



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

Институт двигателей и энергетических установок
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов

Глава 2. Термогазодинамический расчет рабочего процесса ГТД

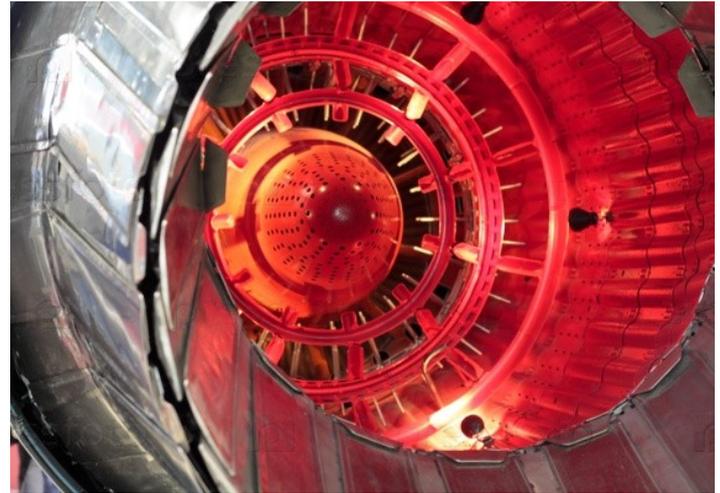
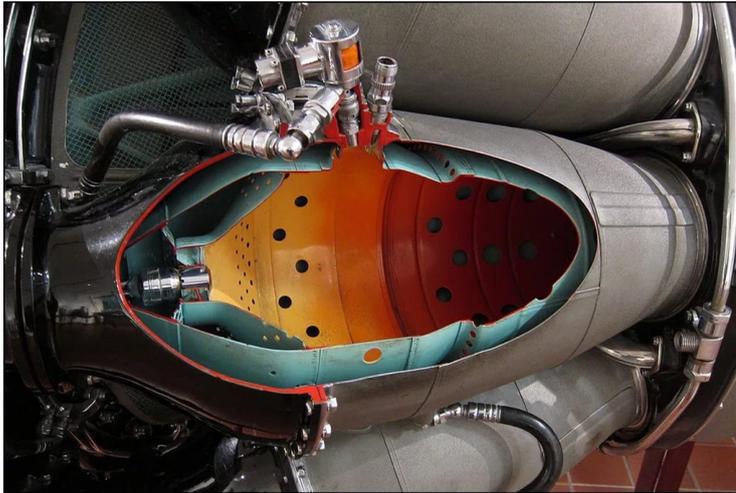
§ 2.4. Камеры сгорания

2.4.1. Назначение

Камеры сгорания (КС) предназначены для увеличения температуры рабочего тела за счет подвода теплоты, выделяющейся при непрерывном сжигании топлива.

2.4.2. Классификация

По назначению и расположению КС разделяются на основные и форсажные.



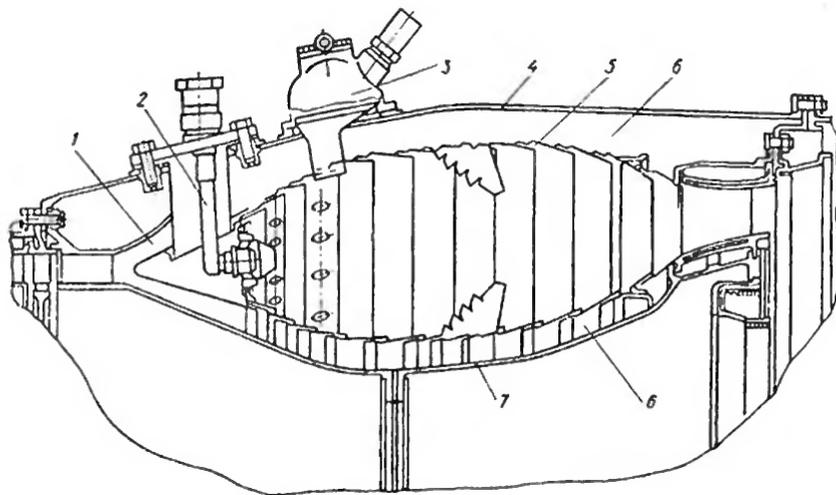
Основные камеры сгорания располагаются между компрессором и турбиной. По компоновке и форме жаровой трубы основные камеры сгорания могут существенно отличаться. Наибольшее распространение получили кольцевые КС.

Основная камера сгорания состоит из диффузора 1, наружного 4 и внутреннего 7 корпусов и жаровой трубы 5.

Воздух из компрессора поступает в диффузор. Здесь происходит снижение скорости потока и распределение его по кольцевым каналам 6 между корпусами и жаровой трубой.

Из кольцевых каналов воздух через отверстия поступает внутрь жаровой трубы, где протекает процесс горения. Топливо подводится в камеру сгорания с помощью форсунок 2.

При запуске двигателя процесс горения инициируется с помощью воспламенителя 3.



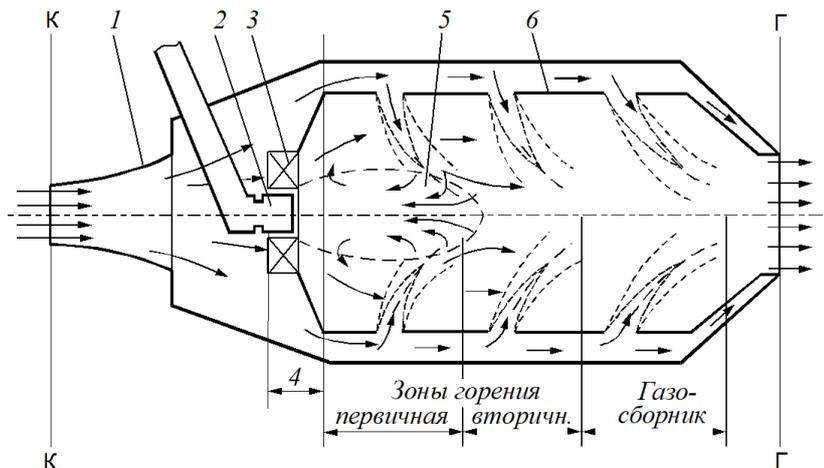
Основные принципы организации рабочего процесса основных камер сгорания

Диффузор **1** за компрессором обеспечивает существенное уменьшение средней скорости потока в зоне горения камеры.

С помощью фронтального устройства **4**, которым называют головную часть жаровой трубы вместе с воздушным завихрителем **3** вокруг топливной форсунки **2**, формируется зона обратных токов **5** для стабилизации пламени и обеспечения устойчивого горения.

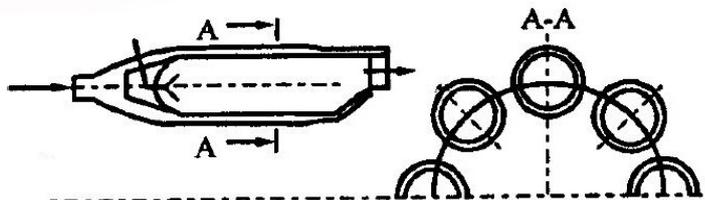
Жаровая труба **6** формирует зоны горения и смешения (газосборник) путем разделения поступающего воздуха на два потока:

- первый - участвует в процессе горения, обеспечивая требуемое для эффективного горения соотношение топлива и воздуха;
- второй - обтекает зону горения и смешивается с продуктами сгорания, охлаждая их до нужной температуры.

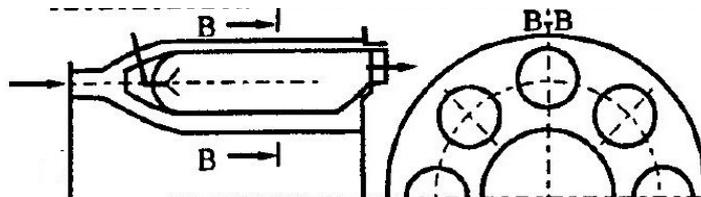


По конструкции основные камеры сгорания делятся на:

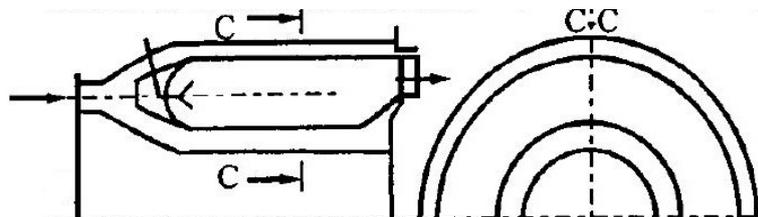
- **Трубчатые**
(индивидуальные)



- Трубчато-кольцевые
(блочные)



- Кольцевые

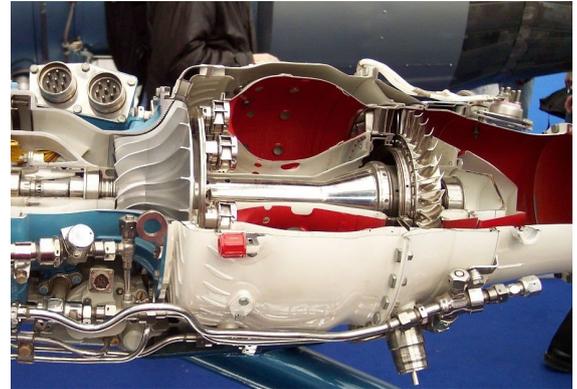


Также основные камеры сгорания классифицируются по направлению движения потока в зоне горения. Выделяются камеры сгорания:

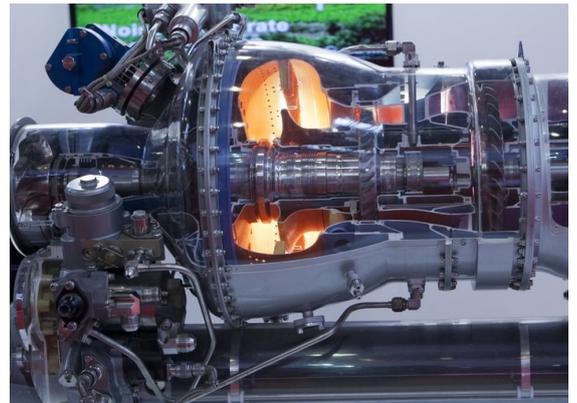
- Противоточные



- Осевые



- Радиальные

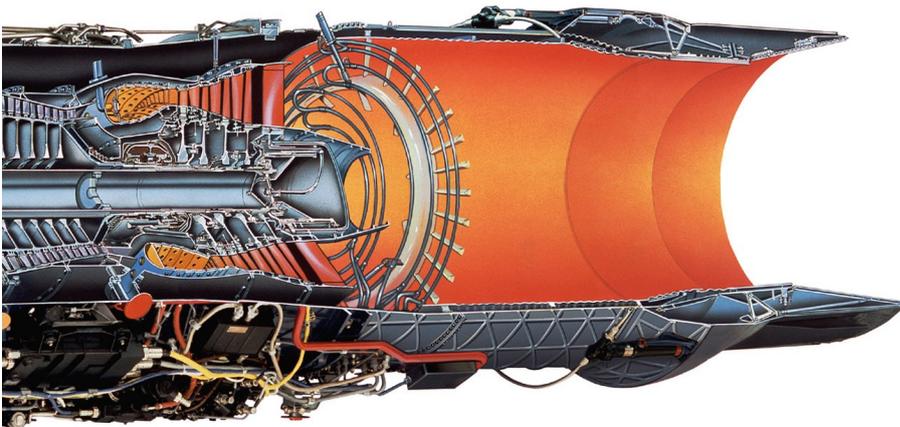


Форсажные камеры сгорания (ФК) устанавливаются за турбиной. В ТРДДФ перед входом в ФК осуществляется смешение потоков внутреннего и наружного контуров.

На максимальных режимах работы двигателя в ФК осуществляется максимально возможный подогрев газа. Температура потока на выходе может достигать 2100...2300 К.

На входе в ФК расположен диффузор. Подвод топлива и его распределение в потоке осуществляется с помощью нескольких топливных коллекторов, снабженных форсунками. За коллекторами располагаются стабилизаторы пламени.

Сгорание топлива происходит в пространстве между стабилизаторами и реактивным соплом. В начале ФК установлен antivибрационный экран, который ниже по потоку сочленен с теплозащитным экраном.



Особенности рабочего процесса форсажных камер сгорания

ФК работает в условиях состава смеси близкого к стехиометрическому, так как с целью получения максимальной тяги температура газа на выходе из форсажной камеры принимается близкой к ее максимально возможному значению.

По сравнению с основной КС в ФК поступает рабочее тело с существенно отличающимися параметрами: температура и скорость потока больше, а давление в несколько раз меньше.

В следствие этого, ФК не имеет жаровой трубы, разделенной на зоны горения и смешения, ее габариты больше, фронтное устройство заменено на V-образные стабилизаторы, по-другому подводится и распределяется топливо.

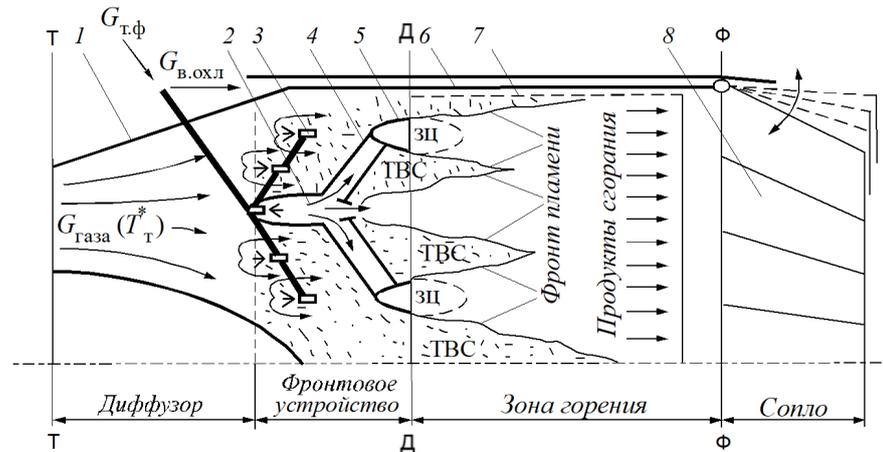


Рис. Схема ФК: 1 – диффузор; 2 – форкамера; 3 – топливные форсунки; 4 – пламеперебрасывающий уголок; 5 – V-образный стабилизатор пламени; 6 – корпус камеры; 7 – антивибрационный экран; 8 – створки регулируемого сопла

2.4.3. Свойства топлива

В ГТД наибольшее распространение получили углеводородные топлива.

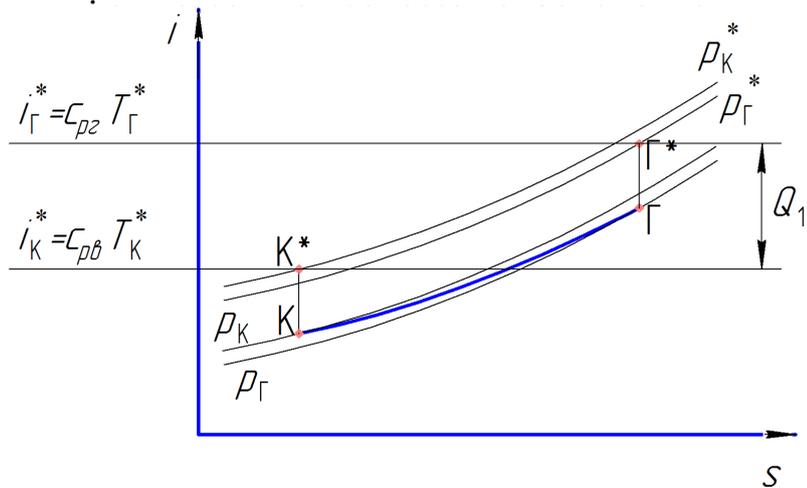
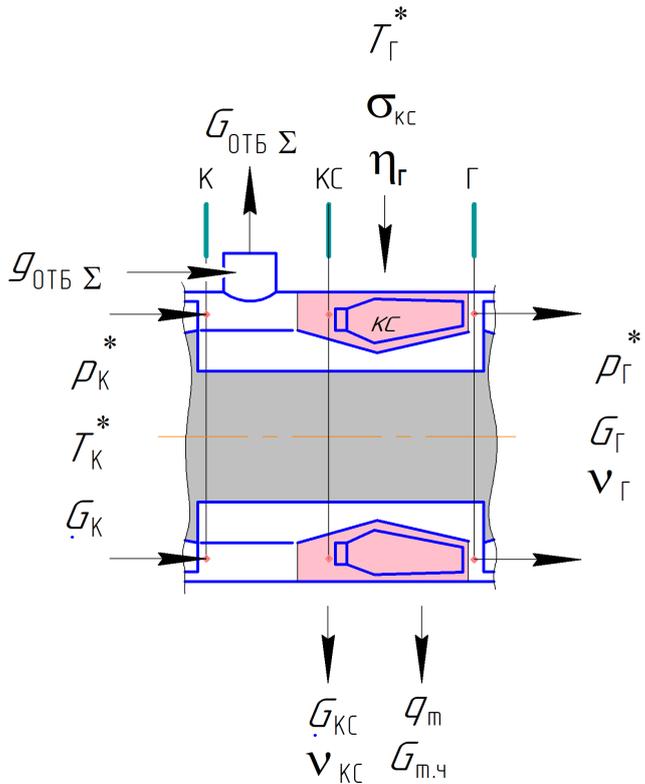
Топливо характеризуется

- составом, который может быть выражен условной химической формулой $C_n H_m$;
- удельной теплотой сгорания H_u - количеством тепла, которое выделяется в калориметре при полном сгорании 1 кг топлива и последующем охлаждении продуктов сгорания до начальной температуры топлива и воздуха $T_0 = 293\text{ K}$;
- стехиометрический коэффициент L_0 , которым называют количество воздуха, теоретически необходимое для полного сгорания 1 кг топлива.

Для корректного сравнения термогазодинамические расчеты ГТД рекомендуется выполнять по характеристикам условного «стандартного» углеводородного топлива (СУТ) (близкого по параметрам к авиационному керосину Т-1) с условной формулой $C_{0,855} H_{0,145}$,

$$H_u = 42915000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = 42915 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \text{ и } L_0 = 14,78 .$$

2.4.4. Расчетная схема



2.4.5. Параметры режима работы основной КС

α - коэффициентом избытка воздуха.

Коэффициент избытка окислителя - отношение расхода рабочего тела (воздуха) $G_{КС}$, проходящего через КС, к расходу, теоретически необходимому для полного сгорания топлива

$$\alpha = \frac{G_{КС}}{G_m \cdot L_0}.$$

При $\alpha=1$ в камеру сгорания поступает окислителя (воздуха) ровно столько, сколько необходимо для полного сгорания топлива. Такое соотношение топлива с воздухом называется стехиометрическим.

Если $\alpha < 1$, то окислителя (воздуха) поступает меньше, чем это необходимо для сгорания топлива. Часть топлива остается несгоревшей. Такая смесь называется богатой (топливом).

Если $\alpha > 1$, то, наоборот, окислителя (воздуха) больше, чем необходимо. Такая смесь называется бедной. Камеры сгорания газотурбинных двигателей работают на бедных смесях.

q_m - относительный расход топлива.

Относительный расход топлива – отношение расхода топлива к расходу рабочего тела (воздуха), проходящего через камеру сгорания

$$q_m = \frac{G_m}{G_{\text{КС}}} = \frac{1}{\alpha \cdot L_0}.$$

T_K^* , p_K^* - полные температура и давление рабочего тела в сечении на входе в КС.

T_Γ^* - полная температура рабочего тела в сечении на выходе из КС.

При заданных составе топлива, составе поступающего в КС рабочего тела (воздуха) и T_K^* величина T_Γ^* однозначно определяет значение относительного расхода топлива q_m . Данная зависимость может быть представлена, например, в виде номограммы.

2.4.6. Критерии эффективности

$\sigma_{\text{КС}}$ - коэффициент восстановления полного давления в камере сгорания.

Коэффициентом восстановления полного давления в камере сгорания называют отношение полных давлений на выходе из камеры сгорания и на входе в нее:

$$\sigma_{\text{КС}} = \frac{p_{\Gamma}^*}{p_{\text{К}}^*}.$$

η_{Γ} - коэффициент полноты сгорания топлива.

Коэффициентом полноты сгорания топлива называют отношение количества тепла, подведенного к воздушному потоку в камере сгорания ($G_{\text{КС}} \cdot Q_1$), к располагаемой (химической) энергии внесенного в двигатель топлива ($G_m \cdot H_u$):

$$\eta_{\Gamma} = \frac{G_{\text{КС}} \cdot Q_1}{G_m \cdot H_u} = \frac{Q_1}{q_m \cdot H_u} = \frac{Q_1}{Q_0}.$$

Современные ГТД отличаются высокой полнотой сгорания топлива η_r и небольшими потерями полного давления $\sigma_{\text{КС}}$. На основных режимах работы этих двигателей коэффициент полноты сгорания топлива обычно $\eta_r=0,99\dots0,995$, а коэффициент восстановления полного давления $\sigma_{\text{КС}}=0,94\dots0,96$.

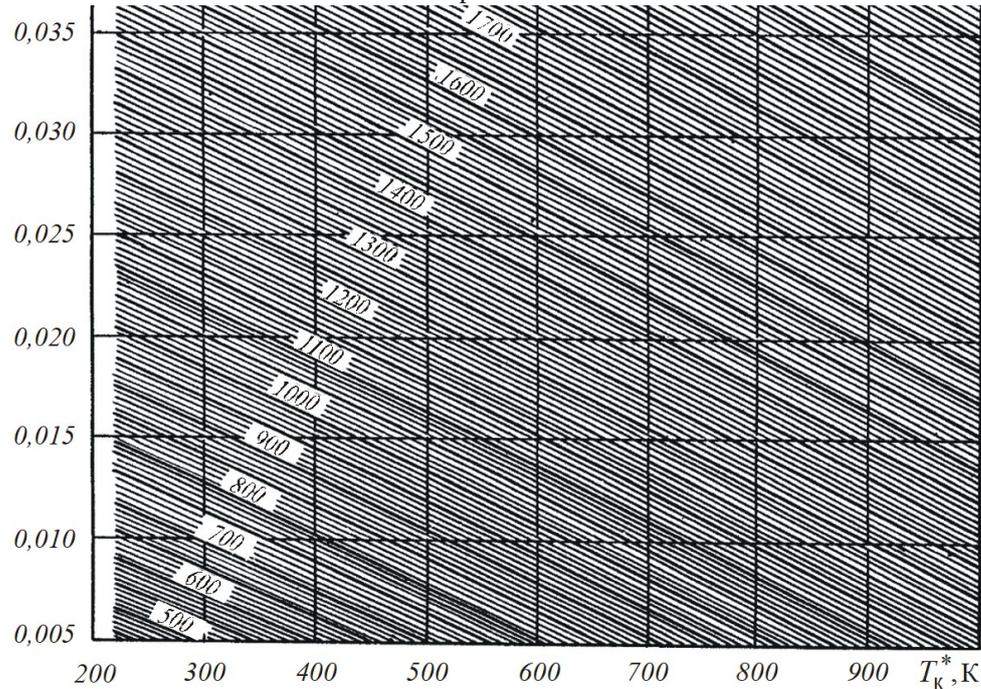
На малоразмерных двигателях коэффициент полноты сгорания топлива может быть на 1...5 % меньше.

2.4.7. Расчет рабочего процесса основной камеры сгорания

Относительный расход топлива:

- с использованием номограммы:

$$q_m = \frac{0,98}{\eta_{\Gamma}} q_m^{\text{НОМ}}(T_K^*, T_{\Gamma}^*);$$



- по упрощенным формулам:

$$q_m = \frac{c_{pz} \cdot T_{\Gamma}^* - c_{pv} \cdot T_{\text{К}}^*}{H_u \cdot \eta_{\Gamma}}$$

или

$$q_m = \frac{c_{pкc} \cdot (T_{\Gamma}^* - T_{\text{К}}^*)}{H_u \cdot \eta_{\Gamma}},$$

где $c_{pкc}$ - условная удельная теплоемкость рабочего тела в камере сгорания, которая подбирается из условия снижения погрешности формулы для расчета q_m .

Расход воздуха, отбираемого из проточной части между сечениями К и КС:

$$G_{\text{отб}.i} = G_{\text{К}} \cdot g_{\text{отб}.i}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Коэффициент изменения массы воздуха в сечении КС:

$$v_{\text{КС}} = 1 - g_{\text{отб}.\Sigma} = 1 - \sum_i g_{\text{отб}.i} = 1 - \left(\sum_i g_{\text{охл}.i} + g_{\text{отб}.\text{ЛА}} + g_{\text{ут}} \right).$$

Расход воздуха через камеру сгорания:

$$G_{\text{КС}} = G_{\text{К}} - \sum_i G_{\text{отб.}i} = G_{\text{К}} \cdot v_{\text{КС}}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Расход топлива в камере сгорания:

$$G_m = q_m \cdot G_{\text{КС}} = q_m \cdot v_{\text{КС}} \cdot G_{\text{К}}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Часовой расход топлива в камере сгорания:

$$G_{m.\text{ч}} = 3600 \cdot G_m = 3600 \cdot q_m \cdot G_{\text{КС}} = 3600 \cdot q_m \cdot v_{\text{КС}} \cdot G_{\text{К}}, \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

Коэффициент изменения массы рабочего тела в сечении на выходе:

$$v_{\Gamma} = v_{\text{КС}} \cdot (1 + q_m).$$

Расход рабочего тела на выходе из камеры сгорания:

$$G_{\Gamma} = G_{\text{КС}} + G_m = G_{\text{К}} \cdot v_{\Gamma}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Полное давление рабочего тела на выходе:

$$p_{\Gamma}^* = p_{\text{К}}^* \cdot \sigma_{\text{КС}}, \text{ кПа}.$$

2.4.8. Особенности расчета рабочего процесса форсажной камеры сгорания

В ФК полнота сгорания топлива меньше, чем в основной. Коэффициент полноты сгорания топлива $\eta_{г.ф}$ в ФК зависит от коэффициента избытка окислителя $\alpha_{ф}$:

- $\eta_{г.ф} = 0,92 \dots 0,95$ при $\alpha_{ф} > 1,3$;
- $\eta_{г.ф} = 0,85 \dots 0,92$ при $\alpha_{ф} < 1,3$.

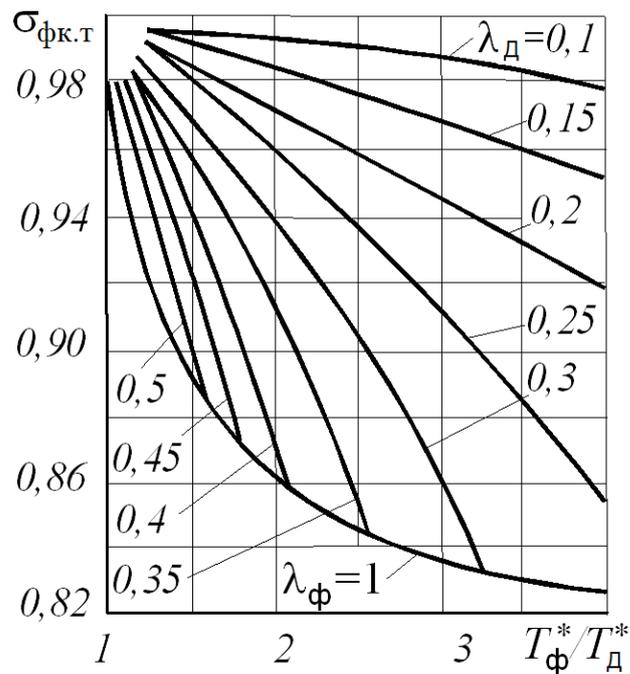
Коэффициент восстановления полного давления в форсажной камере $\sigma_{фк}$ определяется как произведение

$$\sigma_{фк} = \sigma_{фк.г} \cdot \sigma_{фк.т} .$$

Коэффициентом $\sigma_{фк.г}$ учитываются гидравлические потери в форсажной камере. Обычно $\sigma_{фк.г} = 0,94 \dots 0,97$.

Коэффициентом $\sigma_{\text{фк.т}}$ учитываются потери полного давления, обусловленные подводом тепла к движущемуся потоку. Они определяются в зависимости от приведенной скорости в сечении D λ_D и от степени подогрева газа $T_{\text{ф}}^*/T_D^*$.

Приведенную скорость на входе в цилиндрическую часть форсажной камеры (на выходе из диффузора) рекомендуется принимать в пределах $\lambda_D = 0,18 \dots 0,25$.



Относительный расход топлива через форсажную камеру:

$$q_{m.\phi} = \frac{c_{p2}(T_{\phi}^* - T_{Д}^*)}{H_u \cdot \eta_{г.\phi}}.$$

Расход топлива в форсажной камере:

$$G_{m.\phi} = q_{m.\phi} \cdot G_{Д}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Часовой расход топлива в камере сгорания:

$$G_{m.\phi.\text{ч}} = 3600 \cdot G_{m.\phi} = 3600 \cdot q_{m.\phi} \cdot G_{Д}, \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

Коэффициент изменения массы рабочего тела в сечении Д:

$$v_{Д} = v_{Т} \quad - \text{ для ТРДФ};$$

$$v_{Д} = v_{СМ} \quad - \text{ для ТРДДФсм.}$$

Коэффициент изменения массы рабочего тела в сечении на выходе:

$$v_{\phi} = v_{Д} \cdot (1 + q_{m.\phi}).$$