соответствует мольной концентрации 0,2095), кг/кг :

$$L_0 = \frac{32}{0,2315} \cdot O_{\min} = \frac{32}{0,2315} (1 + E) \left( \frac{C_p}{12,01} + \frac{S_{pl}}{32,06} \right) \cdot \frac{1}{100} = 0,1155(1 + E)(C_p + 0,375 \cdot S_{pl}). \quad (6)$$

Расчетной теплотворной способностью топлива называется количество тепла, которое выделяется при полном сгорании топлива в условиях, исключающих возможность конденсации водяных паров (низшая теплотворная способность,  $Q_H$ ).

С учетом изложенных соотношений, общее уравнение материального баланса процесса сгорания топлива (масса образующихся продуктов сгорания 1 кг топлива) записывается в виде:

$$G = 1 + (1 + \psi \cdot x_s + \Delta x_{1,2}) \cdot \alpha L_0 \approx 1 + \alpha L_0, \quad (7)$$

где  $\psi$  - относительная влажность наружного воздуха;  $x_s$  - массовое содержание влаги при полном насыщении воздуха в пересчете на 1 кг сухого воздуха;  $\Delta x_{1,2}$  - дополнительно введенное при сжигании топлива количество воды или водяного пара в пересчете на 1 кг сухого воздуха, в кг/кг;  $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха, определяемое как отношение общего количества воздуха к теоретически необходимому ( $\alpha = L/L_0$ );  $L_0$  - теоретически необходимый расход воздуха в кг на кг топлива.

В инженерных расчетах, при отсутствии подачи воды или пара в камеру сгорания ( $\Psi x_s + \Delta x_{1,2} = 0$ ), уравнение (7) принимает вид ( $G = 1 + \alpha L_0$ ).

Исходным уравнением для составления теплового баланса камеры сгорания служит первое начало термодинамики для потока по внешнему балансу тепла:

$$Q_{1,2}^* = H_2 - H_1 + W_{1,2}^*, \quad (8)$$

где  $Q_{1,2}^*$  - количество тепла, подведенного извне и определяемого как произведение коэффициента полезного действия камеры сгорания на тепло сгорания всего израсходованного топлива  $BQ_{HP}$ :

$$Q_{1,2}^* = \eta_{kc} \cdot BQ_{HP} ; \quad \eta_{kc} = 1 - \frac{q_{хим.} + q_{мех.} + q_{охл.}}{100}, \quad (9)$$

где  $q_{хим.}$  - потери от химической неполноты сгорания топлива, %.  $q_{мех.}$  - потери от механической неполноты сгорания; при сжигании газообразного топлива их можно считать равными нулю ( $q_{мех.} = 0$ );  $q_{охл.}$  - потери тепла от наружного охлаждения камер сгорания, %.

При составлении теплового баланса камеры сгорания ГТУ принимается, что внешняя работа  $W_{1,2}^*$ , в уравнении (8) равна нулю, в силу того, что сгорание топлива идет при постоянном давлении ( $\delta W^* = -VdP = 0$ ).

Определение расчетных значений энтальпии в начальном  $H_1$ , и конечном состоянии  $H_2$  уравнение (8) для камеры сгорания в общем виде связано с выбором начала отсчета энтальпии.

В исследованиях процессов сгорания топлива тепло сгорания определяется уравнением стандартной температуры калориметрирования ( $t_Q = 20^\circ \approx C$ ).

Отсюда следует, что все значения энтальпий и само уравнение теплового баланса камеры сгорания, строго говоря, должны строиться над уровнем колориметрирования топлива, при котором  $H(t_Q) = 0$ .

Это значит, что выражение теплового баланса камер сгорания с учетом всех потоков теплоносителей, отнесенных к одному кг топлива будет иметь вид:

$$\eta_{kc} Q_n = \alpha L_0 C_{pm}^0 (t_3 - t_Q) - \alpha L_0 C_{pm} (t_1 - t_Q) - C_{pm.B} (t_B - t_Q), \quad (10)$$

где  $\alpha L_0$  - расход сухого воздуха по камере сгорания, отнесенный к единице количества топлива, кг/кг;  $C_{pm}^0$  - средняя теплоемкость продуктов сгорания в интервале температур  $(t_3 - t_Q)$ ;  $t_3$  - средняя температура продуктов сгорания при входе в газовую турбину (на выходе из камеры сгорания);  $C_{pm}$  - средняя температура воздуха в интервале температур  $(t_1 - t_Q)$ ;  $t_1$  - температура воздуха, поступившего в камеру сгорания из компрессора (или регенератора);  $C_{pm}$  - средняя температура топлива в интервале температур  $(t_B - t_Q)$ ;  $T_B$  - температура топлива на входе в камеру сгорания.

Разрешая последнее уравнение относительно коэффициента  $\alpha$ , получим:

$$\alpha = \frac{1}{L_0} \cdot \frac{\eta_{kc} Q_{np} + c_{pm,g} (t_B - t_Q)}{c_{pm}^0 (t_3 - t_Q) - c_{pm} (t_1 - t_Q)}. \quad (11)$$

Нетрудно видеть, что с увеличением температуры газов перед турбиной ( $t_3$ ) при прочих равных условиях величина ( $\alpha$ ) убывает.

Для получения количественной оценки этой связи, полученное уравнение можно без большой погрешности несколько упростить, положив  $t_g = t_Q = t_1$ ;  $c_{pm} = idem$ . Величину  $L_0$  можно найти по эмпирическому уравнению Вельтера-Бертъе-Коновалова,  $Q_{np}$  - в ккал/кг:

$$L_0 = \lambda_p \cdot \frac{Q_n}{1000}; \quad \lambda_p = 1,42 \div 1,45. \quad (12)$$

В технических расчетах обычно принимается, что тепло сгорания топлива не зависит от температуры колориметрирования, что позволяет температуру начала отсчета энтальпии принять любой, а уравнение теплового баланса камеры сгорания записать в виде по отношению к одному кг топлива:

$$\eta_{kc} \cdot Q_{np} = \alpha \cdot L_0 \cdot C_{pm} \cdot (t_3 - t_1). \quad (13)$$

Из уравнения теплового баланса камеры сгорания (13) может быть определена температура продуктов сгорания на входе в турбину  $t_3$  или коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ . Если коэффициент избытка воздуха определен из уравнения материального баланса (8) на основе прямых измерений расхода топлива и воздуха, то из уравнения теплового баланса может быть установлен КПД камеры сгорания. Таким образом коэффициент избытка воздуха  $\alpha$

является связующей характеристикой материального и теплового баланса камер сгорания газотурбинных установок.

Анализ приведенных соотношений показывает, что коэффициент избытка воздуха при неизменных значениях граничных температур цикла, растет с увеличением  $\pi_k$  и снижается с его уменьшением.

Введение в схему ГТУ регенерации тепла отходящих газов увеличивает коэффициент избытка воздуха сравнительно с установкой без регенерации тепла отходящих газов.

Коэффициент избытка воздуха весьма существенно изменяется по длине камеры сгорания, т. е. по мере возникновения, развития и завершения процесса сгорания топлива он возрастает по длине камеры сгорания.

Величина необходимого коэффициента первичного воздуха ( $\alpha_{п}$ ), проходящего через регистр - завихритель, зависит от физических свойств топлива, параметров (температуры и давления) поступающего в камеру сжатого воздуха и общей объемной теплонапряженности самой камеры.

Так как воздух, поступающий в камеру сгорания разделяется на два потока, которые движутся между одинаковыми начальным (на входе в камеру) и конечным (на выходе из камеры) давлениями, то можно записать условие равенства потерь напора в виде:

$$\zeta_p \left( \frac{G_n}{F_p} \right)^2 = \zeta_{BT} \left( \frac{G_{BT}}{F_{BT}} \right)^2, \quad (14)$$

где  $F_p$ ,  $\zeta_p$  - проходное сечение и коэффициент сопротивления завихрителя;  $F_{BT}$ ,  $\zeta_{BT}$  - расчетное сечение и приведенный коэффициент сопротивления тракта движения вторичного воздуха.

Поскольку

$$\frac{G_{BT}}{G_n} = \frac{\alpha}{\alpha_n} - 1, \quad (15)$$

то можно получить уравнение связи между  $\alpha_{п}$  и  $\alpha$ :

$$\alpha_{п} = \frac{\alpha}{1 + \frac{F_{BT}}{F_p} \cdot \sqrt{\frac{\zeta_p}{\zeta_{BT}}}}.$$

Рассмотрение организации рабочего процесса в камере сгорания показывает, что весьма важную роль в его организации играет завихритель первичного воздуха. Он дозирует первичный воздух и стабилизирует пламя, его конструкция в значительной степени определяет всю аэродинамику потока. Первичный воздух, будучи закрученным завихрителем, прижимается к стенкам жаровой трубы, создавая тем самым в центре факела область пониженного давления, куда и устремляются горячие продукты сгорания, обеспечивая поджигание новой порции поступающего в камеру сгорания топлива. Наряду со струями вторичного воздуха, проникающими в зону горения, создаются

условия хорошего перемешивания топлива с воздухом, что решающим образом сказывается на образовании равномерного температурного поля на выходе из камеры сгорания.

**Задача.** Определить мольную массу, элементарный состав газа, а также массовый расход воздуха для окисления 1 кг (1 м<sup>3</sup>) сжигаемого топлива следующего состава: метан -  $CH_4 = 94,2\%$ ; этан -  $C_2H_6 = 2,3\%$ ; пропилен -  $C_3H_6 = 0,5\%$ ; пропан -  $C_3H_8 = 1,1\%$ ; азот -  $N_2 = 1,2\%$ ; углекислый газ -  $CO_2 = 0,7\%$ .

**Решение.** Средняя мольная масса сухого газообразного топлива ( $\mu_m$ ) определяется из соотношения:

$$\mu_m = \frac{1}{100} \sum r_i \mu_i = \frac{1}{100} (94,2 \cdot 16,04 + 2,3 \cdot 30,07 + 0,5 \cdot 42,08 + 1,1 \cdot 44,09 + 1,2 \cdot 28,02 + 0,7 \cdot 44,01) = 17,14,$$

где  $r_i$  - мольная (объемная) концентрация отдельных компонентов газообразного топлива в %;  $\mu_i$  - мольная масса различных компонентов топлива.

Элементарный рабочий состав природного газа определяется по соотношениям:

$$C_p = \frac{12,01}{\mu_m} \sum r_i \cdot m_i; \quad H_p = \frac{1,008}{\mu_m} \sum r_i \cdot n_i; \quad O_p = \frac{16,00}{\mu_m} \sum r_i \cdot q_i \text{ и т.д.,}$$

где  $m_i, n_i, q_i$  - соответственно число атомов углерода, водорода, кислорода и других компонентов топлива. Для данного состава газа элементарный состав газа по каждому компоненту численно будет равен:

$$C^p = \frac{12,01}{17,14} (r_{CH_4} + 2r_{C_2H_6} + 3r_{C_3H_6} + 3r_{C_3H_8} + r_{CO_2}) = \frac{12,01}{17,14} (94,2 + 2 \cdot 2,3 + 3 \cdot 0,5 + 3 \cdot 1,1 + 0,7) = 73,08 \%,$$

$$H^p = \frac{1,008}{17,14} (4r_{CH_4} + 6r_{C_2H_6} + 6r_{C_3H_6} + 8r_{C_3H_8}) = \frac{1,008}{17,14} (4 \cdot 94,2 + 6 \cdot 2,3 + 6 \cdot 0,5 + 8 \cdot 1,1) = 23,72 \%,$$

$$S^p = \frac{32,06}{17,14} \cdot r_{H_2S} = 0,$$

$$N^p = \frac{28,016}{17,14} \cdot r_{N_2} = \frac{28,016}{17,14} \cdot 1,2 = 1,96 \%,$$

$$O^p = \frac{32}{17,14} \cdot r_{CO_2} = \frac{32}{17,14} \cdot 0,7 = 1,3 \%$$

Итого: 100 %

Определяется характеристика элементарного состава рабочего топлива, представляющая собой отношение кислорода, необходимого для окисления свободного водорода топлива ( $N_p - 0,1260_p$ ), к кислороду, необходимому для

окисления приведенного углерода топлива ( $C_p + 0,3758S_{pl}$ ):

$$E = 2,98 \frac{H_p - 0,126 \cdot O_p}{C_p + 0,375 \cdot S_{pl}} = 2,98 \frac{23,72 - 0,126 \cdot 1,3}{73,08 + 0,375 \cdot 0} = 0,96.$$

Теоретически необходимый расход сухого воздуха в кг на 1 кг топлива:

$$L_0 = 0,1154 \cdot (1 + E) \cdot (C_p + 0,375S_{pl}) = 0,1154(1 + 0,96)73,08 = 16,53, \text{ (кг/кг)}$$

Плотность газа при стандартных условиях ( $P = 760$  мм.рт. ст. =  $0,101$  МПа;  $t = 20$  °C ;  $T = 293,15$  K):

$$\rho_{ст.} = \frac{P \cdot 10^6 \cdot \mu_m}{8314 \cdot T} = \frac{0,101 \cdot 10^6 \cdot 17,14}{8314 \cdot 273,15} = 0,762 \text{ (кг/м}^3\text{)}$$

Относительная плотность газа по воздуху:

$$\Delta = \frac{\rho_{ст.}}{\rho_{возд.ст.}} = \frac{0,762}{1,204} = 0,632.$$

Величину  $L_0$  можно найти и по эмпирическому уравнению Вельтера-Бертъе-Коновалова,  $Q_{HP}$  - в ккал/кг:

$$L_0 = \lambda_p \cdot \frac{Q_{HP}}{1000}; \quad (\lambda_p = 1,42 - 1,45).$$