

Топливосжигающие устройства

Требования, предъявляемые к камерам сгорания

1. Высокий коэффициент полноты сгорания топлива в заданном диапазоне режимов работы и параметров топливовоздушной смеси.

В современных камерах сгорания во всем диапазоне рабочих нагрузок обычно $\eta_r \geq 0,95 \dots 0,99$, а на расчетном режиме $\eta_r = 0,98 \dots 0,99$.

2. Малые гидравлические потери полного давления в камере.

Величина коэффициента потерь учитывает три вида потерь: 1) на трение; 2) турбулентные (на удар в диффузоре, на смешение потоков, от местных сопротивлений, например во фронтальном устройстве, обусловленные местными циркуляционными течениями и т. д.); 3) потери давления в потоке при подводе теплоты.

Для современных камер сгорания среднее значение $\sigma^* = 1 \dots 3\%$. У камер сгорания авиационных ГТД обычно $\sigma^* \geq 3 \dots 5\%$, но может быть и больше 10%.

Топливосжигающие устройства

Требования, предъявляемые к камерам сгорания

3. Высокая теплонапряженность рабочего объема $N = Q_1 / (V_{ж} \rho_B)$.

$Q_1 = G_T Q_p \eta_r$; $V_{ж}$ – внутренний объем жаровой трубы, м³;

G_T – расход топлива, кг/ч.

Высокая теплонапряженность обеспечивает малые размеры камеры и ее материалоемкость. В современных камерах сгорания различных стационарных установок $N = 200 \dots 600$ кДж/(м³ч Па), в авиационных ГТД $N = 4000 \dots 5000$ кДж/(м³ч Па).

4. Малая или заданная неравномерность поля температуры газа на выходе из камеры сгорания.

Коэффициент неравномерности поля температур газа (в %)

$$\delta = (T_{\max}^* - T_{\min}^*) / T_{\text{ср}}^*$$

где T_{\max}^* и T_{\min}^* – соответственно максимальная и минимальная температуры торможения отдельных струек газа в выходном сечении камеры сгорания; $T_{\text{ср}}^*$ – средняя (расчетная) температура газа за камерой.

В стационарных ГТУ δ редко превышает 5...10%, в авиационных ГТД $\delta = 15 \dots 20\%$ и более.

Для авиационных ГТД выражение для δ чаще всего имеет вид:

$$\delta = (T_{\max}^* - T_{\text{ср}}^*) / (T_{\text{ср}}^* - T_B^*).$$

T_B^* – температура воздуха на входе в камеру.

Топливосжигающие устройства

Требования, предъявляемые к камерам сгорания

5. Быстрый надежный пуск и устойчивая работа камеры сгорания на различных режимах, что особенно важно для авиационных ГТД. Камера сгорания ГТД должна отвечать этим требованиям при пониженных температуре и давлении на обедненной смеси с суммарным коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 50 \dots 100$ (вместо обычного значения $3 \dots 5$).

6. Большая долговечность конструкции, удобство и безопасность эксплуатации камеры. При длительном сроке службы очень важно, чтобы обслуживание, монтаж и разборка ее элементов были просты и не требовали больших затрат времени.

7. Отсутствие нагара, дымления и токсичных веществ в продуктах сгорания. Нагар нарушает нормальный режим работы деталей камеры и проточной части турбины, регенератора. Дым и токсичные вещества (в том числе канцерогенные) загрязняют окружающую среду.

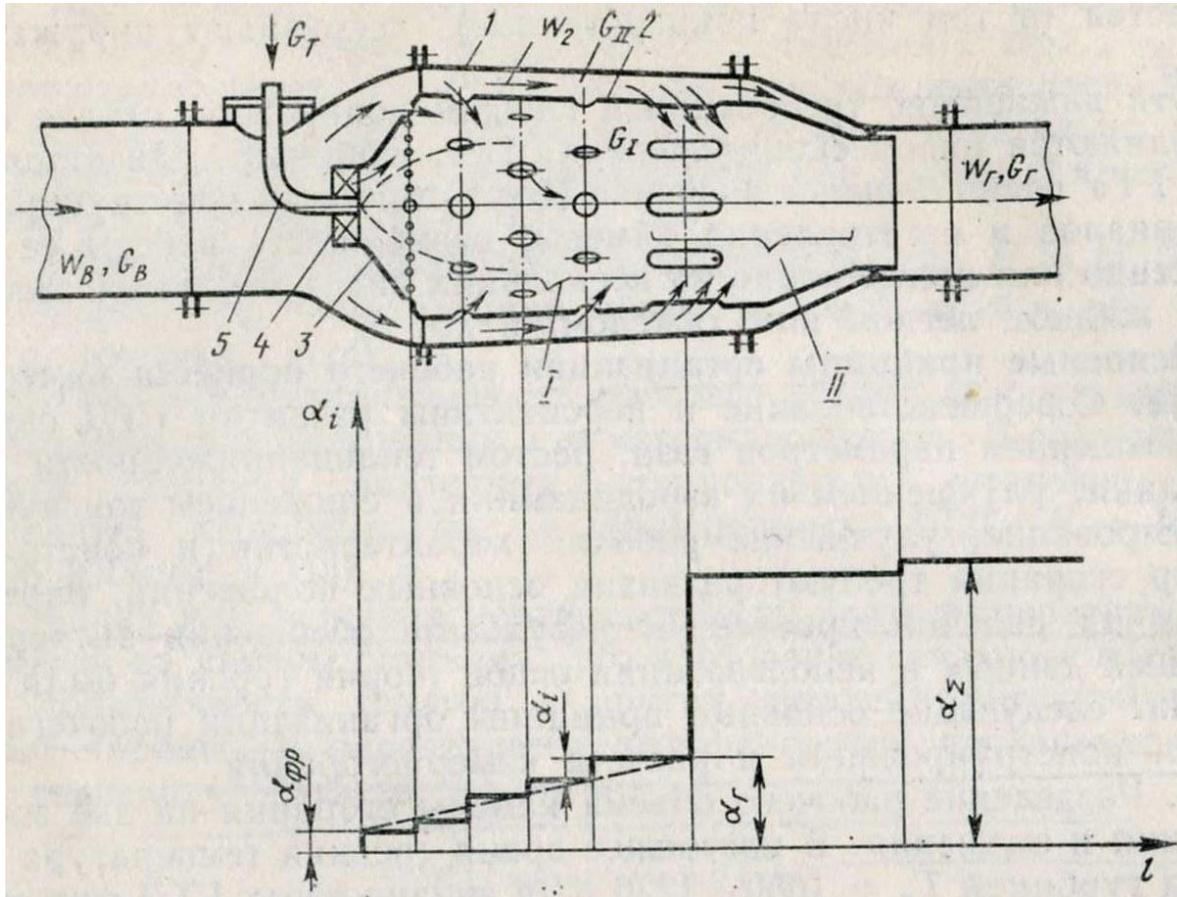
Топливосжигающие устройства

Основные принципы организации рабочего процесса камер сгорания

1. Разделение рабочего объема камеры сгорания на две зоны – горения и смешения.
2. Постепенный (ступенчатый) подвод первичного воздуха по длине зоны горения.
3. Обеспечение турбулизации потока в зоне горения.
4. Обеспечение стабилизации фронта пламени в зоне горения.
5. Оптимальное распределение концентраций топлива по сечениям зоны горения.
6. Охлаждение основных деталей камеры сгорания, поступающим в камеру воздухом, а иногда топливом.

Топливосжигающие устройства

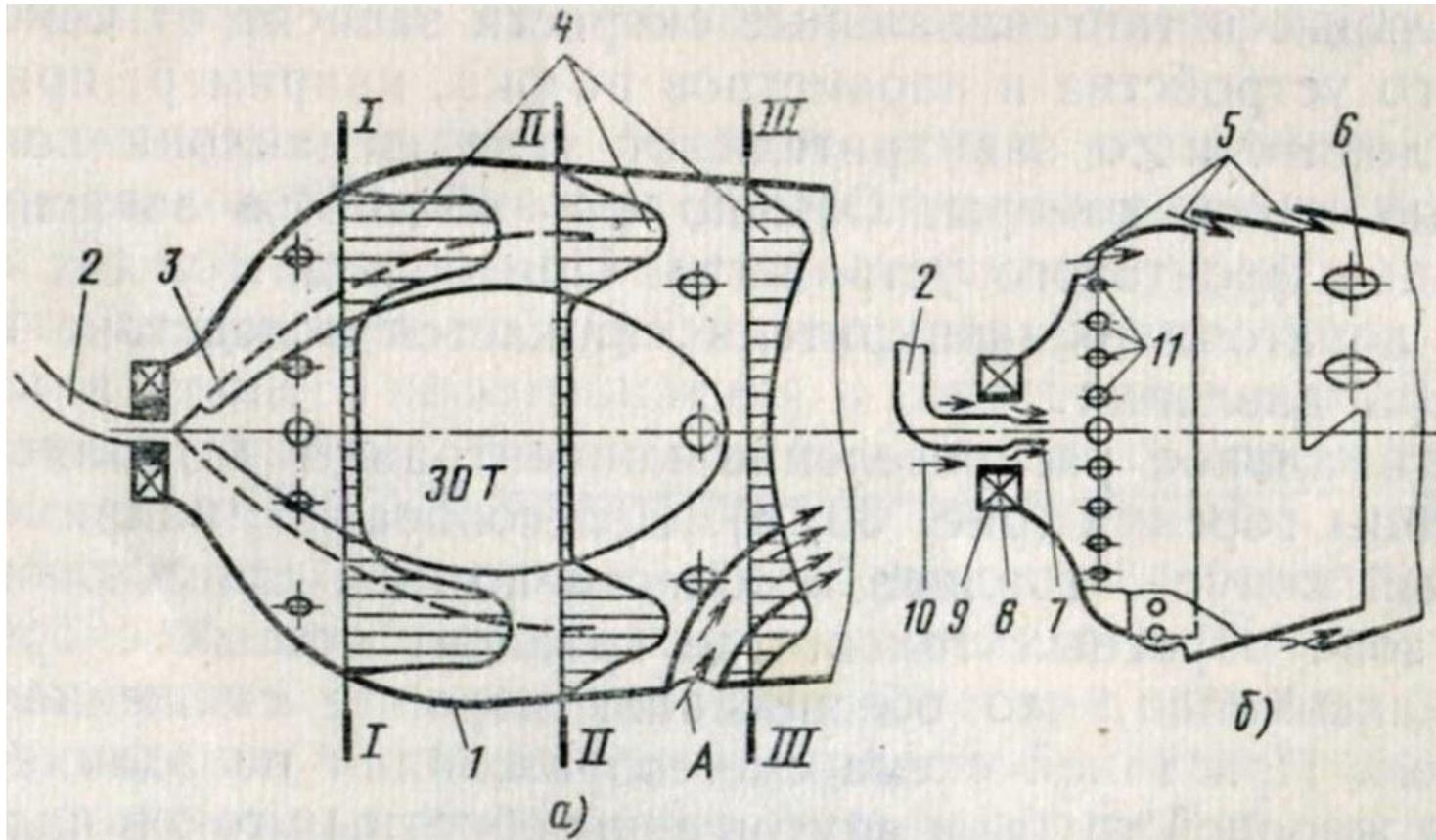
Основные принципы организации рабочего процесса камер сгорания



- I – зона горения
- II – зона смешения
- G_I – первичный воздух
- G_{II} – вторичный воздух
- G_B – расход воздуха
- 1 – корпус камеры сгорания
- 2 – жаровая труба
- 3 – фронтное устройство
- 4 – лопаточный завихритель воздуха
- 5 – форсунка

Топливосжигающие устройства

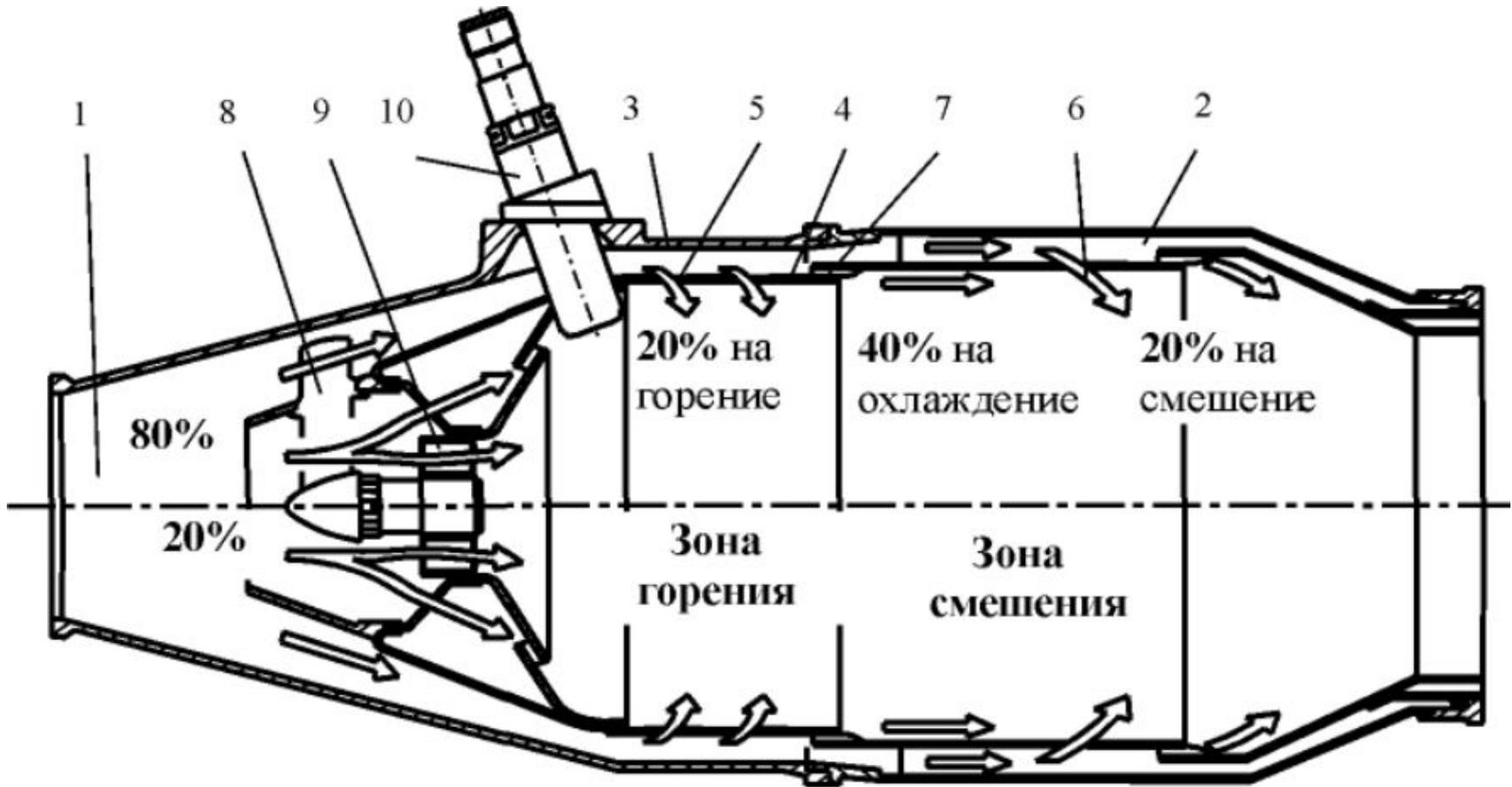
Изменение концентрации топлива по сечениям зоны горения



1 – жаровая труба; **2** – корпус форсунки; **3** – полый конус топлива; **4** – распределение концентраций топлива; **5** – кольцевые щели для охлаждающего воздуха; **6** – отверстия для вторичного воздуха; **7** – торец форсунки; **8** – стакан; **9** – лопаточный завихритель; **10** – воздух на охлаждение форсунки; **11** – отверстия для воздуха, охлаждающего ФУ и жаровую трубу

Топливосжигающие устройства

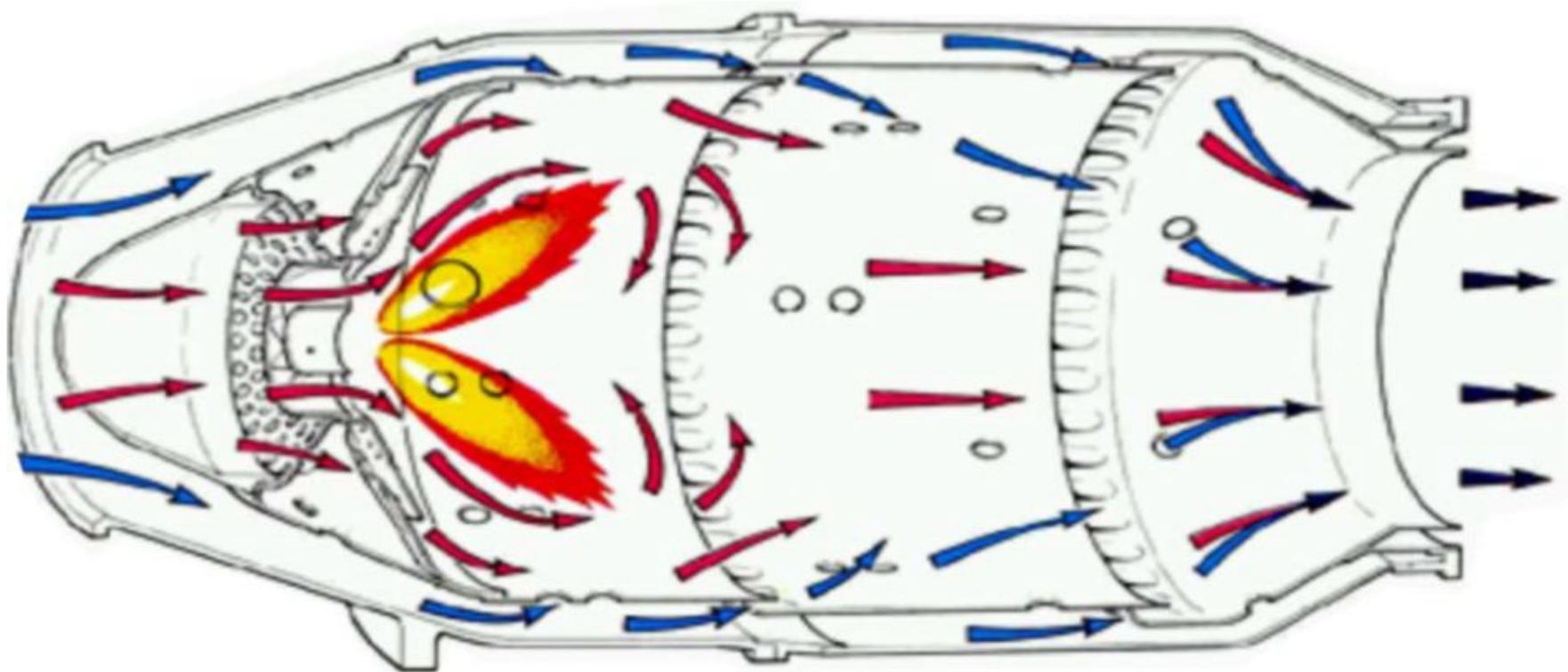
Общая схема и распределение воздуха в КС (Rolls-Royce)



1 - диффузор; 2 - кольцевые каналы; 3 - корпус КС; 4 - жаровая труба; 5 - отверстия первичной зоны; 6 - отверстия зоны смешения; 7 - отверстия охлаждения; 8 - топливная форсунка; 9 - фронтное устройство; 10 - свеча зажигания

Топливосжигающие устройства

Модель воздушного потока и стабилизации пламени в КС
(Rolls-Royce)



Топливосжигающие устройства

Конструкции камер сгорания

Камеры сгорания классифицируют по следующим признакам:

по наличию силовой связи с корпусом ГТУ

✓ встроенные

✓ выносные

по роду сжигаемого топлива

✓ для газообразного топлива

✓ для жидкого топлива

✓ для совместного сжигания жидкого и газообразного топлива (комбинированные)

✓ для твердого топлива

по направлению потоков воздуха и продуктов сгорания

✓ прямоточные (направления движения воздуха и газа одинаковы или близки)

✓ противоточные (направления движения воздуха и продуктов сгорания противоположны или близки к ним)

по количеству горелок на одной пламенной трубе

✓ одnogорелочные

✓ многогорелочные

по включению КС в схему ГТУ

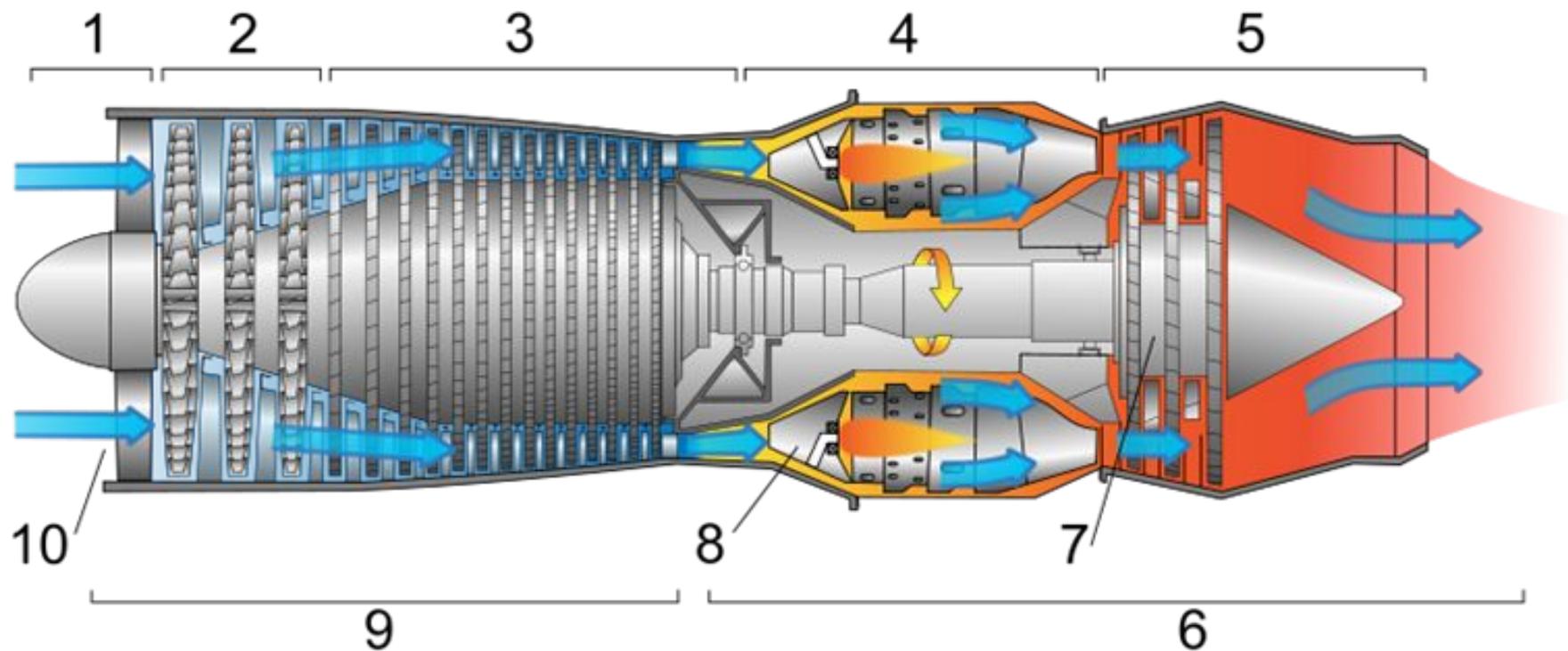
✓ основные

✓ для промежуточного подогрева газов, в том числе форсажные

Топливосжигающие устройства

Конструкции камер сгорания

Встроенная камера сгорания



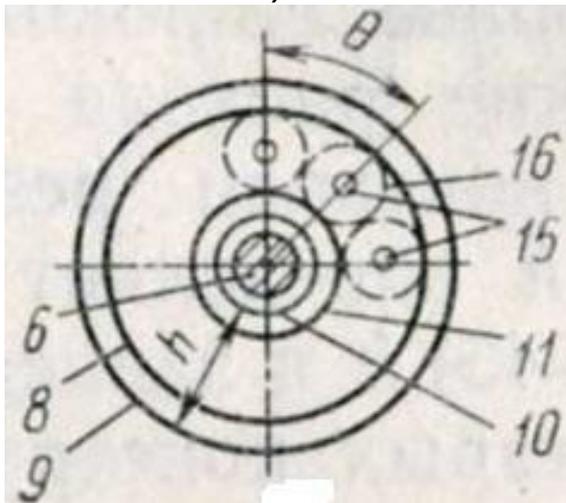
Топливосжигающие устройства

Конструкции камер сгорания

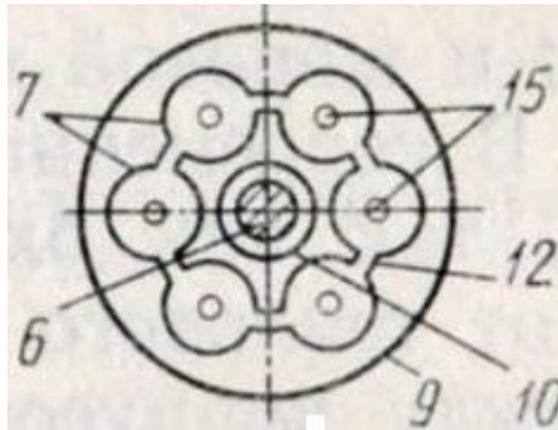
В зависимости от конструктивного исполнения **встроенные** КС могут быть следующих типов:

- кольцевая (а)
- трубчато-кольцевая (б)
- секционная (в)
- индивидуальная

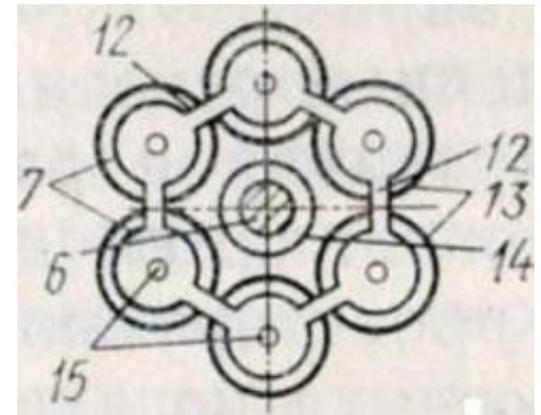
а)



б)



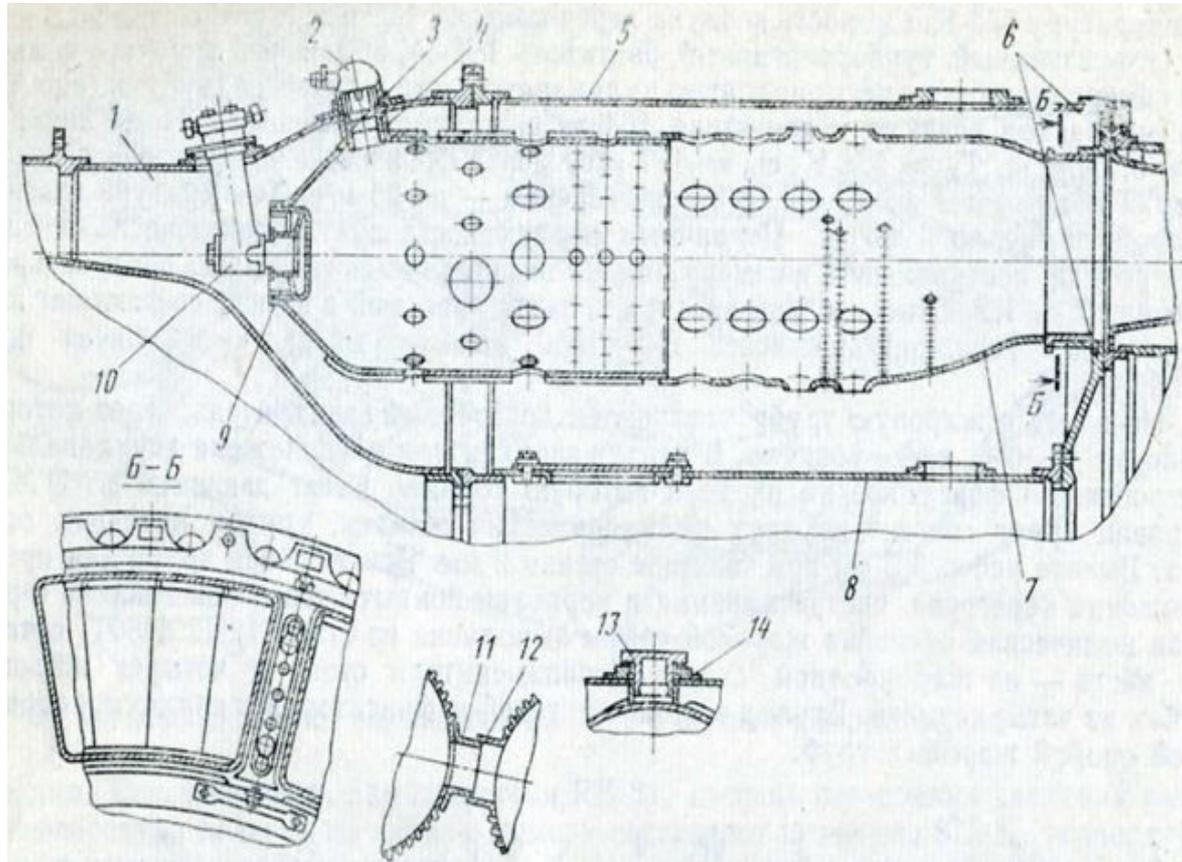
в)



6 – вал двигателя; 7 – отдельные жаровые трубы; 8 – наружная обечайка кольцевой жаровой трубы; 9 – наружный (кольцевой) корпус камеры сгорания; 10 – внутренний корпус; 11 – внутренняя обечайка кольцевой жаровой трубы; 12 – патрубок для переброски пламени; 13 – корпус; 14 – кожух вала; 15 — форсунка; 16 — конус топлива

Топливосжигающие устройства

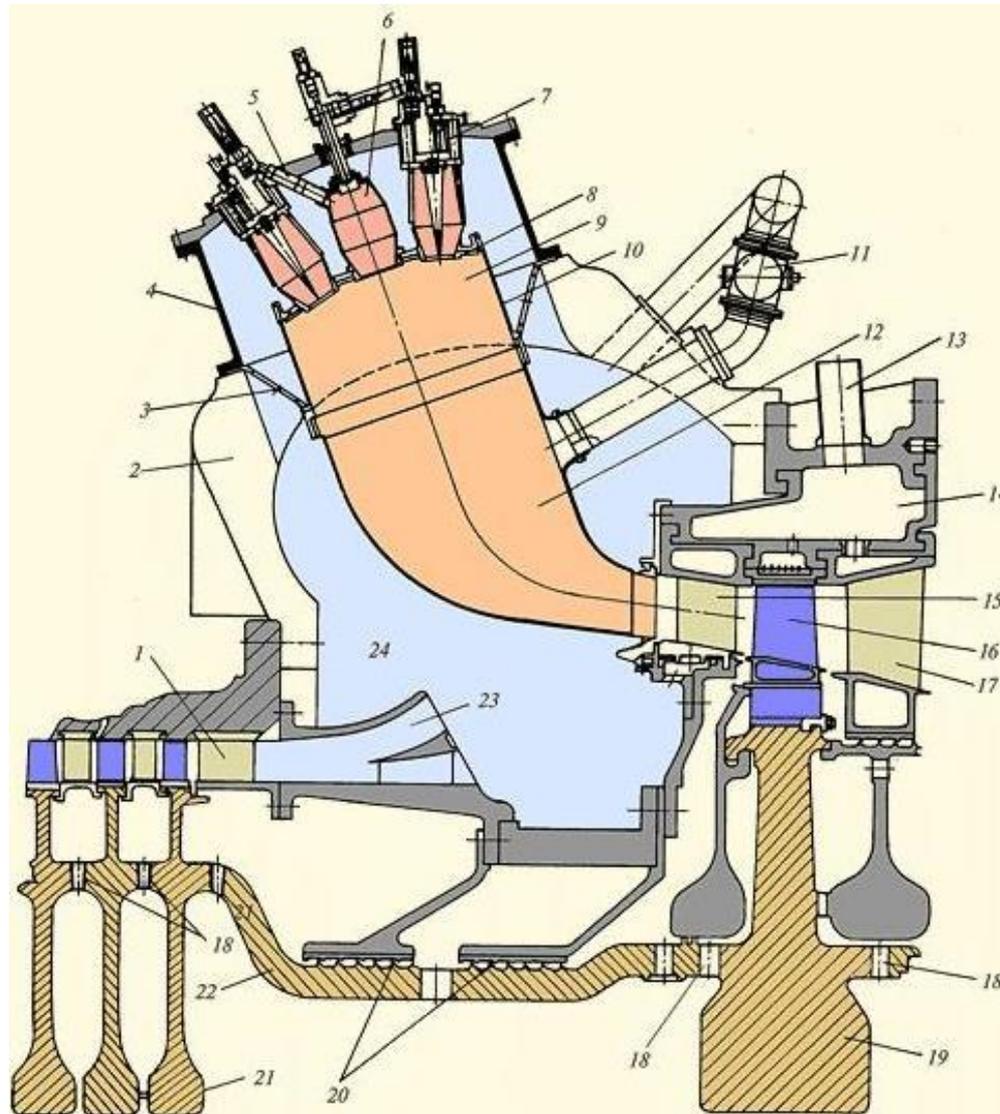
Трубчато-кольцевая камера сгорания турбореактивного газотурбинного двигателя РД-3М-500



1 – кольцевой диффузор камеры; 2 – воспламенитель; 3 – корпус воспламенителя; 4 – втулка; 5 – наружный кольцевой корпус камеры; 6 – опора соплового аппарата турбины; 7 – жаровая труба; 8 – внутренний кольцевой корпус камеры; 9 – лопаточный завихритель; 10 – форсунка; 11, 12 – внутренняя и наружная втулки патрубка для переброски пламени; 13 – фиксатор; 14 – втулка фиксатора

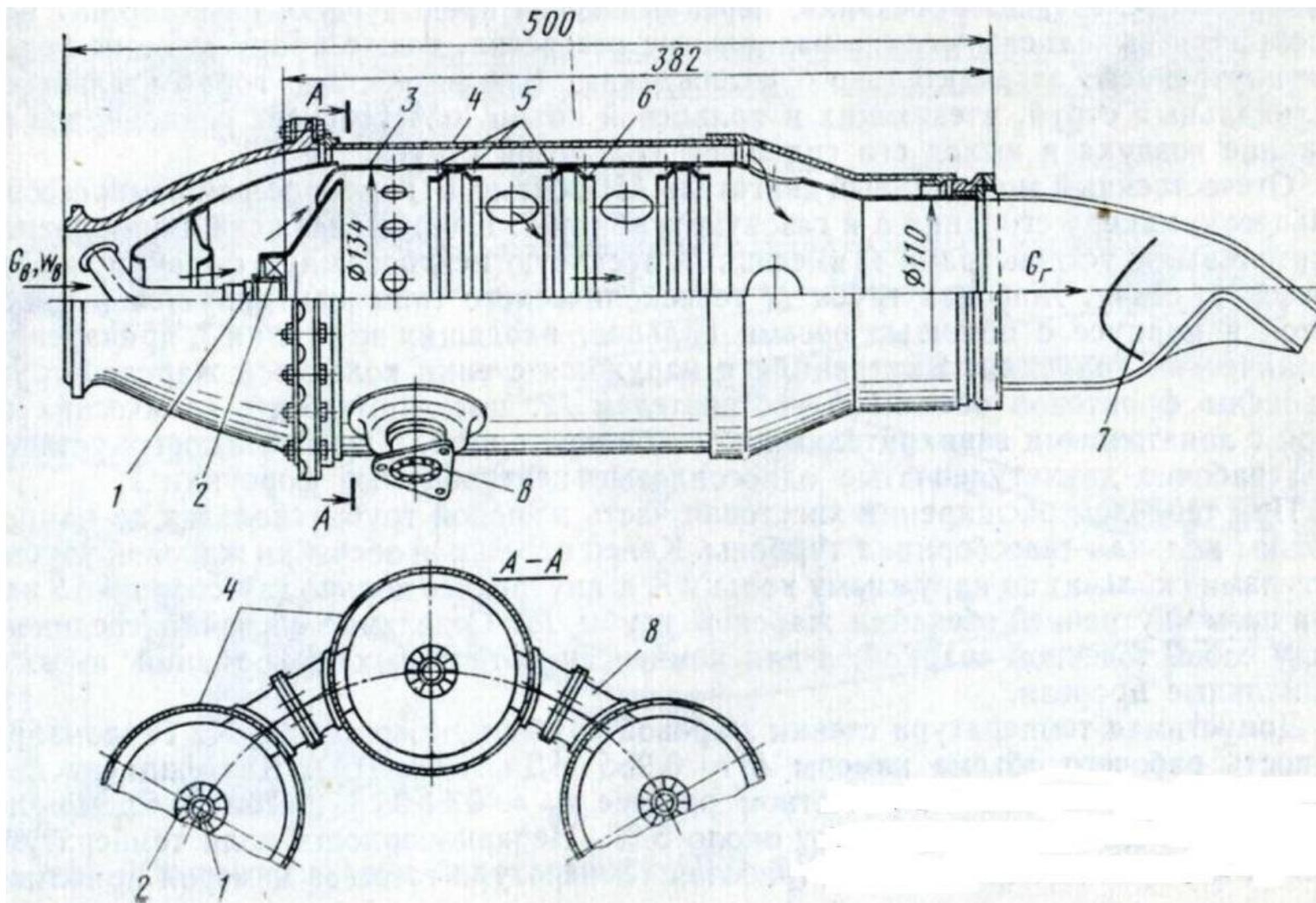
Топливосжигающие устройства

Выходная часть компрессора, трубчато-кольцевая КС и входная часть газовой турбины (проект ЛМЗ – «Авиадвигатель»)



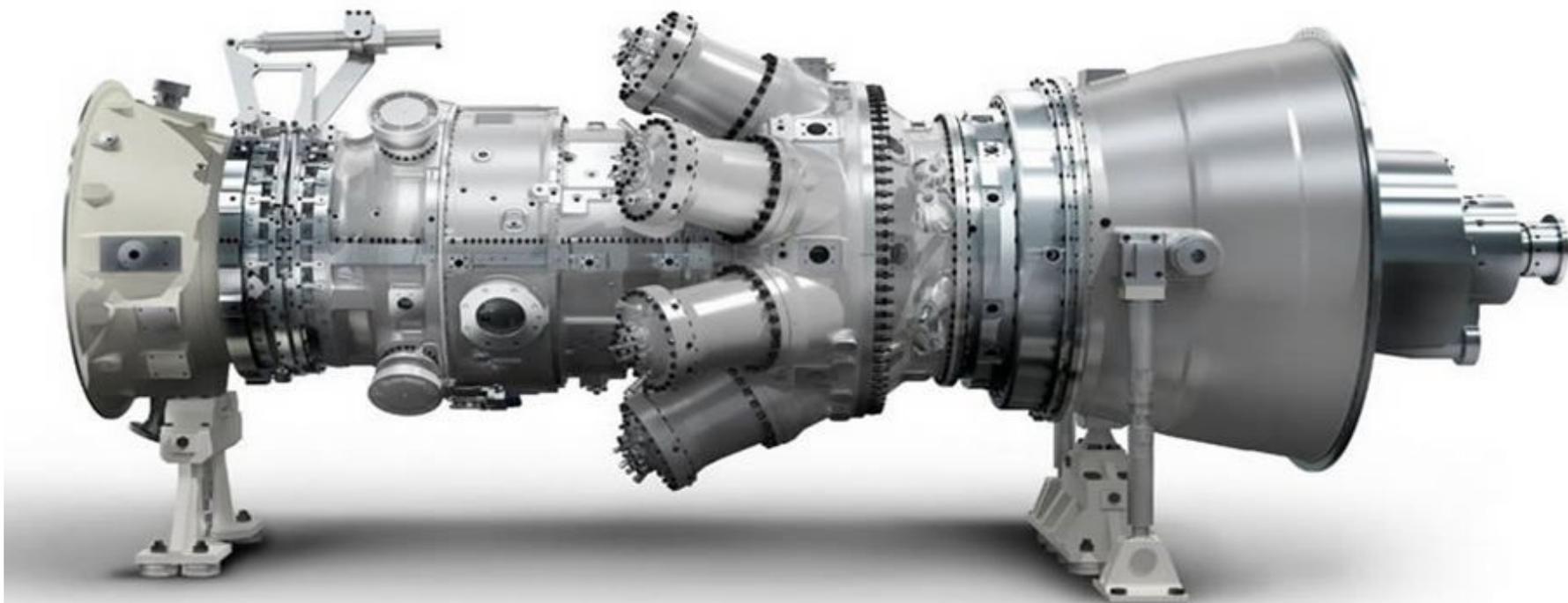
Топливосжигающие устройства

Секционная камера сгорания авиационного ГТД «Дарт»
с центробежным компрессором



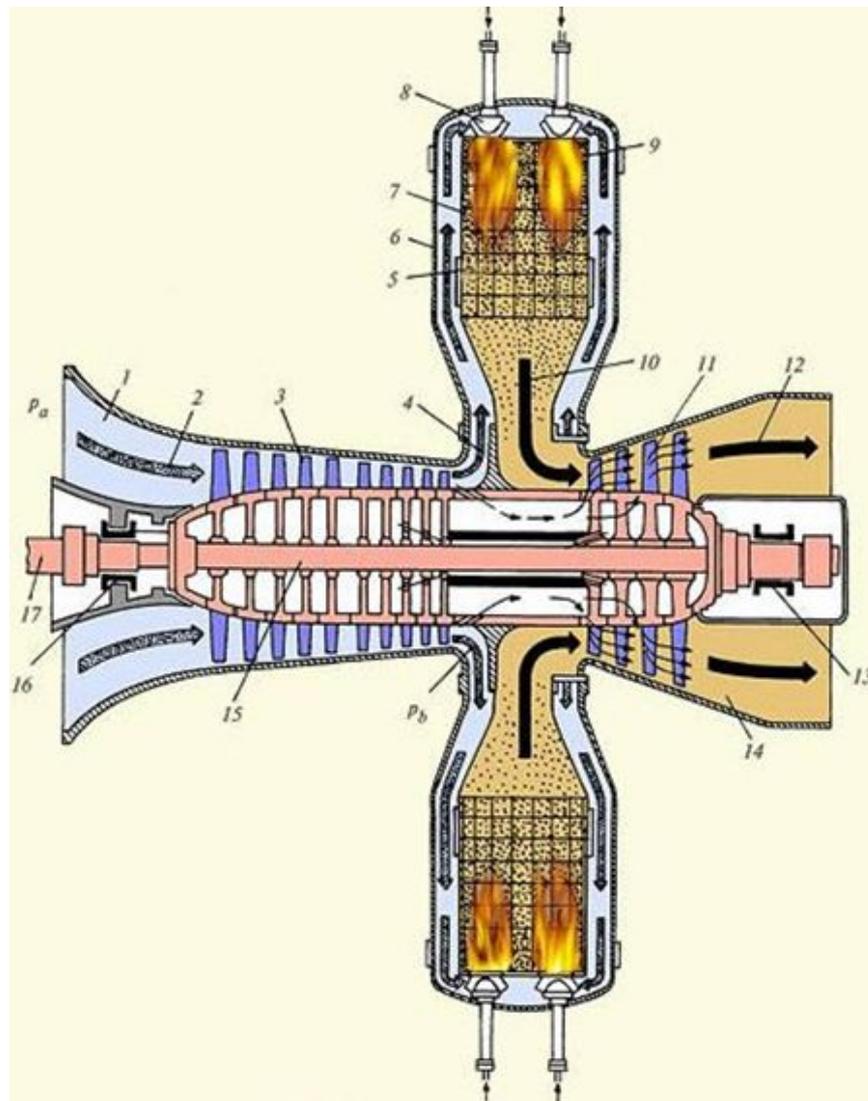
Топливосжигающие устройства

Секционная камера сгорания ГТД



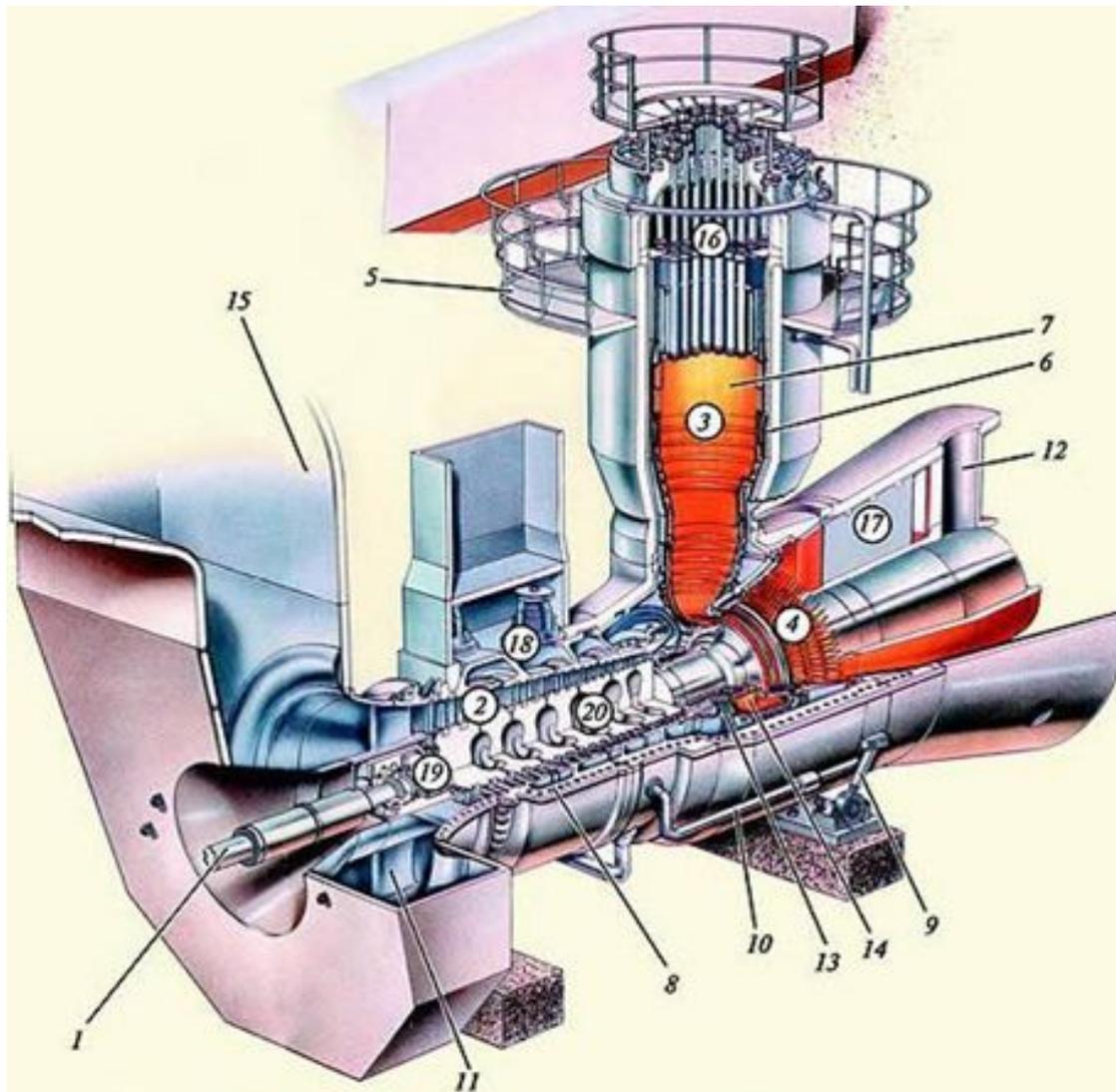
Топливосжигающие устройства

ГТУ V94.3 фирмы Сименс с двумя индивидуальными (выносными?) оппозитными камерами сгорания



Топливосжигающие устройства

ГТУ фирмы АВВ мощностью 140 МВт с одной индивидуальной (выносной) камерой сгорания



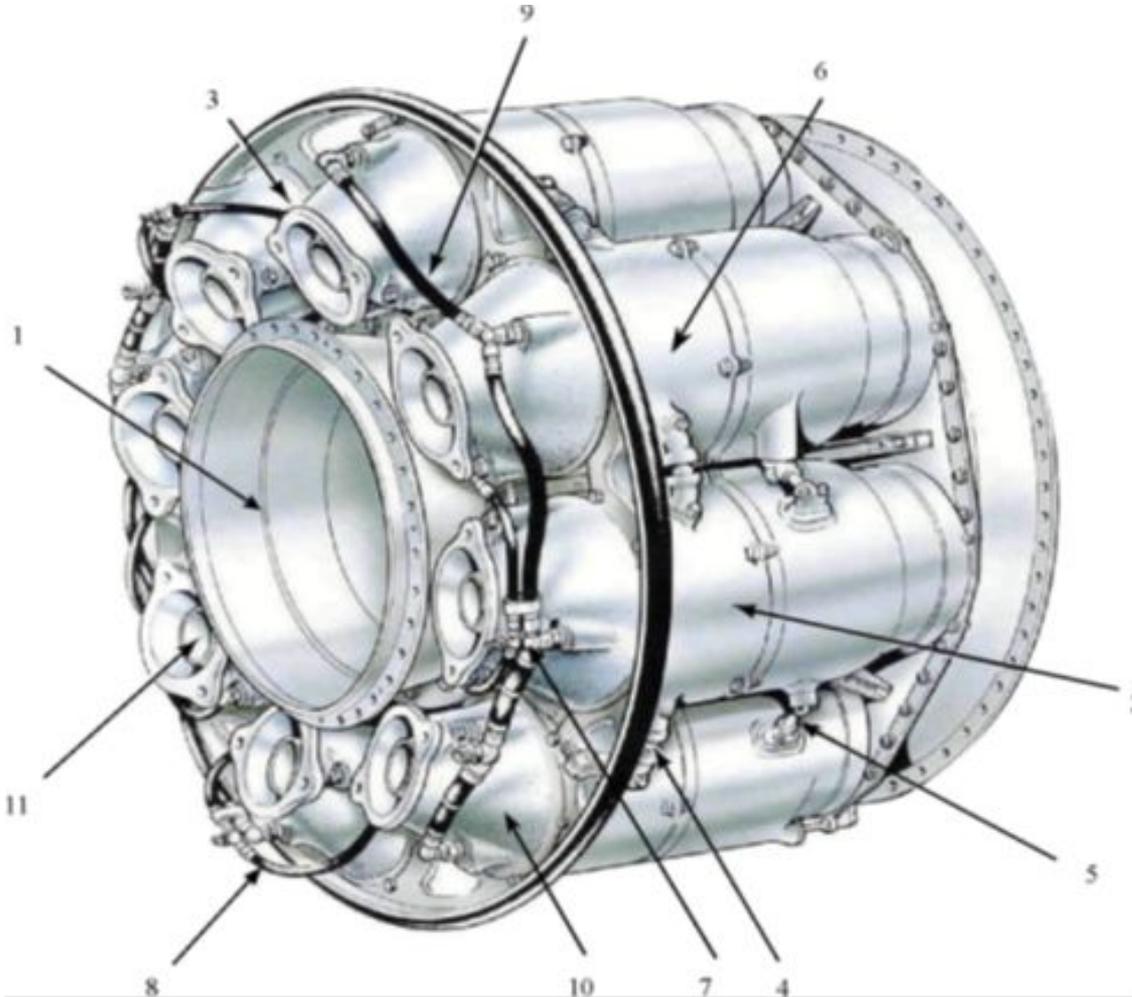
Топливосжигающие устройства

Внешний вид ГТУ типа 13Е на сборочном стенде завода



Топливосжигающие устройства

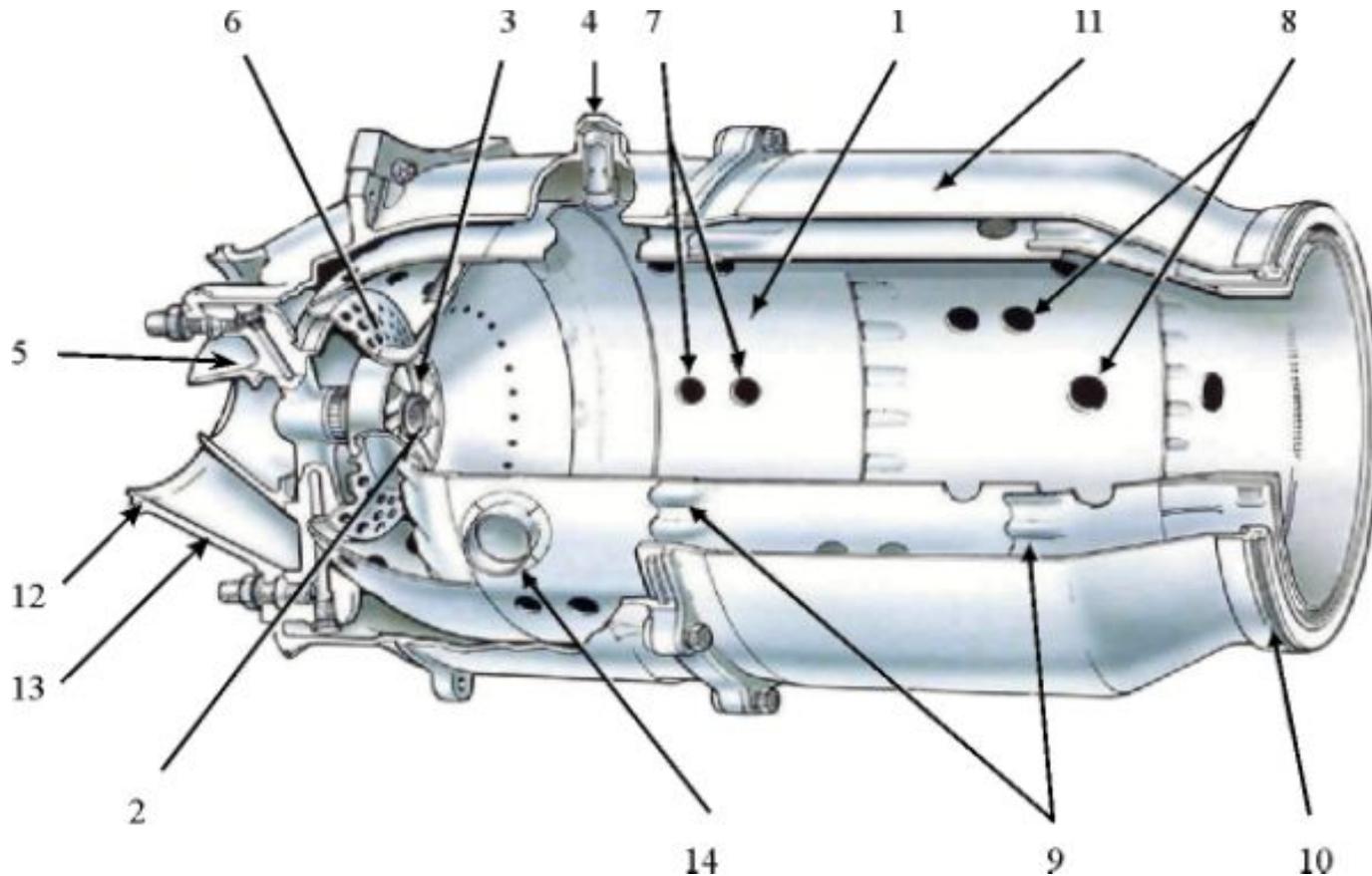
Секционная (трубчатая) камера сгорания (Rolls-Royce)



- 1 - внутренний корпус двигателя
- 2 - корпус
- 3 - фланец соединения с компрессором
- 4 - пламеперебрасывающая муфта
- 5 - дренажная труба
- 6 - противопожарная перегородка
- 7 - форсунка
- 8 - коллектор первого контура
- 9 - коллектор второго контура
- 10 - диффузор
- 11 - заборник первичного воздуха

Топливосжигающие устройства

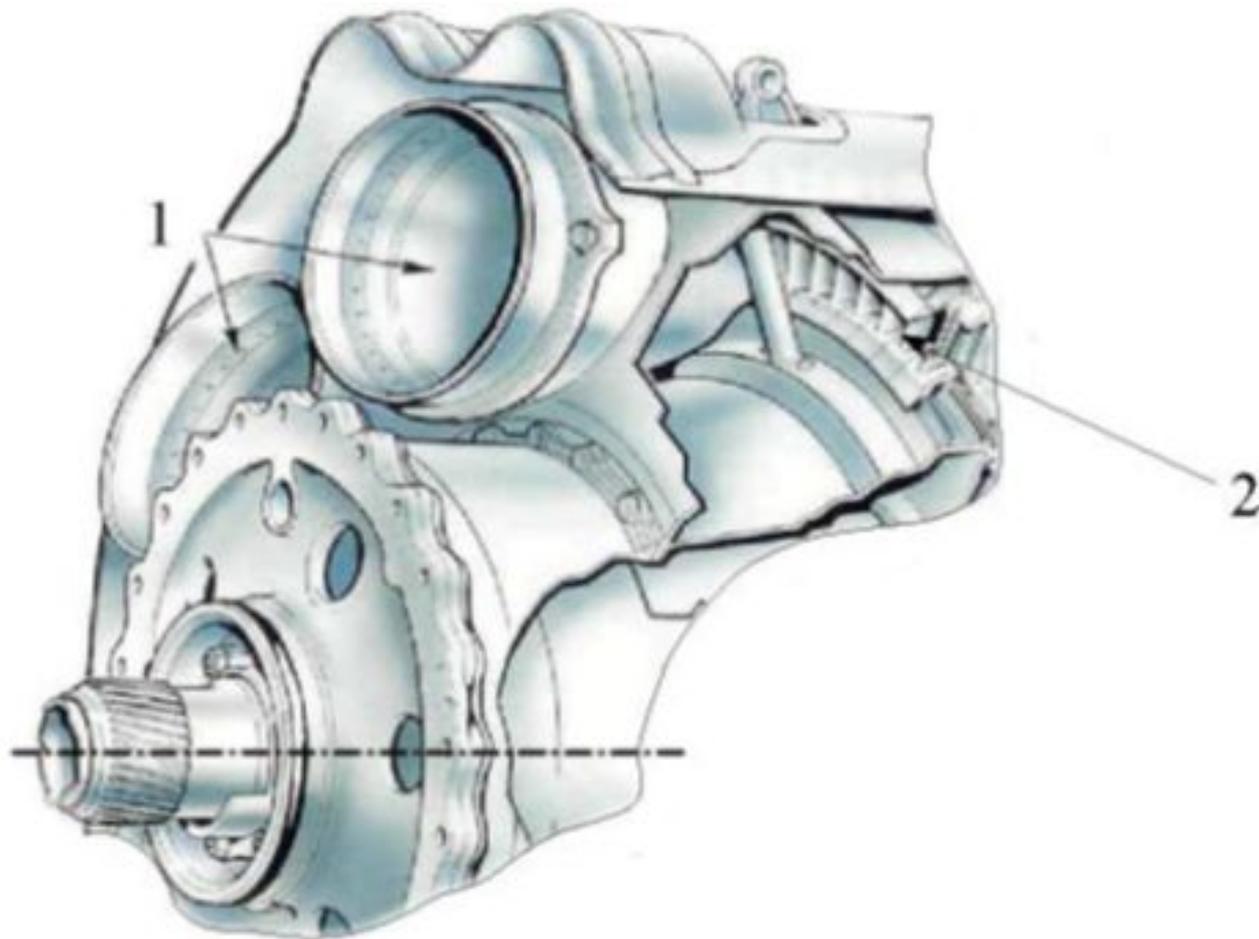
Индивидуальная трубчатая КС (Rolls-Royce)



1 - жаровая труба; 2 - форсунка; 3 - завихритель; 4 - подвеска жаровой трубы; 5 - заборник первичного воздуха; 6 - фронтное устройство; 7 - отверстия первичной зоны; 8 - отверстия зоны смешения; 9 - гофрированные щели системы охлаждения; 10 - уплотнительное кольцо; 11 - корпус; 12 - выход из компрессора присоединительный фланец; 13 - диффузор; 14 - пламеперебрасывающий патрубок

Топливосжигающие устройства

Газосборник секционной (трубчатой) КС Rolls-Royce

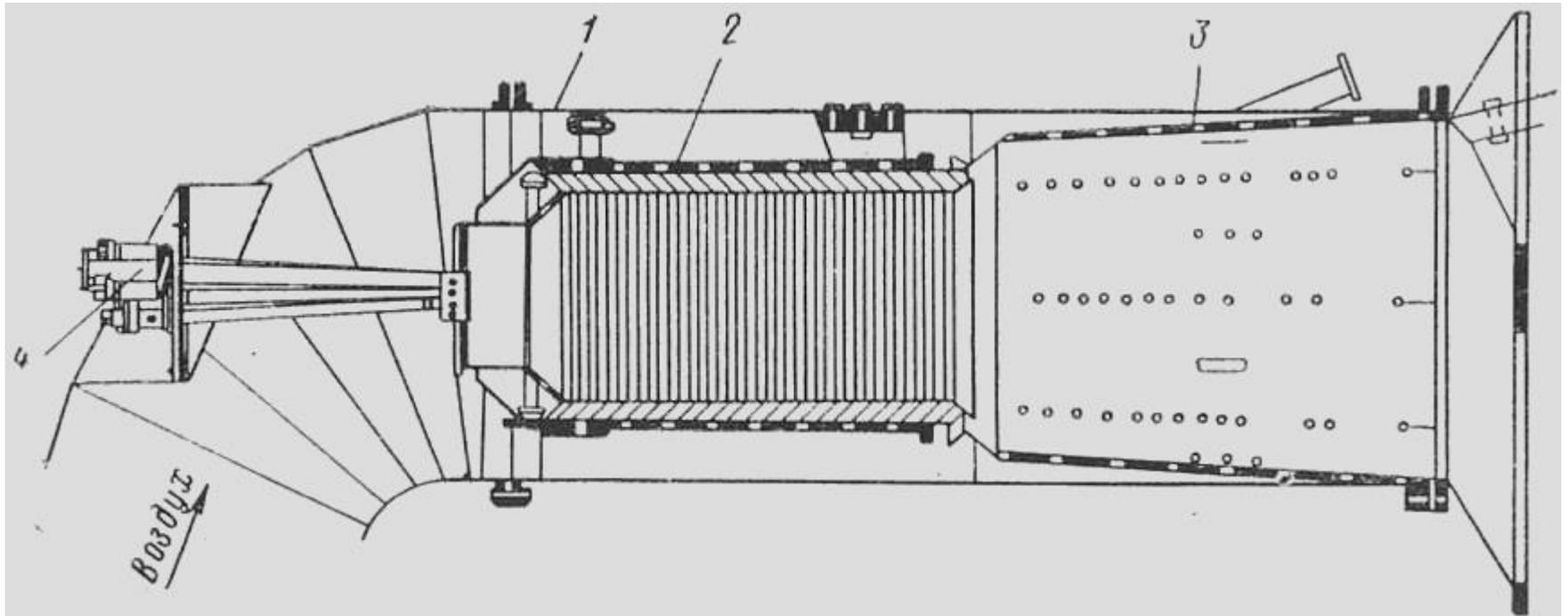


1 - индивидуальные газосборники

2 - первый сопловой аппарат турбины

Топливосжигающие устройства

Камера сгорания с жаровой трубой жалюзийного типа

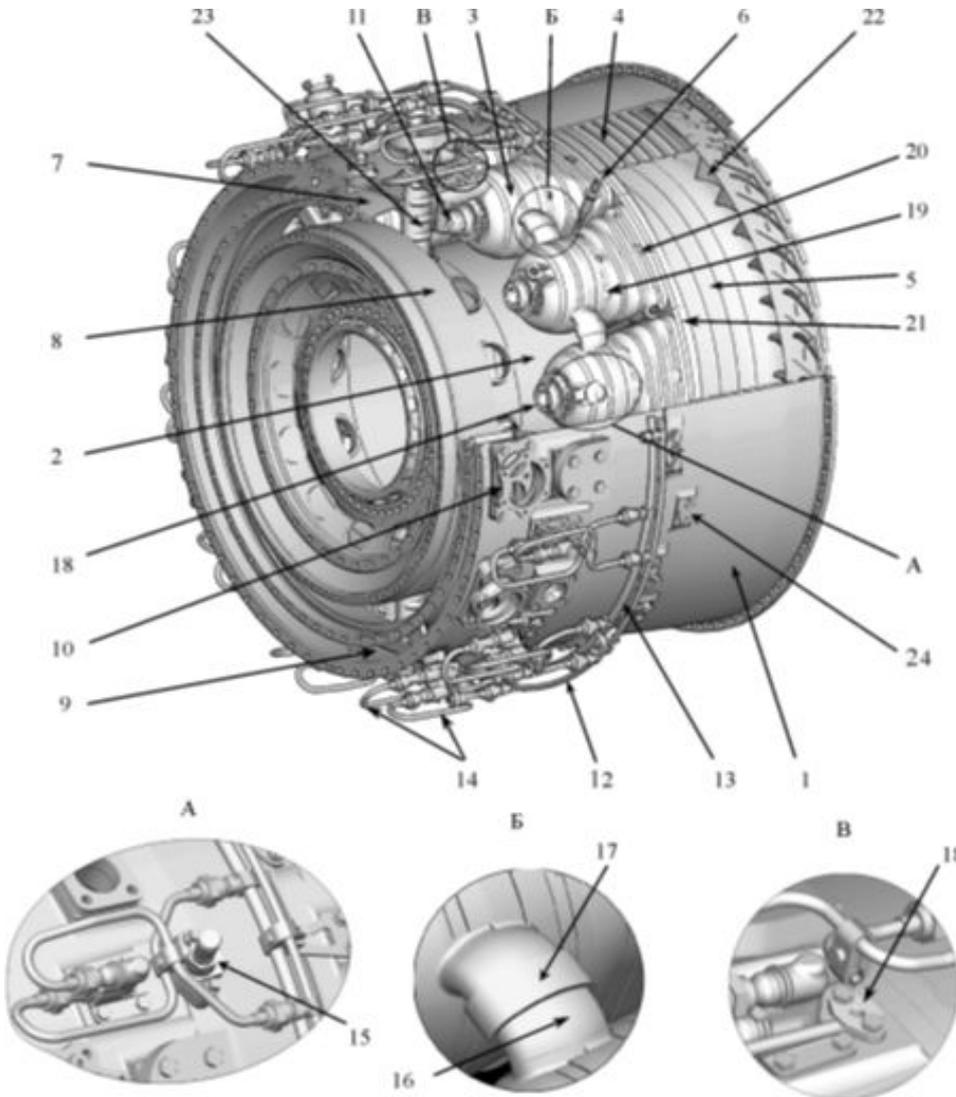


Топливосжигающие устройства

Трубчато-кольцевая камера сгорания комбинированного типа

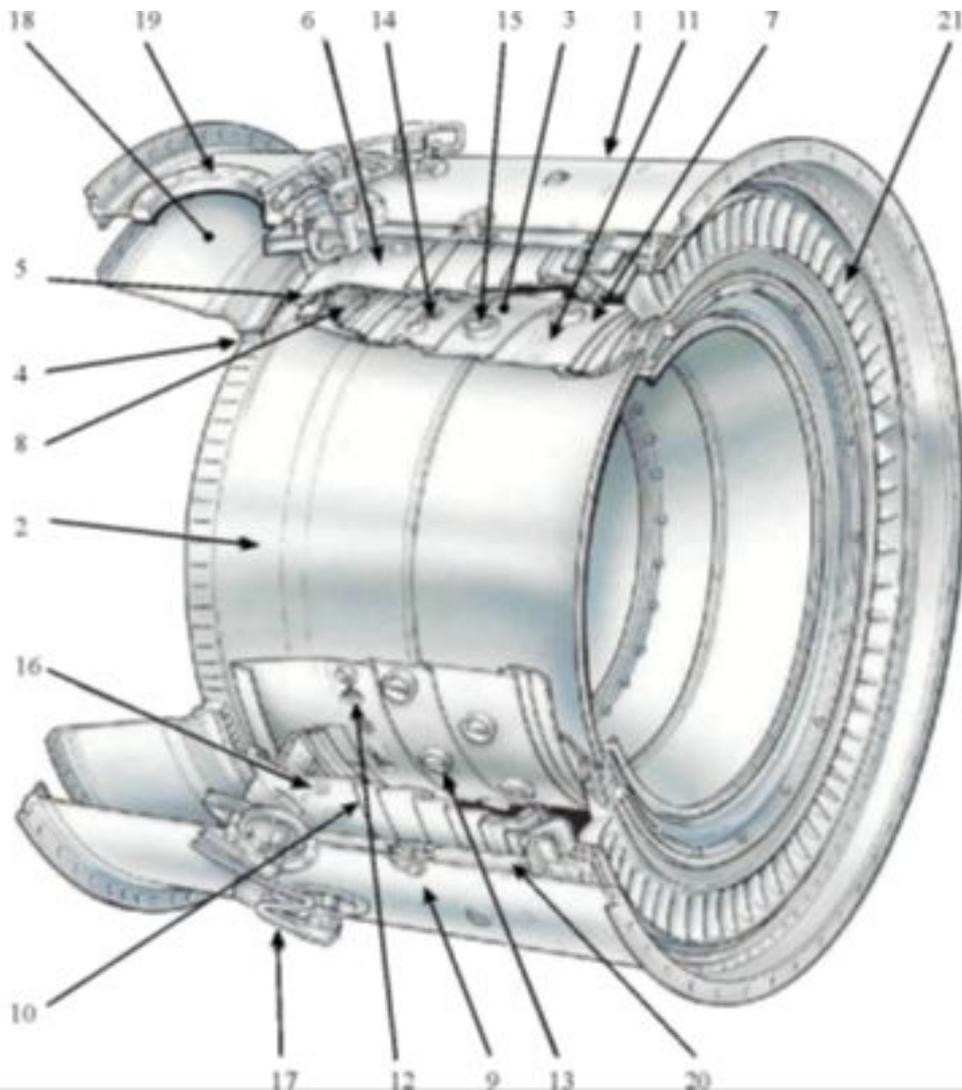
КС с 12-ю жаровыми трубами и кольцевым газосборником двигателя ПС-90А

1 - наружный корпус КС; 2 - внутренний корпус КС; 3 - жаровая труба; 4 - наружное кольцо газосборника; 5 - внутреннее кольцо газосборника; 6 - силовая стойка; 7 - наружное кольцо диффузора; 8 - внутреннее кольцо диффузора; 9 - полость отборов воздуха; 10 - фланцы отбора воздуха; 11 - форсунка; 12 - топливный коллектор первого контура; 13 - топливный коллектор второго контура; 14 - трубопроводы подвода топлива к форсунке; 15 - свечи зажигания; 16 - пламеперебрасывающий патрубок; 17 - пламеперебрасывающая муфта; 18 - подвеска жаровой трубы; 19 - отверстия первичной зоны; 20 - отверстия зоны смешения; 21 - рамочный фланец жаровой трубы; 22 - сопловой аппарат ТВД; 23 - перепускная труба; 24 - лючок осмотра



Топливосжигающие устройства

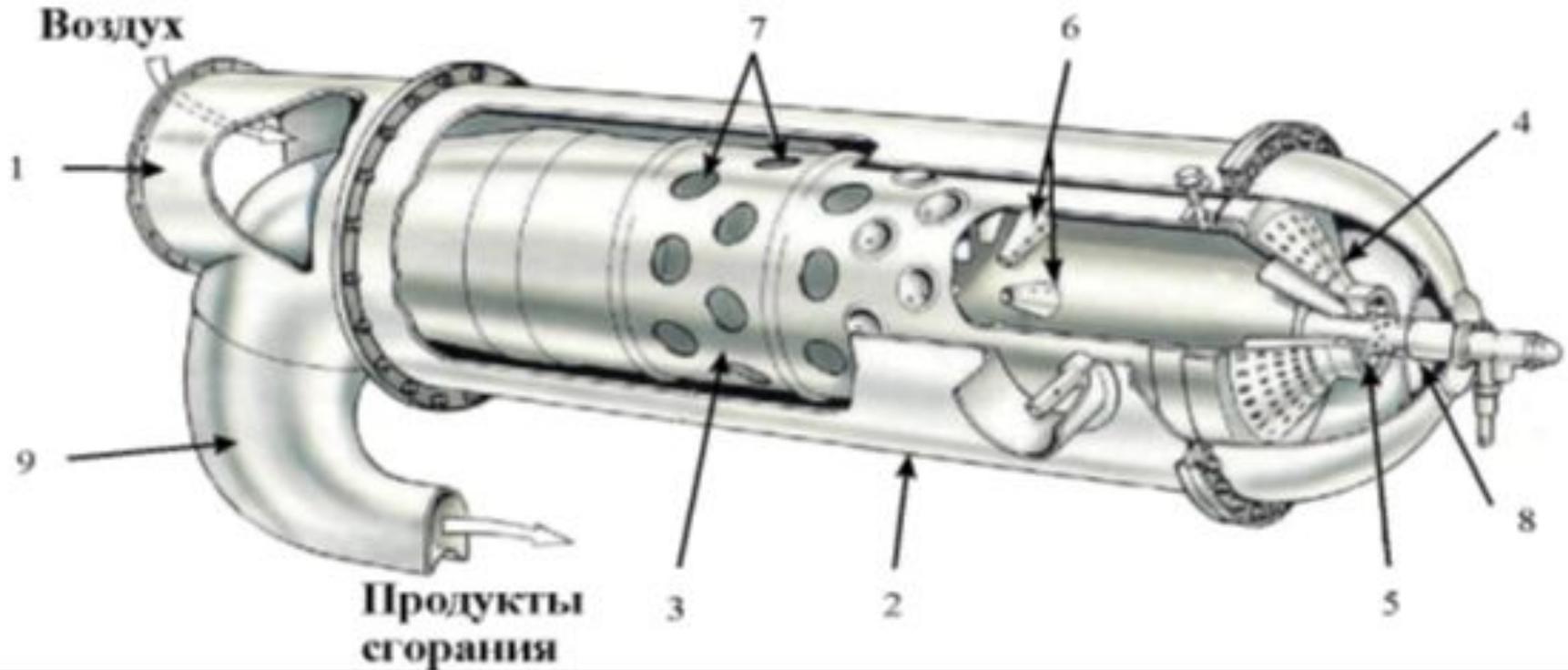
Кольцевая камера сгорания двигателя RB211 (Rolls-Royce)



1 - наружный корпус; 2 - внутренний корпус; 3 - жаровая труба; 4 - направляющий аппарат компрессора; 5 - кольцо диффузора наружное; 6 - наружная стенка жаровой трубы; 7 - внутренняя стенка жаровой трубы; 8 - фронтальная плита; 9 - подвеска жаровой трубы; 10 - пояс системы охлаждения; 11 - отверстия перфорации; 12 - отверстия подвода воздуха в первичную зону; 13 - отверстия зоны смешения; 14 - козырек; 15 - втулка; 16 - топливная форсунка; 17 - топливный коллектор; 18 - полость отборов воздуха; 19 - фланец отбора воздуха; 20 - внутренняя стенка наружного корпуса; 21 - сопловой аппарат турбины

Топливосжигающие устройства

Противоточная индивидуальная камера сгорания (Rolls-Royce)



1 - выход из компрессора - соединительный патрубок; 2 - корпус КС;
3 - жаровая труба; 4 - фронтное устройство; 5 - завихритель; 6 -
патрубки; 7- отверстия зоны смешения; 8 - форсунка; 9 - труба подвода
продуктов сгорания к турбине

Топливосжигающие устройства

Исходные данные для проектирования КС

В перечень исходных данных для выполнения проекта входят:

- общие требования к двигателю и его узлам;
- специальные требования к КС;
- результаты термодинамического расчета двигателя на всех рабочих режимах;
- характеристики воздушного потока на входе в КС (интенсивность и масштаб турбулентности, распределение давления, температуры и вектора скорости в окружном и радиальном направлениях);
- максимальное располагаемое давление и температура топлива на входе в КС;
- экстремальные соотношения «топливо/воздух» на режимах приемистости и сброса газа;
- требования к величине отборов воздуха из КС: на охлаждение турбины, противообледенительную систему, систему кондиционирования воздуха и перепусков на запуске;
- требования к количеству, расположению и проходным сечениям воздушных, масляных и сублирующих магистралей, если они проходят через КС.

Топливосжигающие устройства

Тепловой баланс и расход топлива

Относительный расход топлива в ГТУ

$$g_T = \frac{G_T}{G_B} = \frac{1}{\alpha \ell_0}$$

α – коэффициент избытка воздуха

ℓ_0 – теоретически необходимая масса воздуха для сжигания 1 кг топлива

G_T и G_B – расходы в единицу времени топлива и воздуха соответственно

Относительный расход топлива в ГТУ

$$g_T = \frac{G_T}{G_B} = \frac{1}{\alpha \ell_0}$$

α – коэффициент избытка воздуха

ℓ_0 – теоретически необходимая масса воздуха для сжигания 1 кг топлива

G_T и G_B – расходы в единицу времени топлива и воздуха соответственно

Топливосжигающие устройства

Тепловой баланс и расход топлива

Относительный расход топлива в ГТУ

$$g_T = \frac{G_T}{G_B} = \frac{1}{\alpha \ell_0}$$

α – коэффициент избытка воздуха

ℓ_0 – теоретически необходимая масса воздуха для сжигания 1 кг топлива

G_T и G_B – расходы в единицу времени топлива и воздуха соответственно

Топливосжигающие устройства

Тепловой баланс и расход топлива

Относительный расход топлива в ГТУ

$$g_T = \frac{G_T}{G_B} = \frac{1}{\alpha \ell_0}$$

α – коэффициент избытка воздуха

ℓ_0 – теоретически необходимая масса воздуха для сжигания 1 кг топлива

G_T и G_B – расходы в единицу времени топлива и воздуха соответственно

Относительный расход топлива в ГТУ

$$g_T = \frac{G_T}{G_B} = \frac{1}{\alpha \ell_0}$$

α – коэффициент избытка воздуха

ℓ_0 – теоретически необходимая масса воздуха для сжигания 1 кг топлива

G_T и G_B – расходы в единицу времени топлива и воздуха соответственно

Топливосжигающие устройства

Оценка основных размеров КС

Относительный расход топлива в ГТУ

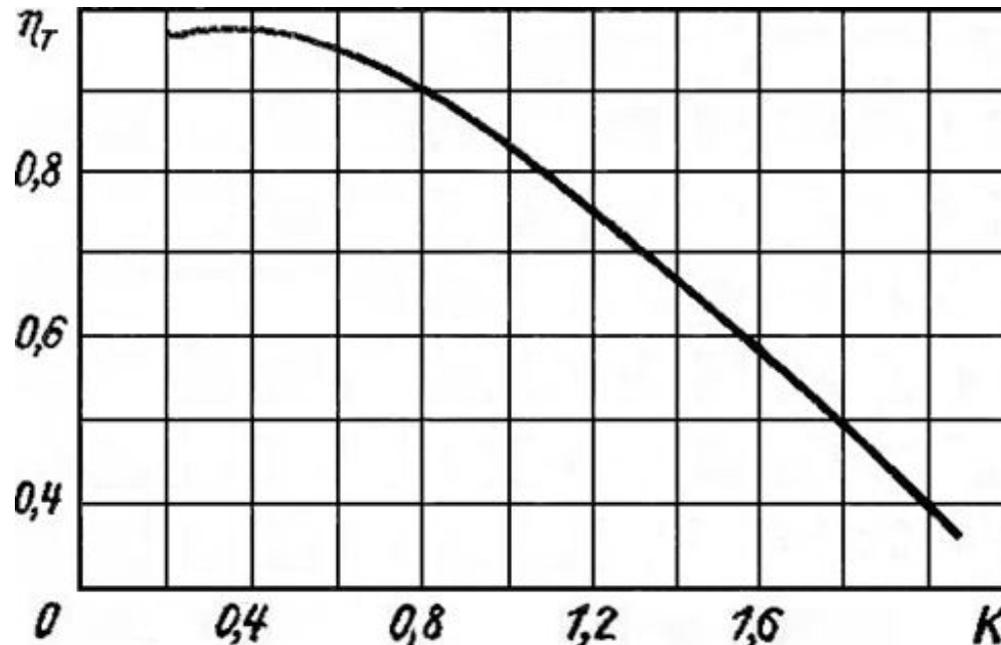
$$g_T = \frac{G_T}{G_B} = \frac{1}{\alpha \ell_0}$$

α – коэффициент избытка воздуха

ℓ_0 – теоретически необходимая масса воздуха для сжигания 1 кг топлива

G_T и G_B – расходы в единицу времени топлива и воздуха соответственно

Зависимость полноты сгорания от параметра форсирования



Топливосжигающие устройства

Оценка основных размеров КС

Относительный расход топлива в ГТУ

$$g_T = \frac{G_T}{G_B} = \frac{1}{\alpha \ell_0}$$

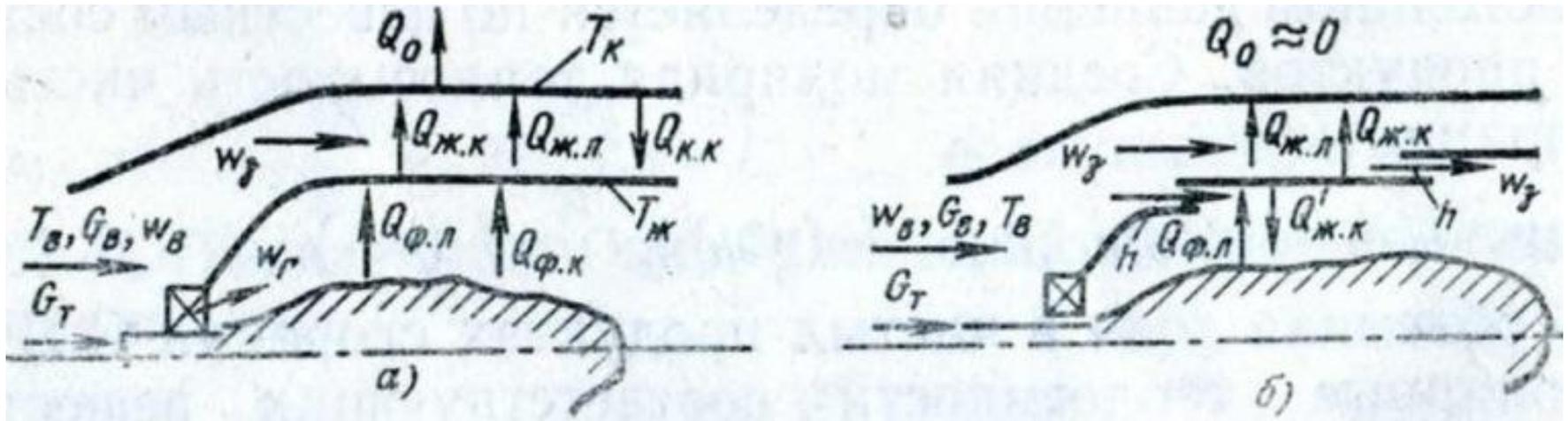
α – коэффициент избытка воздуха

ℓ_0 – теоретически необходимая масса воздуха для сжигания 1 кг топлива

G_T и G_B – расходы в единицу времени топлива и воздуха соответственно

Топливосжигающие устройства

Определение температуры стенки жаровой трубы



$$Q_{\phi} = Q_{\phi.л} + Q_{\phi.к} = Q_{ж} = Q_{ж.л} + Q_{ж.к} = Q_B + Q_0$$

Q_B – теплота, полученная охлаждающим воздухом, проходящим в зазоре между жаровой трубой и корпусом.

При $Q_0 \approx 0$ $Q_{ж.л} = Q_{к.к}$.

Следовательно, $Q_{\phi} = Q_{ж} = Q_B$ и $Q_B = Q_{ж.л} + Q_{ж.к} = Q_{к.к} + Q_{ж.к}$

Уравнение теплового баланса элемента жаровой трубы, отнесенное к единице поверхности стенки в данном сечении

$$q_{\phi.л} + q_{\phi.к} = q_{ж.л} + q_{ж.к}$$

$$q_{\phi.л} = q_{ж.л} + q_{ж.к} + q'_{ж.к}$$

Топливосжигающие устройства

Образование загрязняющих веществ при горении

При сжигании углеводородных топлив в топливосжигающих устройствах в продуктах сгорания образуются соединения, которые можно разделить на следующие группы:

- продукты полного сгорания горючих компонентов топлива – углекислый газ CO_2 , водяные пары H_2O , оксиды серы SO_2 и SO_3 ;
- компоненты неполного сгорания топлива – свободный углерод C , оксид углерода CO , различные углеводороды C_xH_y , (в том числе бензапирен $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$);
- оксиды азота NO и NO_2 ;
- золовые частицы, образующиеся из негорючих минеральных примесей.

Топливосжигающие устройства

Образование загрязняющих веществ при горении

Относительный расход топлива в ГТУ

$$g_T = \frac{G_T}{G_B} = \frac{1}{\alpha \ell_0}$$

α – коэффициент избытка воздуха

ℓ_0 – теоретически необходимая масса воздуха для сжигания 1 кг топлива

G_T и G_B – расходы в единицу времени топлива и воздуха соответственно

Топливосжигающие устройства

Образование загрязняющих веществ при горении

Массовая (г/м^3) и объемная (ppm) концентрации связаны между собой зависимостью

$$C_{mi} = K_i C_{Vi}$$

Коэффициент пересчета K_i (0°C ; 0,1013 МПа)

Вещество	NO_2	NO	SO_2	CO_2	CO	O_2	H_2S
$K_i, 10^{-3}$	2,053	1,339	2,926	1,977	1,250	1,429	1,539

Массовую и объемную концентрации необходимо пересчитывать на стандартные условия в соответствии с ГОСТ Р50831-95 «Нормативы удельных выбросов в атмосферу» (М.: Изд-во стандартов, 1996).

Для паровых и водогрейных котлов такими условиями являются $\alpha_{yx} = 1,4$; $T = 0^\circ\text{C}$; $p = 0,1013$ МПа. Для ГТУ концентрацию вредных веществ определяют при объемной концентрации кислорода в газах $\text{O}_2 = 15\%$.

Массовый выброс вредных веществ в окружающую среду в единицу времени обозначают M_i , г/с. Этот же выброс за месяц, квартал, год называют валовым выбросом, и измеряют, например, в тоннах в год.

Дымность обозначают D .

Топливосжигающие устройства

Образование загрязняющих веществ при горении

Предельно допустимые концентрации вредных веществ

Выброс	ПДК токсичных составляющих, мг/м ³						
	Сажа С	Оксид угле- рода СО	Угле- водо- роды С _x Н _y	Бенза- пирен С ₂₀ Н ₁₂	Оксид серы SO ₂	Оксиды азота	
						NO	NO ₂
На рабочем месте	3,5	20	300	0,000150	—	30	9
В воздух населенных пунктов	0,05/ 0,15*	1/3	2,5/5	0,000001/ —	0,05/ 0,50		0,085/ 0,085

* среднесуточные значения / разовые максимальные

Топливосжигающие устройства

Образование загрязняющих веществ при горении

Относительный расход топлива в ГТУ

$$g_T = \frac{G_T}{G_B} = \frac{1}{\alpha l_0}$$

α – коэффициент избытка воздуха

l_0 – теоретически необходимая масса воздуха для сжигания 1 кг топлива

G_T и G_B – расходы в единицу времени топлива и воздуха соответственно

Топливосжигающие устройства

Образование загрязняющих веществ при горении

Относительный расход топлива в ГТУ

$$g_T = \frac{G_T}{G_B} = \frac{1}{\alpha \ell_0}$$

α – коэффициент избытка воздуха

ℓ_0 – теоретически необходимая масса воздуха для сжигания 1 кг топлива

G_T и G_B – расходы в единицу времени топлива и воздуха соответственно

Топливосжигающие устройства

Образование загрязняющих веществ при горении

Относительный расход топлива в ГТУ

$$g_T = \frac{G_T}{G_B} = \frac{1}{\alpha \ell_0}$$

α – коэффициент избытка воздуха

ℓ_0 – теоретически необходимая масса воздуха для сжигания 1 кг топлива

G_T и G_B – расходы в единицу времени топлива и воздуха соответственно

Топливосжигающие устройства

Образование загрязняющих веществ при горении

Образование NO происходит в соответствии с цепным механизмом Я.Б. Зельдовича:



Процесс образования окиси азота эндотермичен и идет с заметной скоростью только при температурах выше 1800 К, поэтому NO образуется только в горячих зонах и достигает максимальной концентрации на режиме наибольшей тяги.

Окисление NO до NO₂ происходит при снижении температуры газа. Практический диапазон температуры газа, при которой образуется двуокись азота, от 400 до 900 К.

Установлено, что выброс NO_x экспоненциально возрастает с повышением температуры пламени согласно соотношению

$$\text{NO}_x \propto \exp(0,009T_{\text{пл}})$$

Топливосжигающие устройства

Образование загрязняющих веществ при горении

Относительный расход топлива в ГТУ

$$g_T = \frac{G_T}{G_B} = \frac{1}{\alpha \ell_0}$$

α – коэффициент избытка воздуха

ℓ_0 – теоретически необходимая масса воздуха для сжигания 1 кг топлива

G_T и G_B – расходы в единицу времени топлива и воздуха соответственно

Топливосжигающие устройства

Образование загрязняющих веществ при горении

Относительный расход топлива в ГТУ

$$g_T = \frac{G_T}{G_B} = \frac{1}{\alpha \ell_0}$$

α – коэффициент избытка воздуха

ℓ_0 – теоретически необходимая масса воздуха для сжигания 1 кг топлива

G_T и G_B – расходы в единицу времени топлива и воздуха соответственно

Топливосжигающие устройства

Образование загрязняющих веществ при горении

Уровень эмиссии токсичных веществ турбовального двигателя

Аллисон 250-C18

Камера сгорания и норма ЕРА	Эмиссия токсичных компонентов за цикл, 10^3 кг/кВт-ч			SN
	СН	СО	NO _x	
Серийная	9,440	60,20	2,77	34
С предкамерой	0,247	6,23	4,08	32,5
Норма ЕРА	2,990	16,59	7,95	50

Результаты измерения уровней эмиссии токсичных веществ с
выхлопными газами для двигателя Аллисон 250-C18

Относительная частота вращения	Содержание токсичных веществ в миллионных долях			SN
	НС в пересчете на C ₃ H ₈	СО	NO _x в пересчете на NO ₂	
0,2	55	740	28	10
0,4	18	510	40	18
0,6	8	370	55	24
0,8	2	250	72	29
1,0	2	180	91	34

Топливосжигающие устройства

Образование загрязняющих веществ при горении

Газотурбинная установка ОАО "Рыбинские моторы» НПО «Сатурн» ГТЭ-110

Концентрация вредных веществ в отработанных газах при работе установки при нагрузке от 0,5 до 1,0 номинальной на магистральном газе (при условии объемной концентрации $O_2=15\%$)

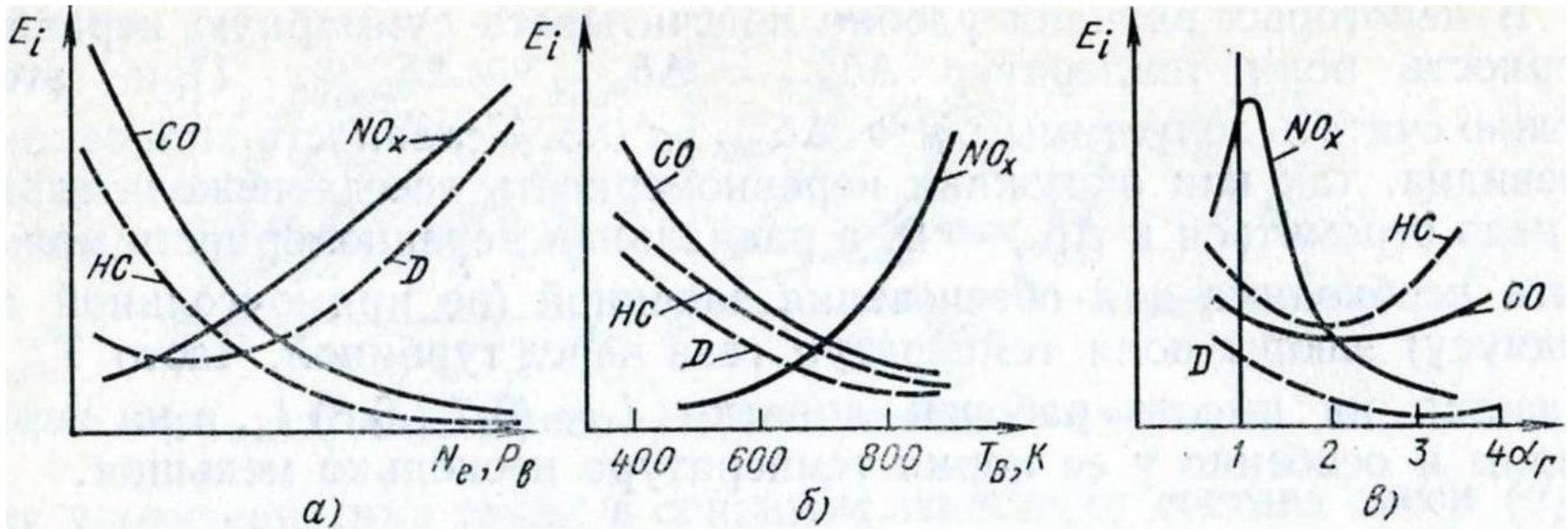
ГОСТ Р ИСО 11042-1-2001

Сумма NO и NO ₂ в пересчете на NO ₂	мг/нм ³	50
Диоксид азота NO ₂	мг/нм ³	
Оксид углерода CO	мг/нм ³	150
Диоксид углерода CO ₂	мг/нм ³	30000
Оксиды серы SO _x : сумма SO ₂ и SO ₃ , представляемая как SO ₂	мг/нм ³	Отсутствуют
Углеводороды CH: сумма всех несгоревших или частично сгоревших углеводородов в пересчете на метан	мг/нм ³	Отсутствуют
Летучие органические соединения: сумма всех углеводородов за вычетом CH ₄ и C ₂ H ₆ в пересчете на метан	мг/нм ³	Отсутствуют
Аммиак NH ₃	мг/нм ³	Отсутствуют

Топливосжигающие устройства

Образование загрязняющих веществ при горении

Влияние различных факторов на уровень эмиссии E_i основных загрязняющих веществ в продуктах сгорания



а – мощность ГТД N_e и давление p_B

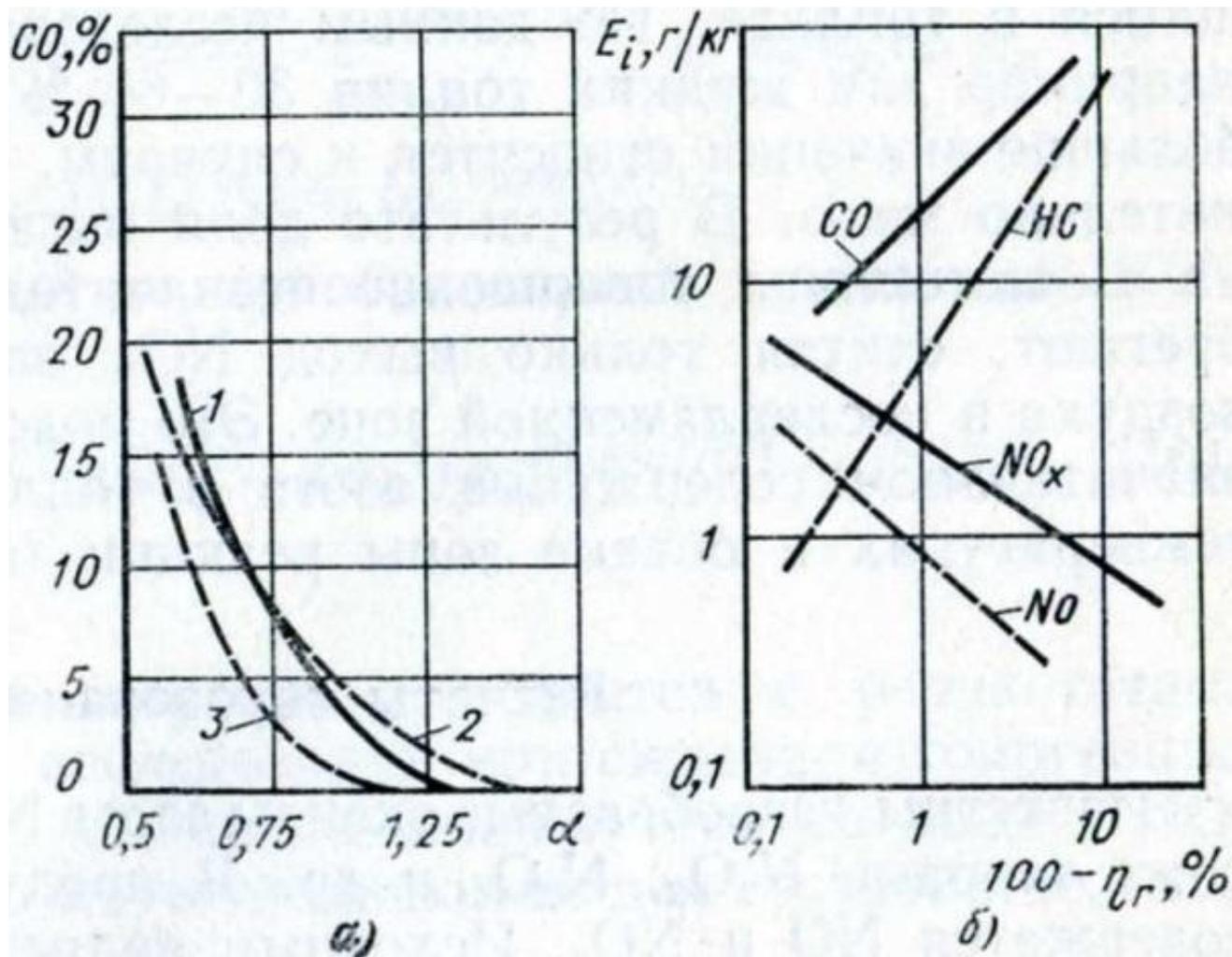
б – температура T_B воздуха, поступающего в камеру сгорания

в – коэффициент α_r избытка воздуха в зоне горения

Топливосжигающие устройства

Образование загрязняющих веществ при горении

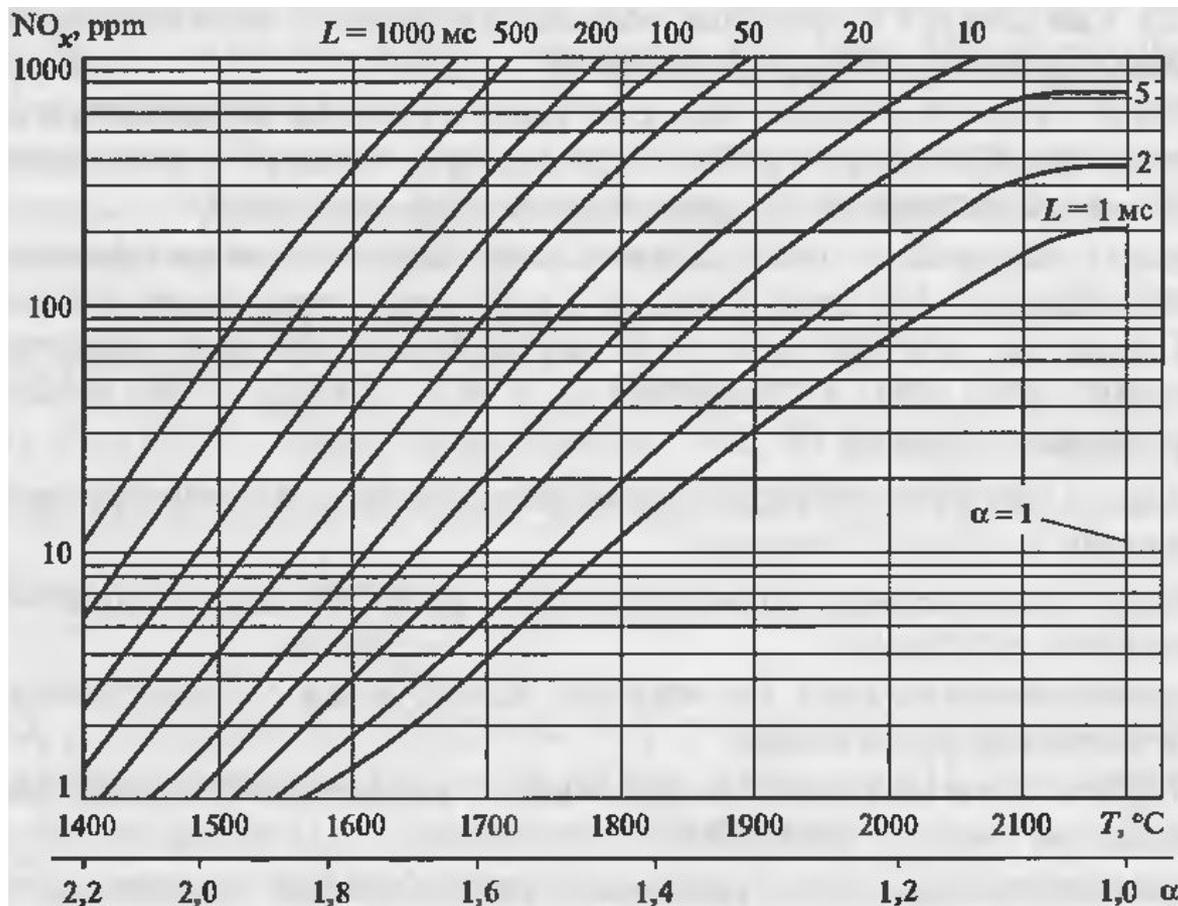
Характеристики токсичности газов



Топливосжигающие устройства

Образование загрязняющих веществ при горении

Зависимость образования термических оксидов азота от температуры газов и времени пребывания этих газов в зоне максимальных температур (для сухих газов при объемной концентрации кислорода 15 %, топливо – природный газ, температура воздуха после компрессора – 400°С)



L , мс – время пребывания газов в зоне максимальных температур
 $L = 150$ мс – в выносных КС
 $L = 30$ мс – в кольцевых КС
 $L = 15$ мс – для КС нового поколения

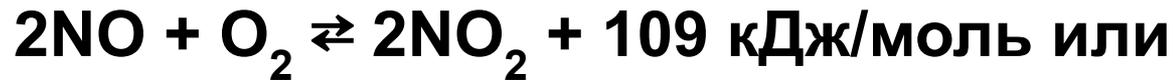
Топливосжигающие устройства

Образование загрязняющих веществ при горении

Образование оксида NO происходит по схеме



Воздух, нагретый до 2273 К, в равновесном состоянии содержит около 1,5% NO, а при 3280 К – 5,3% по объему. Оксид азота NO, соединяясь с кислородом, дает NO₂:



При повышенных температурах (более 870 К) равновесие в основном выражается левой частью уравнения.

При понижении температуры образование NO₂ резко возрастает, при 470...530 К и ниже происходит прямая реакция образования NO₂.

Топливосжигающие устройства

Образование загрязняющих веществ при горении

Основной механизм образования NO включает две реакции:

k_1



k_3

k_1



k_4

Тогда кинетическое уравнение

$$d\text{NO}/d\tau = k_1 \text{N}_2 \text{O} + k_2 \text{O}_2 \text{N} - k_3 \text{NO} \text{N} - k_4 \text{NO} \text{O}$$

где N_2 ; NO ; O ; O_2 – мгновенные концентрации компонентов газовой смеси, г/л; k_i – константы скоростей химических реакций.

Топливосжигающие устройства

Образование загрязняющих веществ при горении

Относительный расход топлива в ГТУ

$$g_T = \frac{G_T}{G_B} = \frac{1}{\alpha \ell_0}$$

α – коэффициент избытка воздуха

ℓ_0 – теоретически необходимая масса воздуха для сжигания 1 кг топлива

G_T и G_B – расходы в единицу времени топлива и воздуха соответственно

Топливосжигающие устройства

Образование загрязняющих веществ при горении

Относительный расход топлива в ГТУ

$$g_T = \frac{G_T}{G_B} = \frac{1}{\alpha \ell_0}$$

α – коэффициент избытка воздуха

ℓ_0 – теоретически необходимая масса воздуха для сжигания 1 кг топлива

G_T и G_B – расходы в единицу времени топлива и воздуха соответственно

Топливосжигающие устройства

Способы снижения эмиссии вредных веществ

Для обеспечения минимального уровня эмиссии вредных веществ при организации процесса горения в КС любого типа необходимо обеспечить следующие условия:

- достаточно мелкое дробление частиц топлива;
- высокую однородность смеси перед подачей в КС;
- максимально возможную скорость реакции;
- температуры в зоне горения 700...1500 °С;
- отсутствие локальных высокотемпературных зон;
- постоянного во всем диапазоне работы двигателя состава смеси ($\alpha = \text{const}$) в зоне горения;
- оптимальное распределение вторичного воздуха;
- оптимальный состав смеси в смесительных устройствах или в первичной зоне КС.

Топливосжигающие устройства

Способы снижения эмиссии вредных веществ

Мероприятия для существующих конструкций камер сгорания уменьшающие выход NO_x :

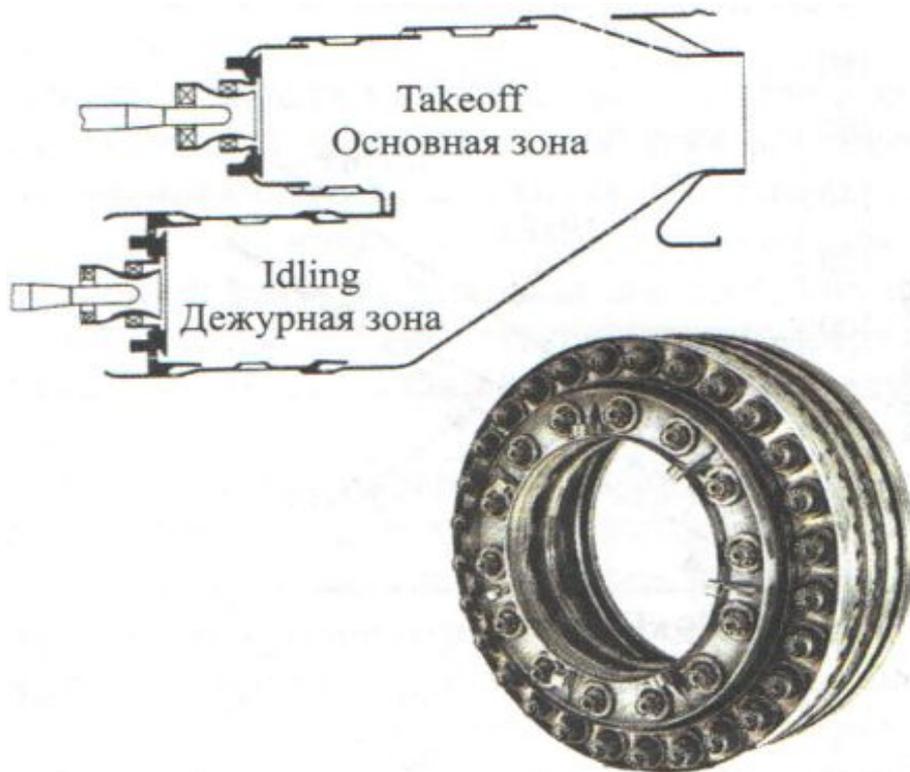
- увеличение коэффициента α_r избытка воздуха в зоне горения.
- улучшение распыливания топлива и перемешивания его с воздухом.
- впрыскивание воды (пара) или использованием топливо-водяной смеси.
- использование конструкционных материалов-катализаторов.
- введением специальных присадок в топливо.

Топливосжигающие устройства

Способы снижения эмиссии вредных веществ

К основным конструктивным схемам низкоэмиссионных КС можно отнести следующие схемы:

- двухзонные
- изменяемой геометрии
- многофорсуночные
- с гомогенизацией топливоздушнной смеси
- каталитические.

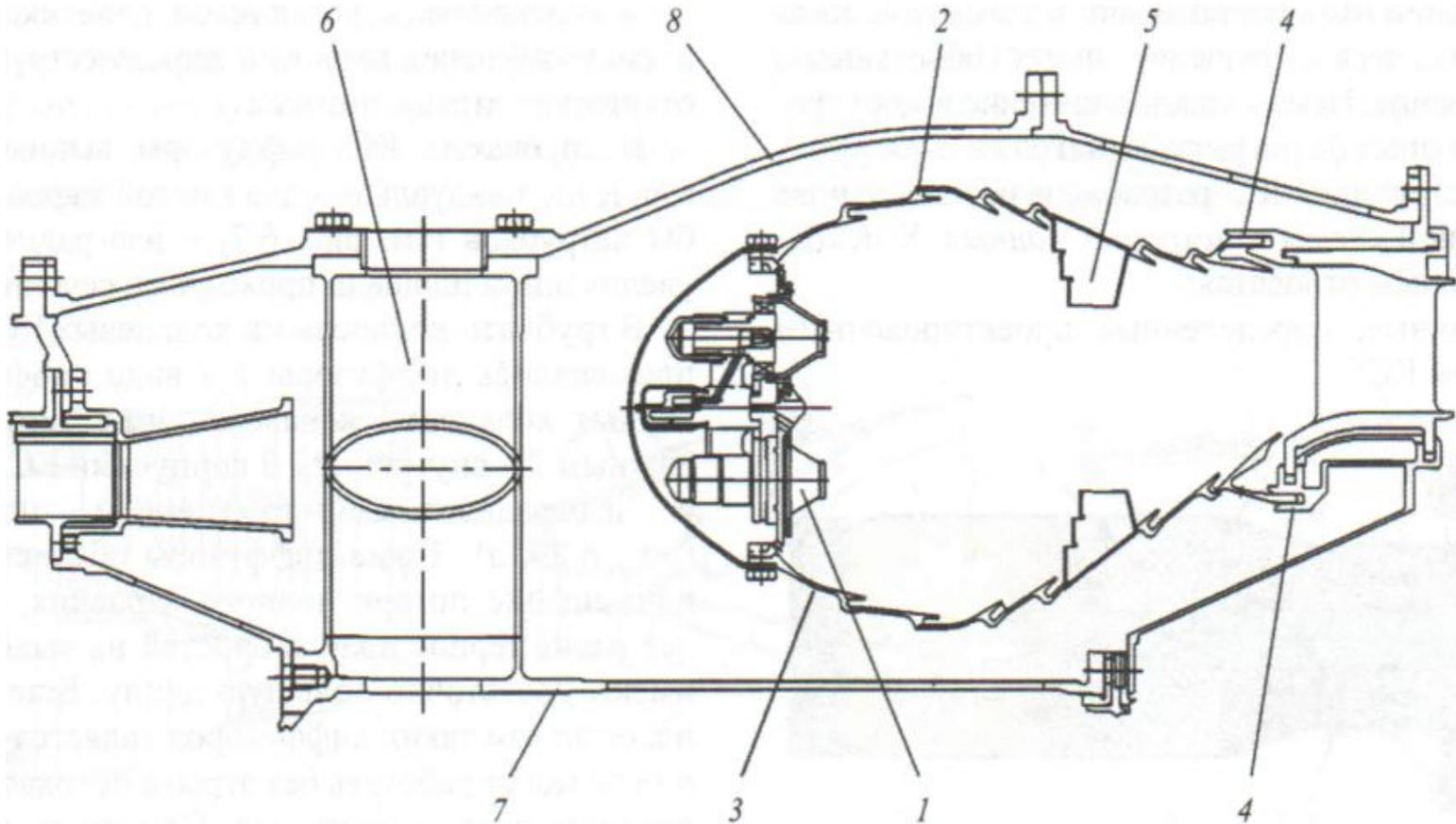


Двухзонная КС фирмы Snesta

Топливосжигающие устройства

Способы снижения эмиссии вредных веществ

Многофорсуночная КС

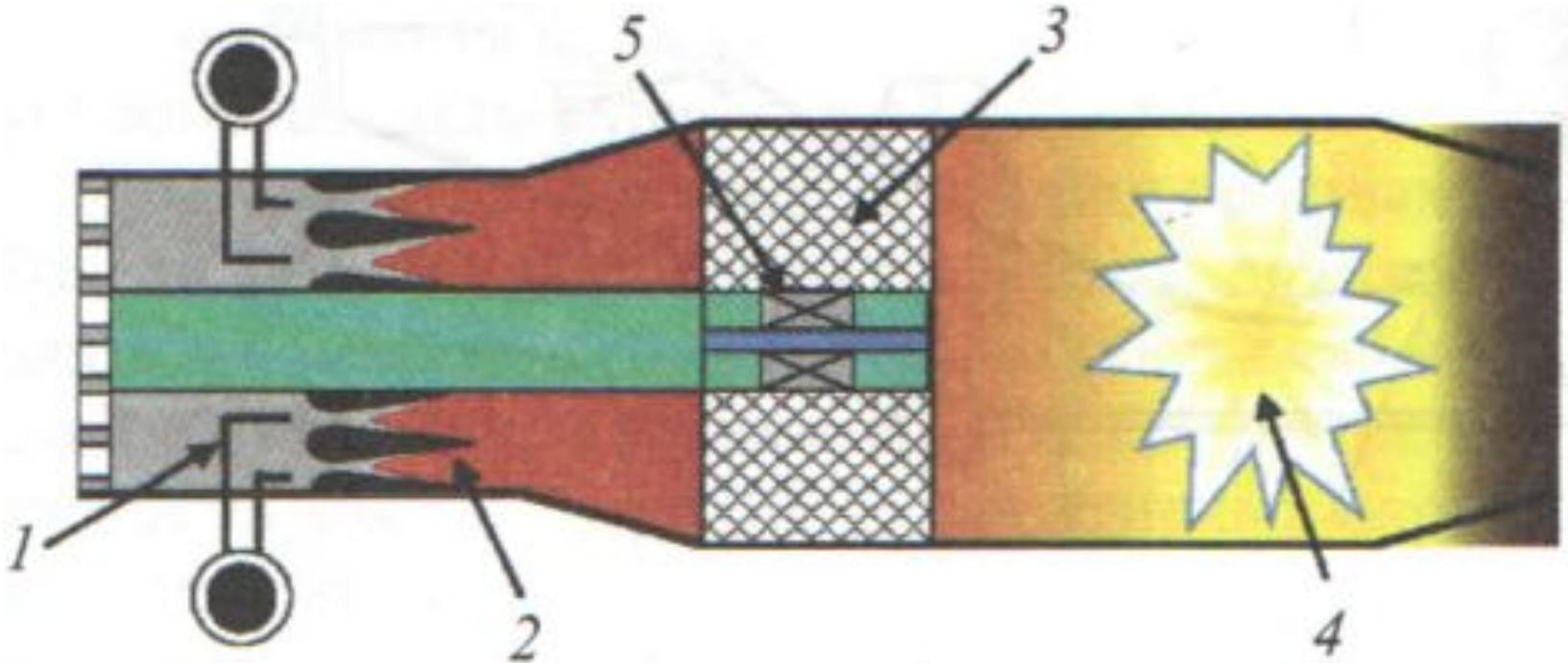


1 – форсуночный модуль (72 шт.); 2 – наружная стенка жаровой трубы; 3 – внутренняя стенка жаровой трубы; 4 – телескопическое соединение жаровой трубы с первым сопловым аппаратом турбины; 5 – патрубки для подвода воздуха в зону разбавления; 6 – силовая стойка; 7 – корпус внутренней КС; 8 – корпус наружной КС.

Топливосжигающие устройства

Способы снижения эмиссии вредных веществ

Схема каталитической КС



- 1 – топливная форсунка
- 2 – зона предварительного смешения
- 3 – катализатор
- 4 – зона горения за катализатором
- 5 – впрыск топлива, минуя катализатор

Топливосжигающие устройства

Способы снижения эмиссии вредных веществ

Меры при эксплуатации ГТД авиационного типа в системе наземной установки:

- 1) отвод продуктов сгорания от места нахождения эксплуатирующего персонала;
- 2) выбор оптимального режима работы двигателя;
- 3) замену топливных центробежных форсунок на форсунки с мероприятиями по воздушному распылу;
- 4) подвод на режиме малого газа сжатого воздуха во второй контур топливной форсунки для улучшения распыла топлива;
- 5) увеличение частоты вращения ротора и температурного режима двигателя за счет дополнительного отбора воздуха за компрессором;
- 6) впрыск воды в камеру сгорания для снижения температуры газа в зоне горения и для снижения эмиссии окислов азота;
- 7) подогрев воздуха на входе в двигатель;
- 8) рациональный выбор вида топлива.

Топливосжигающие устройства

Аппараты для сухой механической очистки газов

Схема радиального пылеуловителя

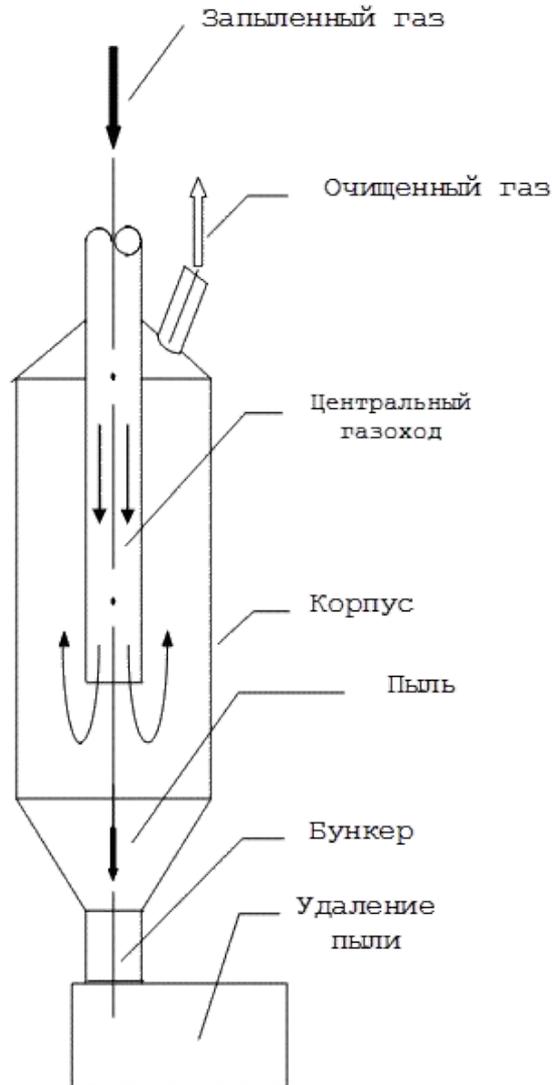
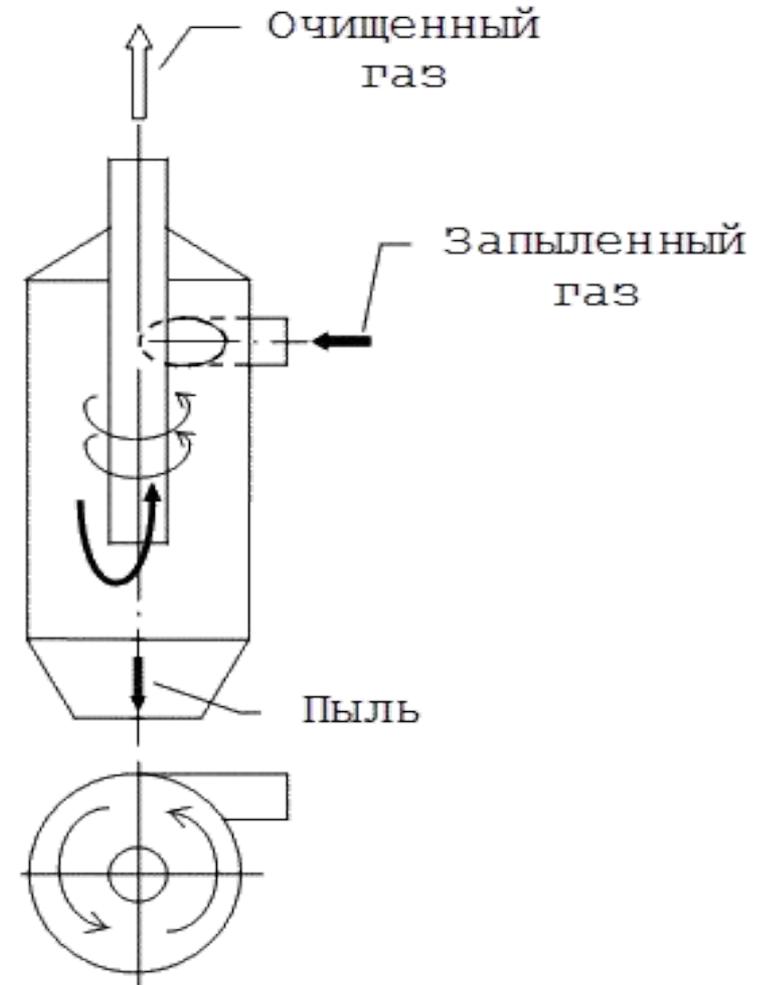


Схема циклона



Топливосжигающие устройства

Способы снижения эмиссии вредных веществ

Фильтр тканевый

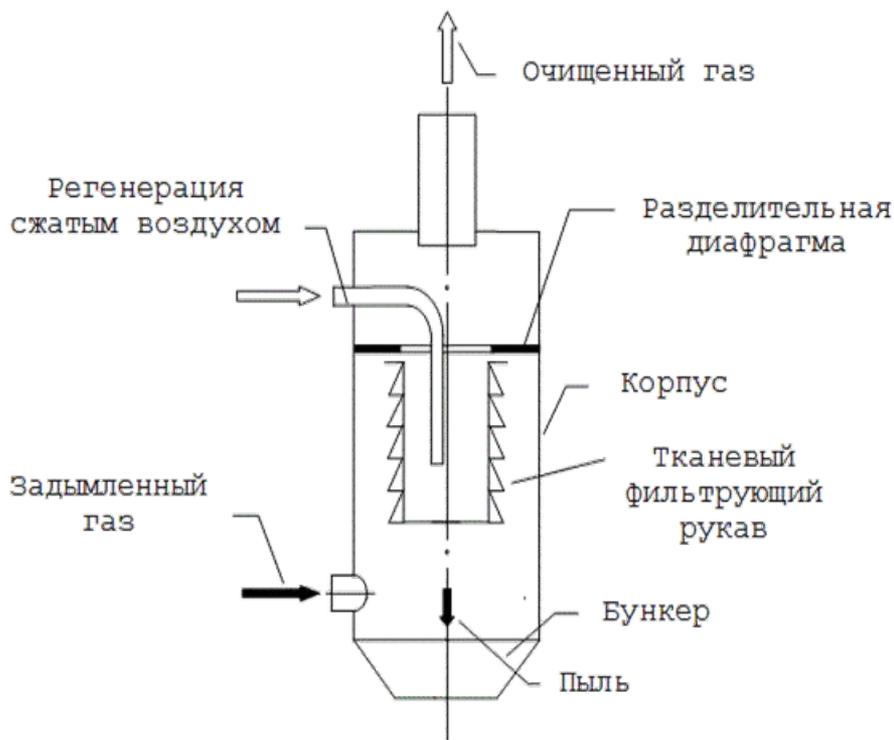
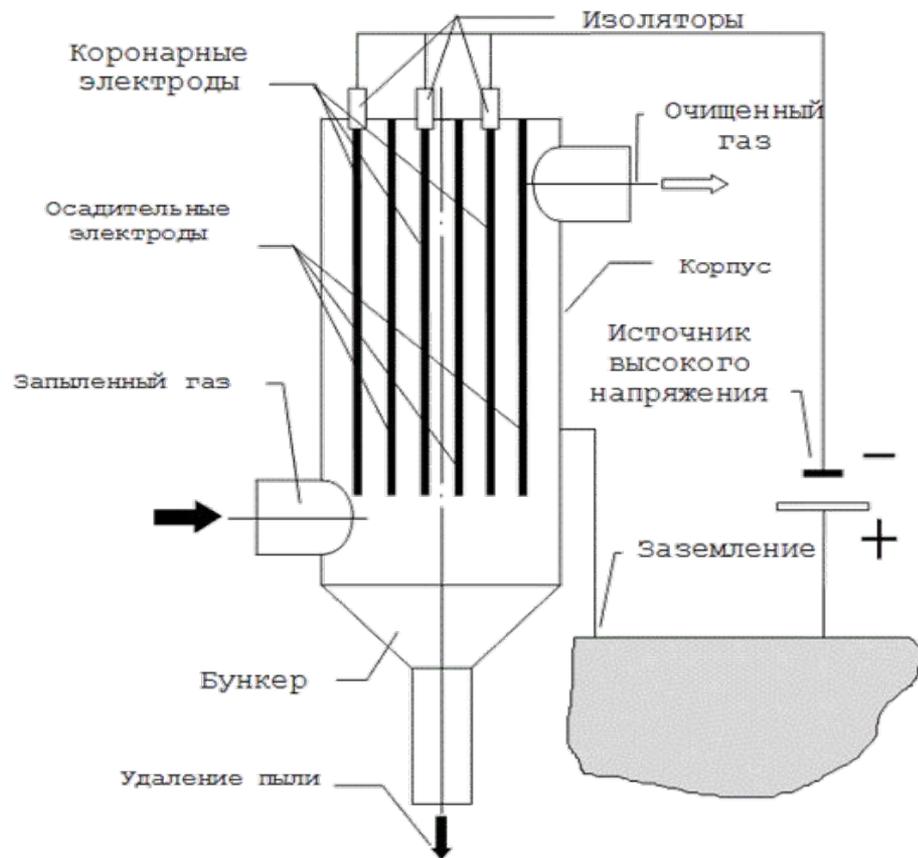


Схема электрофильтра



Топливосжигающие устройства

Способы снижения эмиссии вредных веществ

Схема скруббера

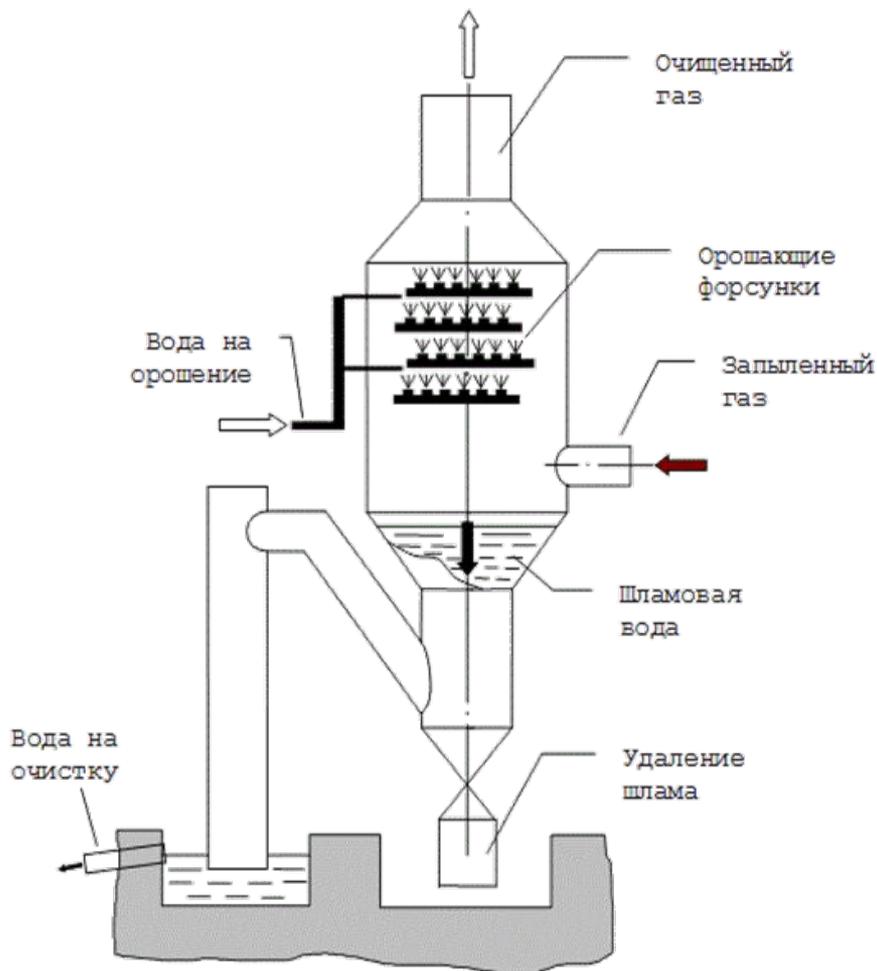


Схема скоростного газопромывателя

