

Тепловые двигатели и нагнетатели

Газотурбинные установки (ГТУ)

Лекция № 28

1. Назначение, классификация и принципиальные схемы

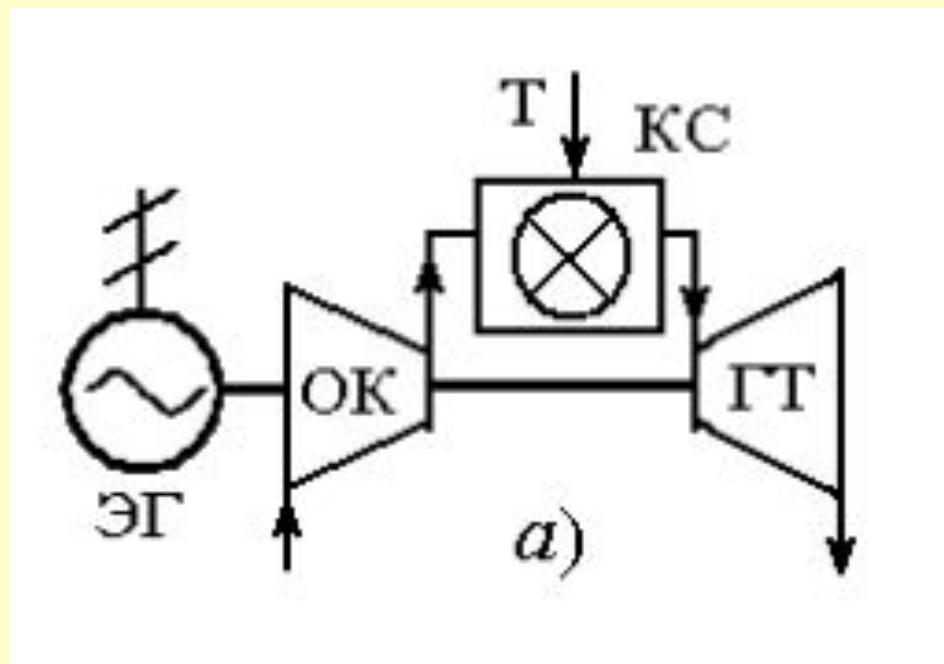
Газотурбинные установки (ГТУ) нашли широкое применение *в энергетике, промышленности и на транспорте* в качестве основных или вспомогательных силовых агрегатов.

- Они применяются:
- — для привода электрогенераторов на ТЭЦ или в энергопоездах;
- — для привода газовых компрессоров на газоперекачивающих станциях магистральных газопроводов;
- — в качестве силовых агрегатов для привода гребных винтов на судах;
- — в авиации (турбовинтовые самолёты);
- — на мощных магистральных тепловозах.

- ***Классификацию ГТУ ведут по разным признакам:***
- – по назначению: стационарные и транспортные;
- – по конструктивному оформлению: одно или многоступенчатые, одно- или двухцилиндровые, одно- или двухвальные;
- – по организации цикла: проточные или импульсные, с разомкнутым или замкнутым циклом;
- – по роду топлива: на жидком, газообразном или твёрдом топливе.
- – по мощности: малой, средней и высокой мощности.
- **Обычно мощность ГТУ не превышает 100 МВт.**

- Рассмотрим принцип работы и термодинамические циклы простейшей ГТУ.

Простейшая ГТУ

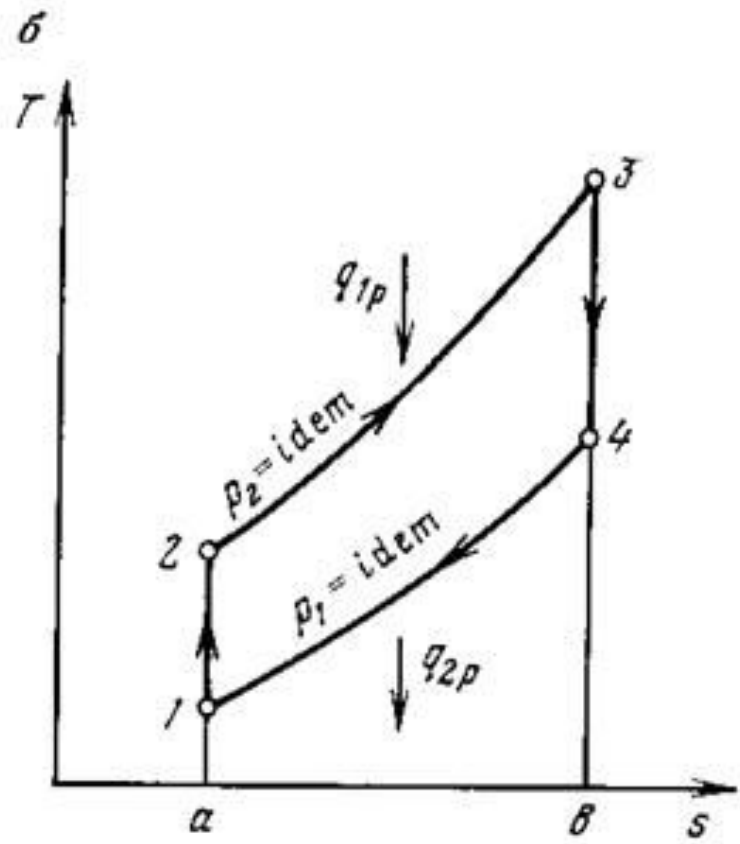
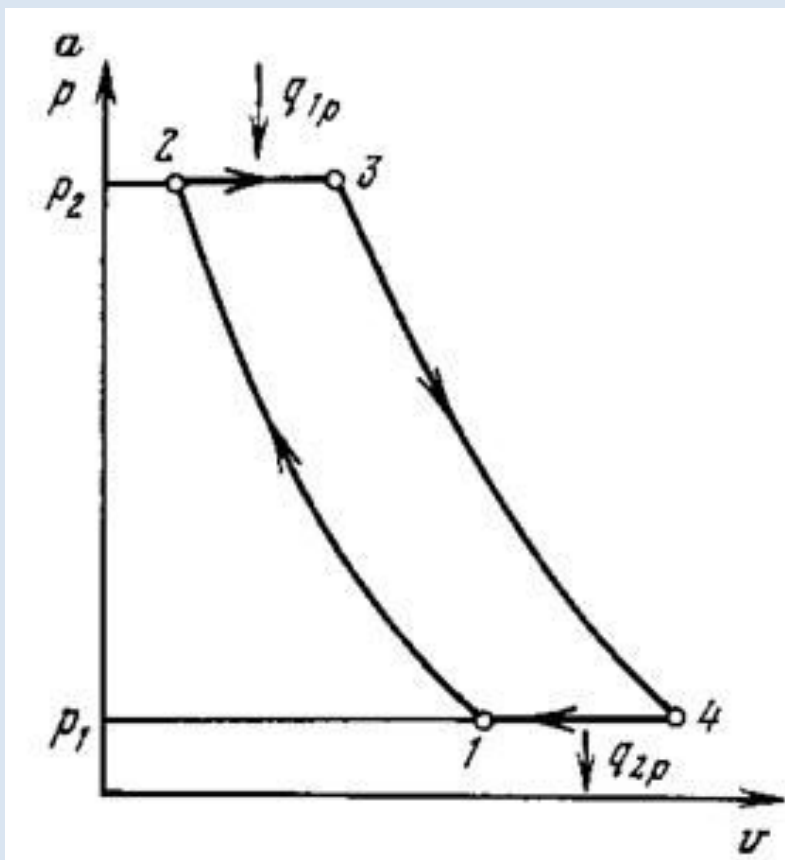


- На одном общем валу установлены осевой компрессор ОК и газовая турбина ГТ.
- Сжатый в компрессоре воздух и топливо (жидкое или газообразное) подаются в камеру сгорания КС, где происходит его сжигание.

- В результате существенно повышается температура, а значит и запас работоспособности образующихся продуктов сгорания.
- Дымовые газы из камеры сгорания и направляются в турбину. Здесь, как и в паровых турбинах, **энергия рабочего тела с помощью соплового аппарата** сначала трансформируется в **кинетическую энергию потока, а затем на рабочих лопатках турбины – в механическую работу.**
- **Механическая работа**, полученная в турбине, частично расходуется на привод компрессора и вспомогательных агрегатов и устройств (топливный и масляный насосы, регулятор и др.), а оставшаяся часть (около 30 %) отдаётся потребителю, **в качестве которого очень часто выступает электрогенератор ЭГ.**

- Отработанные дымовые газы выбрасываются из турбины в окружающую среду, унося с собой отводимую теплоту q_2 .
- **В действительности имеем открытую систему, через которую проходят и трансформируются потоки массы и энергии.**

• Идеализированные P–V и T–s диаграммы цикла простейшей ГТУ



- В первом приближении процессы сжатия воздуха в компрессоре $1-2$ и расширения в продуктах сгорания в турбине $3-4$ считают адиабатными.
- Процесс горения топлива в камере сгорания – изобарным $2-3$ (или изохорным, если используются более сложные по конструкции камеры сгорания с выпускными клапанами).
- Для упрощения термодинамического анализа и, не вводя существенных погрешностей, процесс отвода тепла q_2 в окружающую среду заменяется условным изобарным процессом $4-1$.

- Основными характеристиками цикла ГТУ принято считать **степень повышения давления в компрессоре:**

$$\lambda = \frac{p_{\text{ВЫХ}}}{p_{\text{ВХ}}}$$

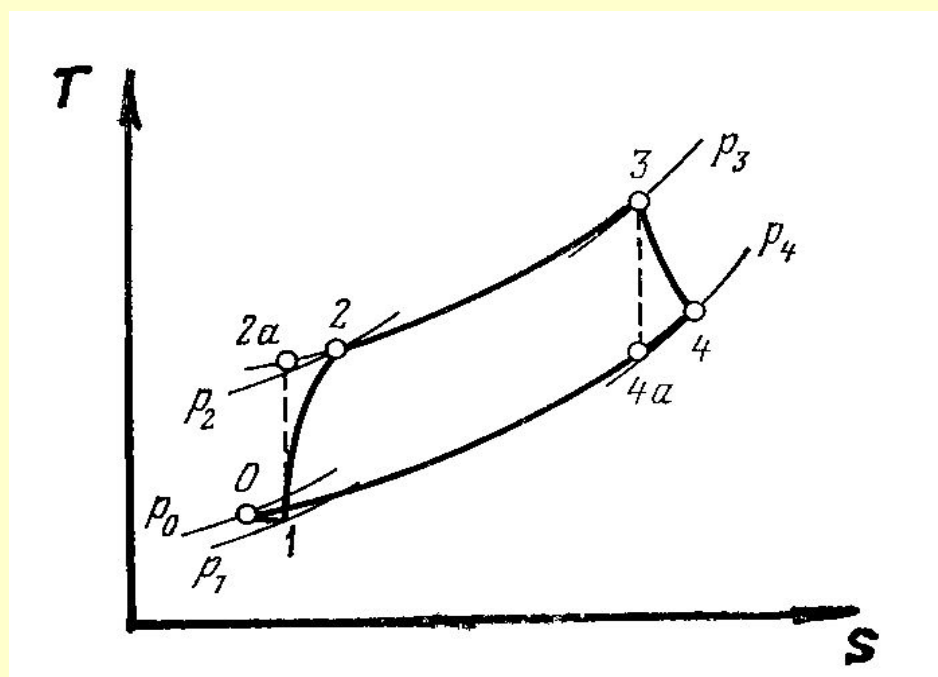
- и **степень предварительного расширения в камере сгорания:**

$$\rho = \frac{v_3}{v_2}$$

- *В реальных условиях все процессы в ГТУ являются необратимыми, что оказывает большое влияние на характеристики установки.*
- Необратимость реальных процессов вызвана потерями работы в турбине и компрессоре, а также потерями давления РТ в тракте ГТУ.
- Если в первом приближении считать расход РТ одинаковым в любой точке тракта ГТУ, то с учетом названных потерь можно построить реальный цикл в тепловых диаграммах.

- На рисунке представлен действительный процесс сжатия в компрессоре *изображен линией 12*, а процесс расширения в турбине – линией 34.

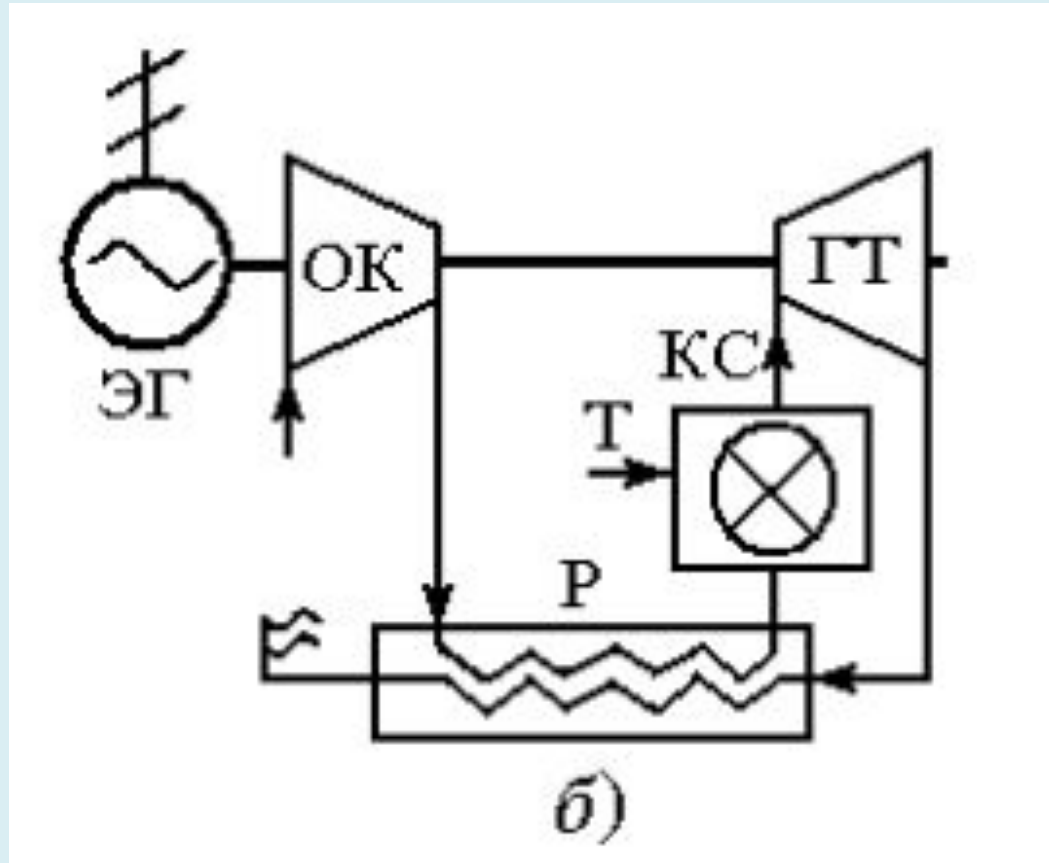
Реальный цикл ГТУ в T,s -диаграмме



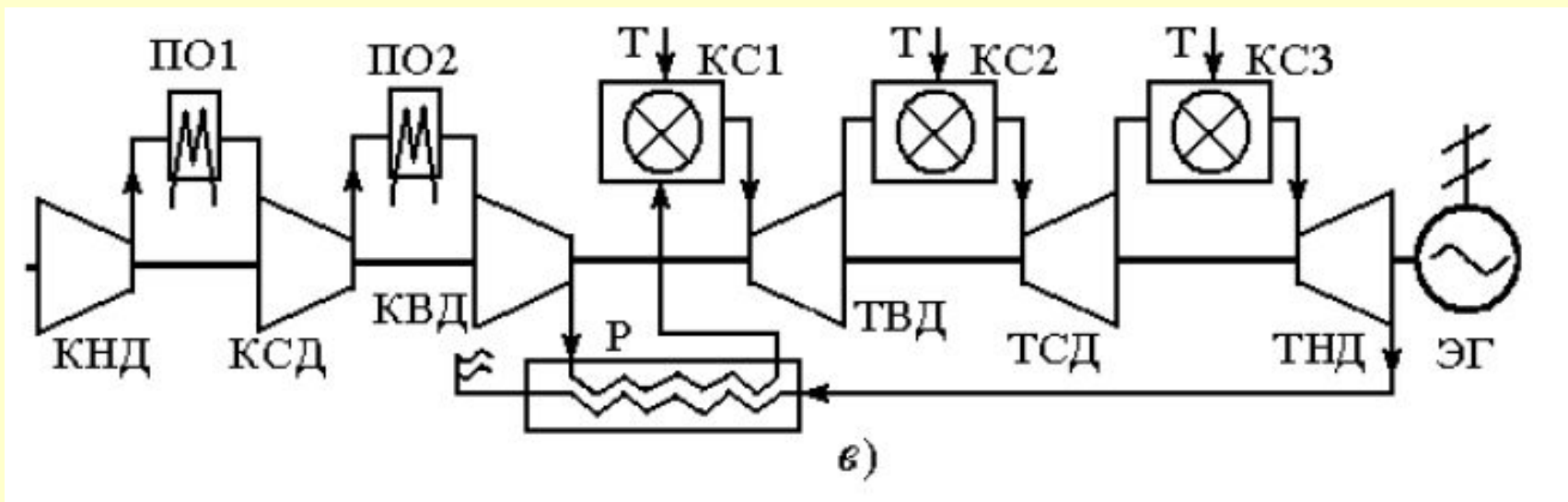
- Точками *2a* и *4a* отмечено состояние рабочего тела соответственно в конце изэнтропийного сжатия и расширения (идеальные процессы), *точкой 0* – *параметры окружающей среды*. Ввиду потерь давления во всасывающем тракте компрессора (*линия 01*) процесс сжатия начинается в точке *1*.

- Сравнительно низкий КПД простейших схем объясняется тем, что отработавшие газы покидают турбину при достаточно высокой температуре (350...450 °С) и уносят с собой большое количество теплоты.
- Чтобы полезно использовать часть этой теплоты, отработанные дымовые газы сначала направляют в специальный теплообменник, **называемый регенератором R** , в котором часть тепла отработанных газов передаётся сжатому в компрессоре воздуху по пути его в камеру сгорания.
- Такой предварительный нагрев приводит к повышению температуры в камере сгорания, а значит и к повышению КПД установки (см. рисунок).

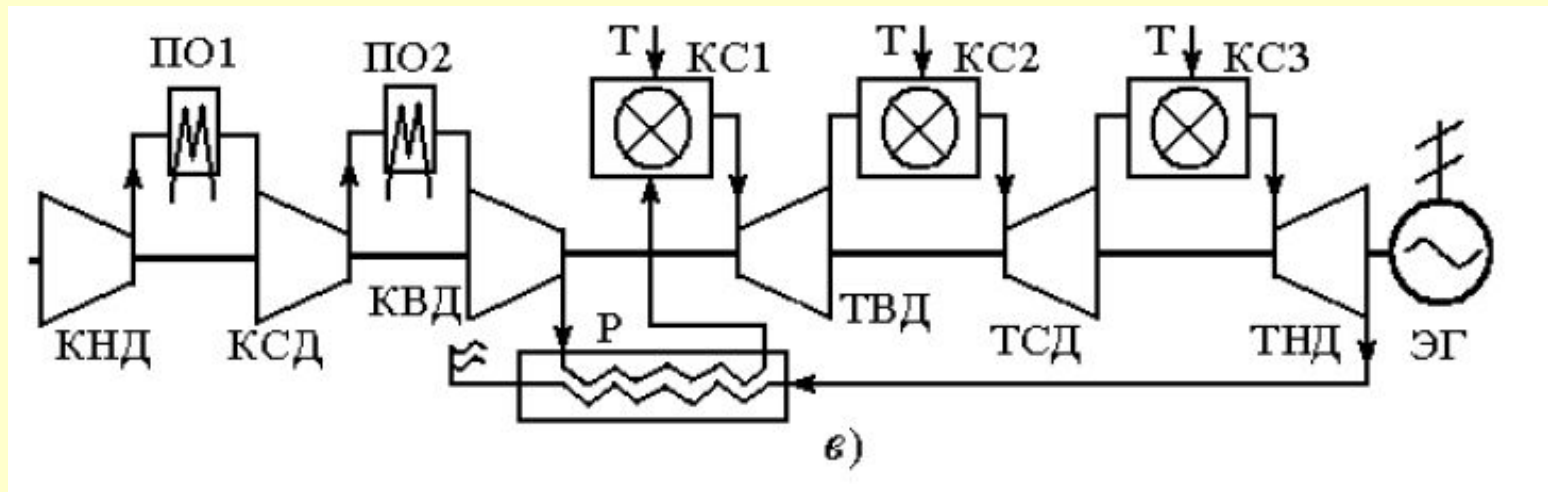
Простейшая ГТУ с регенератором



- Чтобы уменьшить температурные и механические напряжения в основных деталях при большой единичной мощности турбины, а также чтобы приблизить термодинамический цикл ГТУ к циклу Карно, её делают многоагрегатной.



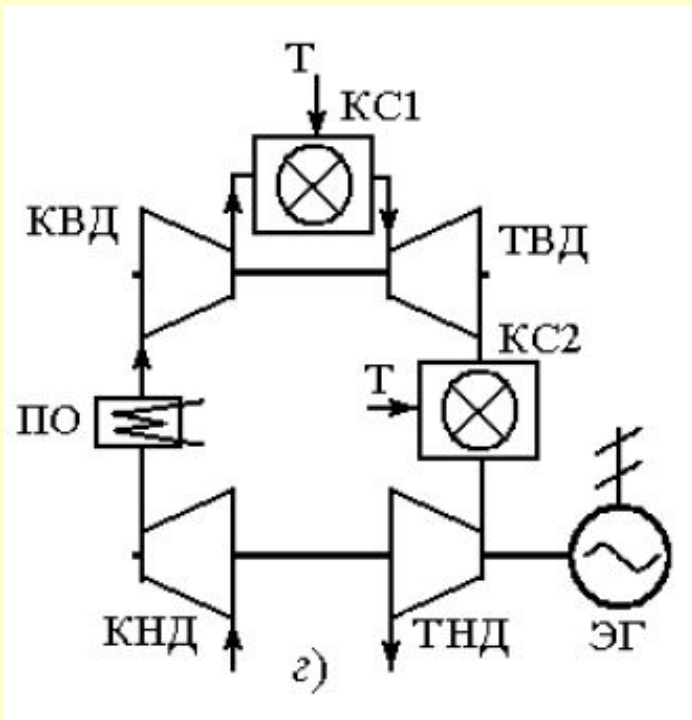
Одновальная многоагрегатная ГТУ



- В простейшем случае сжатие воздуха организуют в нескольких последовательно установленных компрессорах низкого (**КНД**), среднего (**КСД**) и высокого давлений (**КВД**), применяя промежуточное охлаждение (**ПО**) между ними.
- Аналогично реализуется и другая часть схемы: топливо сжигается в отдельных камерах сгорания (**КС1, КС2 и КС3**) и после этого подаётся в отдельные турбины высокого (**ТВД**), среднего (**ТСД**) и низкого давления (**ТНД**).

- При этом в каждую из камер сгорания подаётся лишь часть от общего расхода топлива, необходимого для обеспечения общей мощности установки, в то время как расход воздуха через каждый компрессор определяется именно общим расходом топлива.
- Недостатком одновальных схем является то, что при работе на привод электрогенератора на частичных режимах их эффективность значительно падает.
- **Объясняется это просто:** *в такой ситуации число оборотов вала должно оставаться неизменным (чтобы сохранялась частота вырабатываемого тока), и поэтому расход воздуха всегда остаётся таким же, как и при номинальном режиме.*

- Одновременно количество сжигаемого топлива на частичном режиме заметно уменьшают, в результате большая часть воздуха не участвует в сжигании, на её нагрев тратится выделяемое тепло, что снижает температуру дымовых газов и КПД установки.
- Чтобы повысить эффективность на частичных режимах, многоагрегатную схему трансформируют в двухвальную.
- При этом на каждом из валов может быть свой компрессор и своя турбина, или только один компрессор и две турбины.

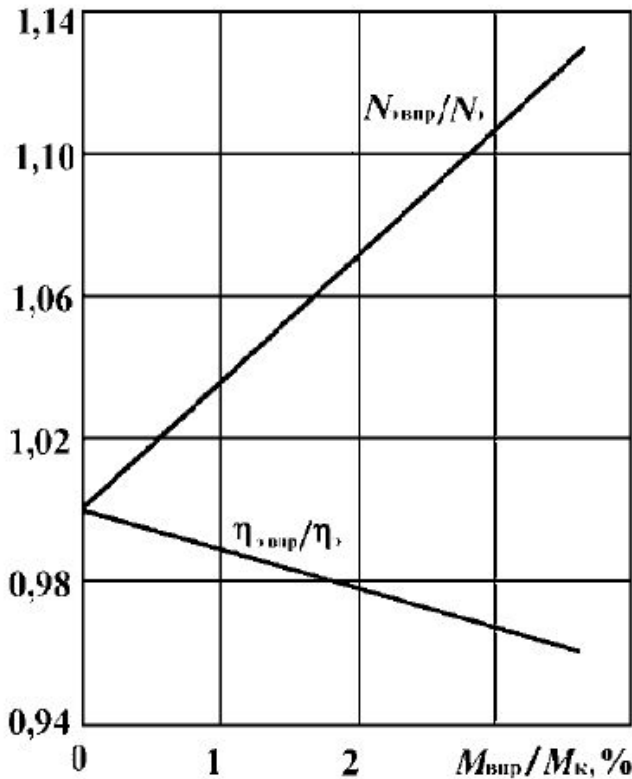


Двухвальная ГТУ

- **Двухвальная турбина обеспечивает различные числа оборотов валу с компрессором и турбиной высокого давления.**

При этом **турбина низкого давления также отдаёт вырабатываемую мощность электрогенератору при постоянстве числа оборотов.**

- На частичных режимах **турбина высокого давления** работает при оптимальном коэффициенте избытка воздуха (так называют отношение действительного массового расхода воздуха к теоретически необходимому его количеству), а **турбина низкого давления** – при завышенных значениях этого отношения, т.е. при гораздо худших характеристиках эффективности, чем турбина высокого давления.



Зависимость эффективной мощности и КПД турбины от относительного расхода впрыскиваемой в камеру сгорания воды

- Экспериментальные исследования показали, что определённый положительный эффект приносит впрыск небольшого количества воды (или влажного пара) в камеру сгорания.

Это уменьшает температуру дымовых газов на выходе из неё и приводит к некоторому снижению КПД цикла, но одновременно при этом увеличивается энтальпия смеси пар + дымовые газы за счёт очень высокой энтальпии пара и, как следствие, – к некоторому увеличению мощности турбины.

- При определённом соотношении между расходом впрыскиваемой воды и расходом дымовых газов ($\approx 2,5 \%$ по массе) благодаря снижению температуры уменьшаются вредные выбросы, содержащие CO и NO_x .

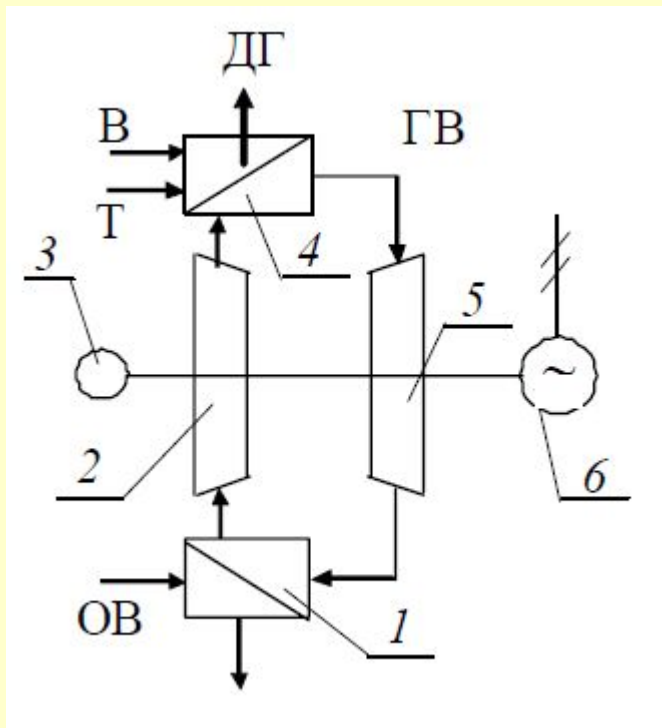


Схема ГТУ с внешним сгоранием: В – воздух; Т – топливо; ОВ – охлаждающая вода; ГВ – горячий воздух; ДГ – дымовые газы

1 – охладитель; 2 – компрессор; 3 – пусковой электродвигатель; 4 – котёл-нагреватель; 5 – турбина; 6 – генератор

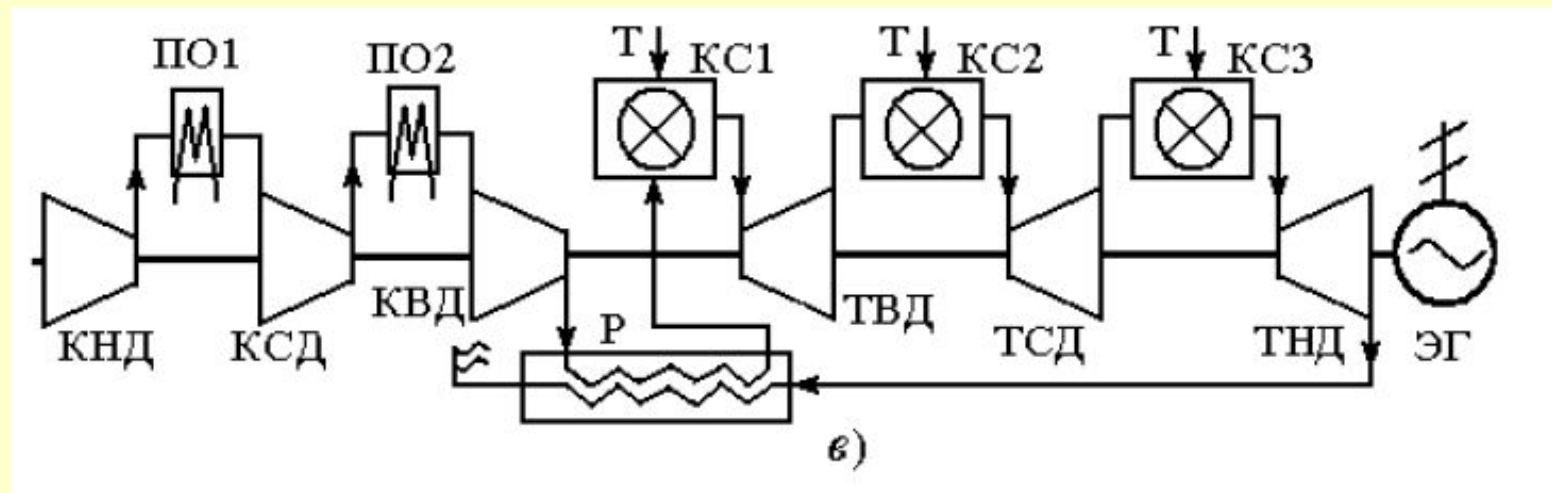
Для работы на твёрдом топливе используют установки с полностью замкнутым циклом.

- В таких установках рабочее тело (обычно воздух) циркулирует в закрытой системе, получая тепло в специальном котле нагревателе, куда подаются топливо и необходимое количество воздуха, и совершается сжигание топлива.

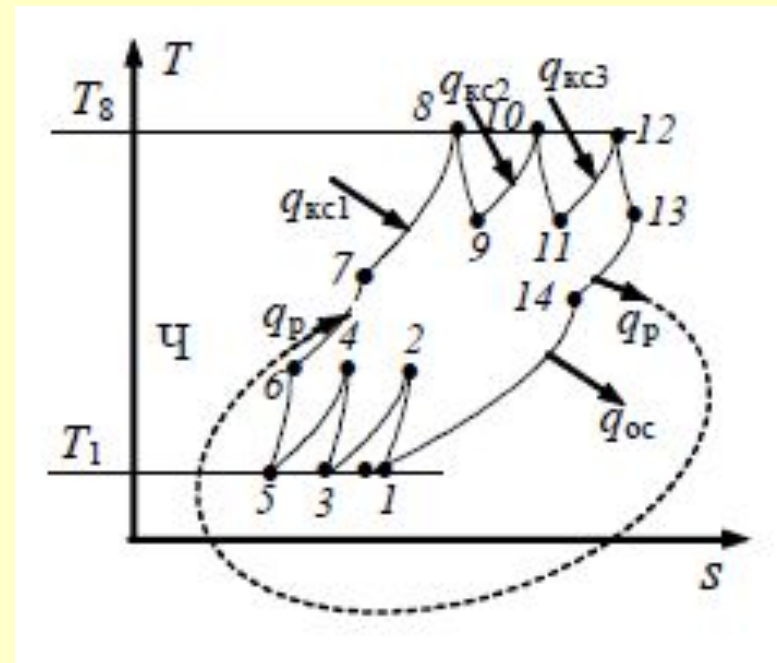
И если в прежних схемах мы имели внутреннее сгорание, то *теперь теплота к рабочему телу передаётся от продуктов сгорания в специальном теплообменнике, так что это газотурбинная установка с внешним сгоранием.*

2. Рабочий процесс и характеристики ГТУ

Разберем особенности рабочего процесса многоагрегатных установок.



- Рассмотрим последовательность термодинамических процессов в основных агрегатах одновальной многоагрегатной ГТУ, отображая их на $T-s$ диаграмме.



$T-s$ диаграмма цикла трехагрегатной ГТУ

- **Атмосферный воздух** с давлением p_a через фильтр попадает на вход компрессора низкого давления, преодолевая гидравлическое сопротивление фильтра Δp_ϕ , **которое зависит от конструкции фильтра и скорости воздуха в нём и обычно определяется экспериментально.**
- Процесс сжатия в первом компрессоре начинается при давлении $p_a = p_a - \Delta p_\phi$ (**точка 1**).
- Температура в начале сжатия T_1 .
- С учётом потерь на трение процесс сжатия **1–2** идёт по политропе ($n \approx 1,35$) и в соответствии со вторым законом термодинамики смещается вправо от изоэнтропы.
- Давление на выходе из компрессора будет $p_2 = p_1 \lambda$,
- где λ – степень повышения давления в первом компрессоре.
- В осевых компрессорах величина λ обычно лежит в пределах 3...5.

- Охлаждение в охладителях происходит практически при $p = \text{const}$, но из-за гидравлических потерь давление в конце охлаждения (**процесс 2–3**, например) будет несколько меньшим, чем p_2 (на величину гидравлического сопротивления этого теплообменника $\Delta p_{\text{ох1}}$).
- Расход и температура охлаждающей воды подбираются так, чтобы воздух охладился практически до температуры T_1 .
Итак, $p_3 = p_2 - \Delta p_{\text{ох1}}$, $T_3 = T_1$.
- **Аналогичные процессы (3–4 и 4–5) проходят и в компрессоре среднего давления и во втором охладителе.**

- Сжатие воздуха в компрессоре высокого давления **отображается процессом 5–6**.
- После этого из компрессора сжатый воздух направляется в регенератор, где процесс нагрева воздуха протекает практически при $p = const$ и **он отражён отрезком изобары 6–7**.
- В действительности на выходе из регенератора давление меньше, чем p_6 на величину гидравлических потерь в этом теплообменнике:

$$p_7 = p_6 - \Delta p_{\text{рег}}.$$

- Процесс сжигания топлива и подвод тепла в **КС1** происходит также при $p = const$. Здесь тоже есть гидравлические потери, так что и **точка 8** сдвигается немного вправо по отношению к предыдущей точке.

- Расширение в первой турбине отражается **процессом 8–9**.
- Изобара, соответствующая подводу тепла **во второй КС** тоже сдвигается вправо (**процесс 9–10**).
- Расход топлива здесь подбирают так, чтобы температура T_{10} равнялась T_8 .
- Далее всё повторяется во второй турбине, **третьей КС** и третьей турбине.
- Из неё газ направляется в регенератор, где отдаёт тепло воздуху (**процесс 13–14**).

- **Процесс 14–1**, проходящий при давлении p_0 , – это условный процесс отвода теплоты от рабочего тела, замыкающий цикл.
- В действительности все процессы протекают непрерывно, но для точных расчётов их условно разрывают, оттягивая потери напора в каждом агрегате.
- Благодаря регенерации тепло q_p , **равное площади под кривой 13–14**, возвращается в цикл (площадь под кривой 6–7), **что повышает η_t цикла.**

- Эффективность термодинамического цикла ГТУ, определяется термическим КПД η_t .
- Работа турбины и компрессора сопровождается потерями работоспособности рабочего тела. Основные виды внутренних и внешних потерь рассмотрели на примере паровых турбин.
- Для оценки эффективности ГТУ используют *внутренний относительный КПД турбины* и *адиабатический, политропный или изотермический КПД компрессора*.
- *На эффективную мощность турбины и компрессора влияет и механический КПД, также следует учитывать и КПД электрогенератора.*

- Если процессы сжатия в компрессоре и расширения в турбине считать изоэнтропными (т.е. пренебрегать внешним теплообменом и внутренними потерями), можно рассчитать величину абсолютного внутреннего КПД η_{ia} через основные характеристики цикла.
- Для ГТУ с двухступенчатым сжатием воздуха, одной КС и регенерацией теплоты абсолютный внутренний КПД ($\eta_{ia} = \eta_t \eta_{i0}$) будет:

$$\eta_{ia} = \frac{\left(1 - \frac{1}{\lambda^m}\right) \eta_{i0} - \frac{\lambda_1^m - 1}{\tau_1 \eta_{K1}} - \frac{\lambda_2^m - 1}{\tau_2 \eta_{K2}}}{1 - \sigma \left[1 - \eta_{i0} \left(1 - \frac{1}{\lambda_1 \lambda_2}\right) \right] - \frac{1 - \sigma}{\tau_2} \left(1 + \frac{\lambda_2^m - 1}{\eta_{K2}}\right)} \eta_{КС}.$$

- где $m = k - 1/k$; k – показатель адиабаты;
- λ_1, λ_2 – степени повышения давления в каждом из компрессоров;
- τ_1 – отношение температуры дымовых газов на выходе из КС к температуре воздуха на входе в первый компрессор;

$$\tau_1 = \frac{T_{\text{Д.Г.}}}{T_{\text{ВХ.К1}}} \cdot$$

$$\tau_2 = \frac{T_{\text{Д.Г.}}}{T_{\text{ВХ.К2}}} \cdot$$

- $\eta_{\text{К1}}, \eta_{\text{К2}}$ – внутренние КПД компрессоров; η_{i0} – относительный внутренний КПД турбины; $\eta_{\text{КС}}$ – КПД камеры сгорания.

- Эффективная мощность N_e ГТУ определяется разницей мощностей турбины и компрессора:

$$N_e = N_{eT} - N_{eK}.$$

- или, расшифровывая слагаемые:

$$N_e = M_{\text{д.г.}} \left[\Delta h_p^T \eta_i^T \eta_m^T - (1 - g_T) \right] \frac{\Delta h_{\text{ад}}}{\eta_{\text{ад}}^K \eta_m^K} g_T,$$

- где $M_{\text{д.г.}}$ – массовый расход дымовых газов;
- Δh_p^T – располагаемый теплоперепад в турбине;
- g_T – удельный расход топлива;

- η_M^T – механические КПД турбины;
- $\Delta h_{ад}$ – адиабатный перепад энтальпии в компрессоре;
- $\eta_{ад}^K$ – адиабатный КПД компрессора;
- η_M^K – механические КПД компрессора.
- Электрическая мощность ГТУ

$$N_{э} = N_e \eta_{ген}$$

Некоторые характеристики газовых турбин:

- расход дымовых газов (кг/с)

$$M_{\text{д.г.}} = \frac{N_{\text{э}}}{\Delta h_{\text{р}} \eta_i \eta_{\text{м}} \eta_{\text{ген}}};$$

- удельный расход дымовых газов (кг/Дж)

$$d_{\text{д.г.}} = \frac{M_{\text{д.г.}}}{N_{\text{э}}};$$

- расход топлива (кг/с)

$$M_{\text{т}} = M_{\text{д.г.}} g_{\text{т}};$$

- расход воздуха (кг/с)

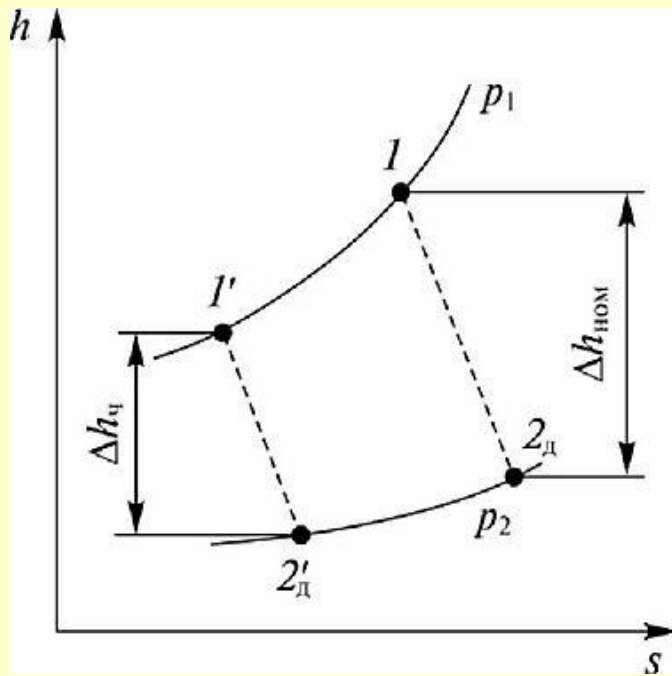
$$M_{\text{в}} = M_{\text{д.г.}} (1 - g_{\text{т}}).$$

3. Режимы работы и регулирование газовых турбин

- При эксплуатации ГТУ мощность её не может оставаться постоянной, поскольку нагрузку определяют потребители и она может меняться от максимальной до холостого хода.

В ГТУ средством изменения мощности является *изменение расхода топлива* или *расходов топлива и воздуха одновременно*.

- В *одновальных установках с приводом электрогенератора* меняют только расход топлива, а *расход и давление воздуха на выходе из компрессора остаются постоянными.*
- В *результате увеличивается коэффициент избытка воздуха, уменьшается температура и энтальпия газов на выходе из КС, уменьшается мощность турбины.*
- Поскольку *мощность на привод компрессора при этом остаётся постоянной*, КПД ГТУ заметно уменьшается.



**Диаграмма $h-s$
процесса
расширения в
турбине**

- В координатах $h-s$ показаны **два процесса расширения в турбине**: процесс $1-2_d$ соответствует номинальной нагрузке, а процесс $1'-2'_d$ — частичной, при уменьшенных значениях температуры и энтальпии газа на входе в турбину.

Рисунок показывает, что на частичных режимах заметно уменьшается располагаемый теплоперепад, а значит и мощность турбины.

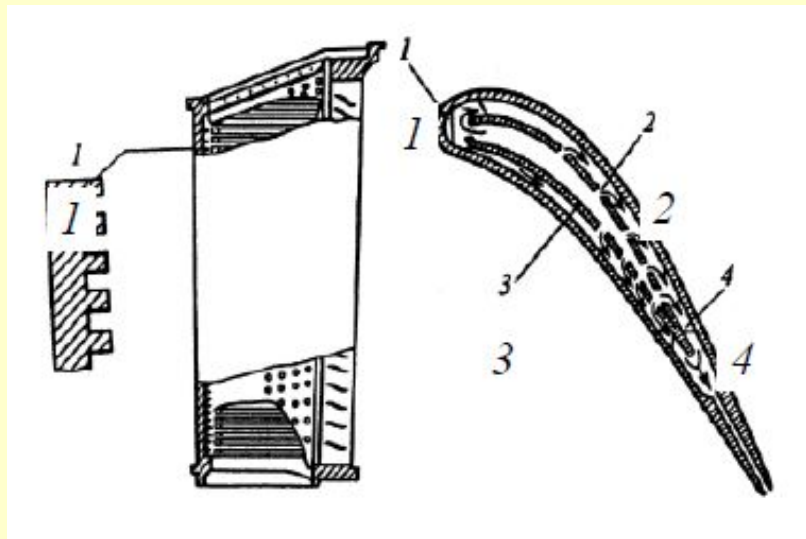
- Поэтому на более мощных установках применяют двухвальные схемы, позволяющие и на частичных режимах работать практически без снижения КПД.

- **Регулирование частоты вращения вала** турбины призвано обеспечивать постоянство заданного числа оборотов при любой нагрузке.
- **Регулирование частоты вращения вала** реализуется с помощью центробежного регулятора, изменяющего расход топлива в зависимости от превышения или уменьшения числа оборотов вала от требуемого.
- *В целом принцип действия и особенности конструкции регулятора газовой турбины аналогичны регулятору паровых турбин.*
- Регулирование двухвальных установок намного сложнее, и здесь применяют два регулятора (для каждого вала), изменяющие расход топлива в зависимости от нагрузки силовой части турбины.

- ***В целом конструкция газовых турбин аналогична устройству турбин паровых.***
- По сравнению с паровыми турбинами, здесь рабочее тело направляется в сопла при более низком давлении, но с более высокой температурой (до **1200...1300 °C**), имея общий располагаемый теплоперепад $\Delta h_p = h_1 - h_2$ во много раз меньше.
- Поэтому число ступеней давления у газовых турбин всегда небольшое, не так сильно увеличивается высота лопаток вдоль по потоку.
- Обычно высота лопаток всегда больше, а диаметры ступеней меньше.

- Стремление получить наивысший КПД, что достигается увеличением температуры газов на выходе из камеры сгорания, заставляет усложнять конструкцию рабочих лопаток, применяя самые жаропрочные стали, специальные высокотемпературные покрытия или различного вида охлаждение сопловых и рабочих лопаток, особенно на первых ступенях давления.

Конструкция охлаждаемой лопатки показана на рисунке. Для охлаждения в лопатку подаётся сжатый воздух, протекающий по внутренним каналам и выбрасываемый наружу в дымовые газы.



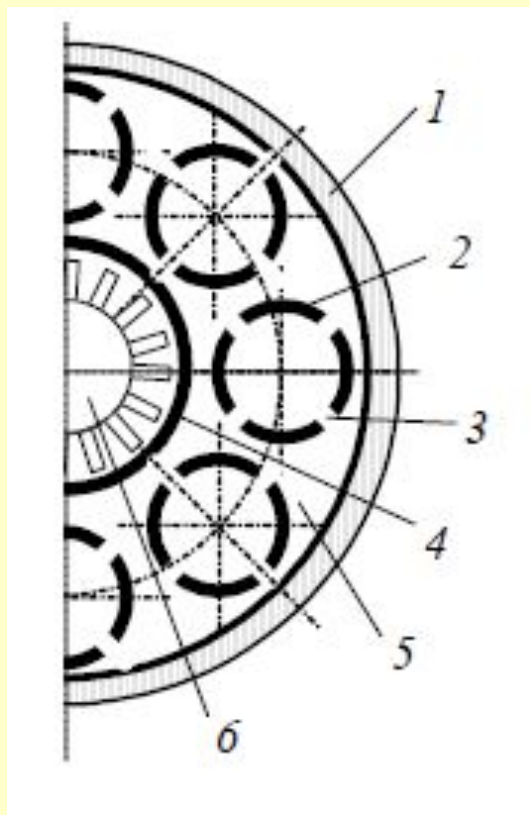
Лопатка с воздушным охлаждением

4. Устройство камер сгорания ГТУ

Специального рассмотрения заслуживает устройство **камер сгорания (КС) ГТУ**, *поскольку они являются очень важными и весьма теплонпряжёнными агрегатами, во многом определяющими экономичность всей установки.*

- В энергетических ГТУ получили *применение крупные выносные КС (одна-две на установку)* или *небольшие распределённые камеры (по 8 и более)*.
- **Выносные КС** располагаются отдельно от турбины. Они имеют футерованный изнутри огнеупором корпус из жаропрочной стали, куда компрессором через специальный направляющий аппарат подаётся воздух и через горелку – горючий газ.
- *Внутри КС происходит сгорание топлива*, а образовавшиеся дымовые газы из неё через выходной газопровод направляются в кольцевую входную камеру турбины, из которой – в сопловой аппарат первой ступени.

Устройство распределённых камер сгорания



**Поперечное сечение
кольцевой
распределённой
камеры сгорания**

- **1** – наружный корпус с тепловой изоляцией;
- **2** – пламенная труба;
- **3** – отверстия для подвода вторичного воздуха;
- **4** – корпус компрессора;
- **5** – пространство, заполненное сжатым воздухом;
- **6** – ротор компрессора.

Устройство распределённых камер сгорания

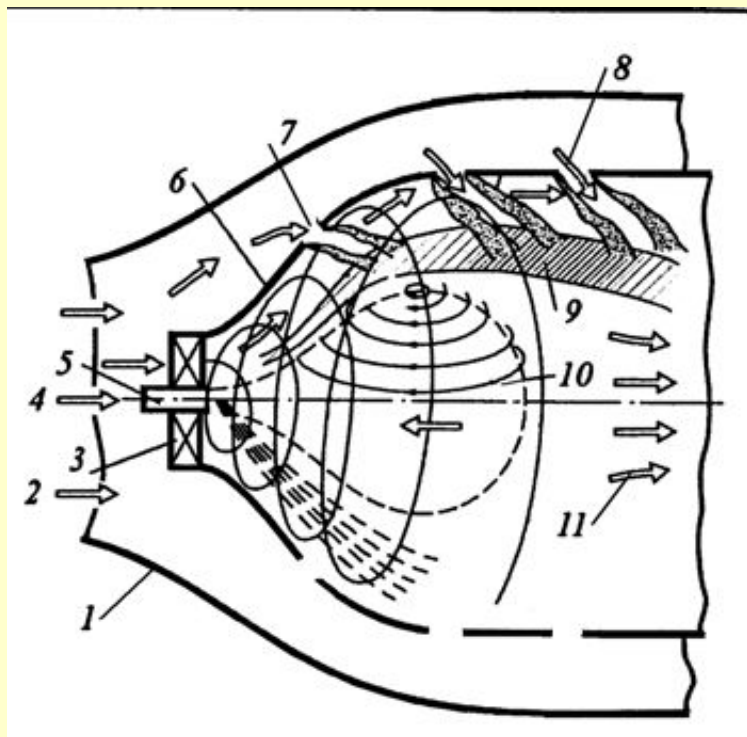


Схема камеры сгорания:

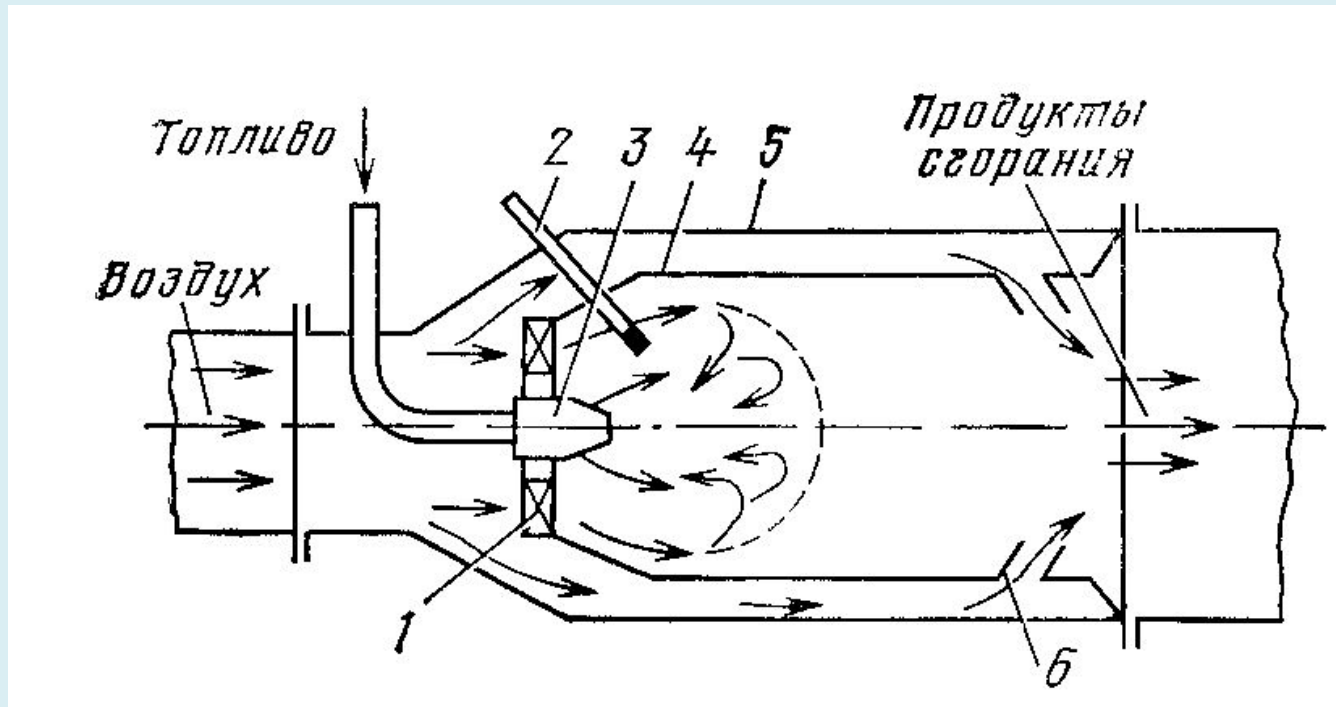
- **1** – теплоизолированный корпус; **2** – воздух из компрессора; **3** – направляющий аппарат первичного воздуха; **4** – подвод топлива; **5** – горелка; **6** – пламенная труба; **7** – отверстия для вторичного воздуха; **8** – вторичный воздух; **9** – зона разбавления продуктов сгорания; **10** – зона с максимальной температурой; **11** – дымовые газы в турбину.

- По периметру корпуса турбины в специальной кольцевой камере устанавливается несколько пламенных труб, в которых организуется непосредственно сжигание топлива.
- Воздух из компрессора направляется в межтрубное пространство и оттуда поступает в пламенные трубы.
- Сжатый воздух (его называют первичным) и топливо из входного сечения КС вдуваются в пламенную трубу со значительной закруткой, обеспечивающей хорошее перемешивание горючего с окислителем.

- В образующемся турбулентном пламени температура поднимается практически до адиабатной температуры горения (порядка 2000 °С).
- Чтобы организовать тепловую защиту пламенной трубы и разбавить раскалённые газы до приемлемых пределов (1400...1200 °С), через специальные отверстия в пламенной трубе вдоль её вдувается вторичный воздух.
- Дымовые газы из КС проходят непосредственно к сопловым лопаткам первой ступени турбины.
- Поскольку для работы газовой турбины требуется большой расход воздуха при сравнительно невысоком давлении (порядка 0,5...1 МПа), в ГТУ применяются осевые компрессоры.

- **Рабочий процесс газотурбинной установки (ГТУ)**

- Большинство современных ГТУ выполняется по открытой схеме со сгоранием при $p = \text{const}$.



- **Схема камеры сгорания ГТУ**

- 1 – воздухонаправляющее устройство; 2 – запальное устройство; 3 – форсунка; 4 – пламенная (жаровая) труба; 5 – корпус; 6 – смеситель.

- В состав ГТУ обычно входят **камера сгорания**, **газовая турбина**, **воздушный компрессор**, **теплообменные аппараты различного назначения** (*воздухонагреватели, маслоохладители системы смазки, регенеративные теплообменники*) и **вспомогательные устройства** (*маслонасосы, элементы водоснабжения и др.*).
- Рабочим телом *ГТУ служат продукты сгорания топлива*, в качестве которого используется **природный газ**, **хорошо очищенные искусственные газы** (*доменный, коксовый, генераторный*) и **специальное газотурбинное жидкое топливо** (*прошедшее обработку дизельное моторное и соляровое масло*).

- Подготовка смеси производится в камере сгорания. **Огневой объем камеры *разделяется на зону горения***, где происходит сгорание топлива при температуре порядка **2000 °С**, и **зону смешения**, где к продуктам сгорания подмешивается воздух для снижения их температуры до **750 – 1150°С** (более высокие температуры материал газовых турбин выдержать не может).
- Принцип работы газовой и паровой турбин одинаков, но конструкция проточной части газовых турбин значительно проще.
- Газовые турбины работают на относительно небольшом располагаемом теплоперепаде и поэтому имеют небольшое число ступеней.

- В связи с высокой температурой сгорания (750 – 1150°C) детали проточной части турбин (**сопла, рабочие лопатки, диски, валы**) *изготавливают из легированных высококачественных сталей.*
- Для надежной работы у большинства турбин предусмотрено **интенсивное воздушное охлаждение наиболее нагруженных деталей корпуса и ротора.**

5. Применение ГТУ

ГТУ нашли применение: *на транспорте, в энергетике, для привода стационарных установок и др.*

- *Энергетические ГТУ* применяются в качестве агрегатов для покрытия пиковых нагрузок и аварийного резерва для собственных нужд крупных энергосистем.
- Для **энергетических ГТУ** характерны частые пуски (до 1000 в год) при относительно малом числе часов использования (от 100 до 1500 ч/год).
- Диапазон единичных мощностей **энергетических ГТУ** составляет от 1,0 до 100 МВт.

- ГТУ применяются также для привода электрогенератора и получения электроэнергии в передвижных установках (например, на морских судах).
- Такие ГТУ обычно работают в диапазоне нагрузок 30 – 110% номинальной, с частыми пусками и остановками.
- Единичные мощности таких ГТУ составляют от десятков киловатт до 10 МВт.

- Специфическую группу энергетических ГТУ составляют установки, работающие в технологических схемах химических, нефтеперерабатывающих, металлургических и других комбинатов (энерготехнологические).
- Они работают в базовом режиме нагрузки и предназначены чаще всего для привода компрессора, обеспечивающего технологический процесс сжатым воздухом или газом за счет энергии расширения газов, образующихся в результате самого технологического процесса.

- **Приводные ГТУ** широко используются для привода центробежных нагнетателей природного газа на компрессорных станциях магистральных трубопроводов, а также насосов для транспортировки нефти и нефтепродуктов и воздуходувок в парогазовых установках.
- Полезная мощность **приводных ГТУ** составляет от 2 до 30 МВт.

- **Транспортные ГТУ** широко применяются в качестве главных и форсажных двигателей самолетов (турбореактивных и турбовинтовых) и судов морского флота.
- ***Газовые турбины*** весьма перспективны как двигатели локомотивов, где их незначительные габариты и отсутствие потребности в питательной воде являются особенно ценными.