

# Газотурбинные установки (ГТУ)

**Газотурбинная установка** - это агрегат, состоящий из газотурбинного двигателя, редуктора, генератора и вспомогательных систем. Поток газа, образованный в результате сгорания топлива, воздействуя на лопатки турбины, создает крутящий момент и вращает ротор, который в свою очередь соединен с генератором. Генератор вырабатывает электроэнергию.

В основу [устройства газотурбинного агрегата](#) положен принцип модульности: ГТУ состоят из отдельных блоков, включая блок автоматики. Модульная конструкция позволяет в кратчайшие сроки производить сервисное обслуживание и ремонт, наращивать мощность, а также экономить средства за счет того, что все работы могут производиться быстро на месте эксплуатации.

На первых этапах развития газотурбинных установок (ГТУ) в них для сжигания топлива применяли два типа [камер сгорания](#). В камеру сгорания первого типа топливо и окислитель (воздух) подавались непрерывно, их горение также поддерживалось непрерывно, а давление не изменялось. В камеру сгорания, второго типа топливо и окислитель (воздух) подавались порциями. Смесь поджигалась и сгорала в замкнутом объеме, а затем продукты сгорания поступали в турбину. В такой камере сгорания температура и давление не постоянны: они резко увеличиваются в момент сгорания топлива.

Со временем выявились несомненные преимущества камер сгорания первого типа. Поэтому в современных ГТУ топливо в большинстве случаев сжигают при постоянном давлении в камере сгорания.

# Принцип действия газотурбинных установок

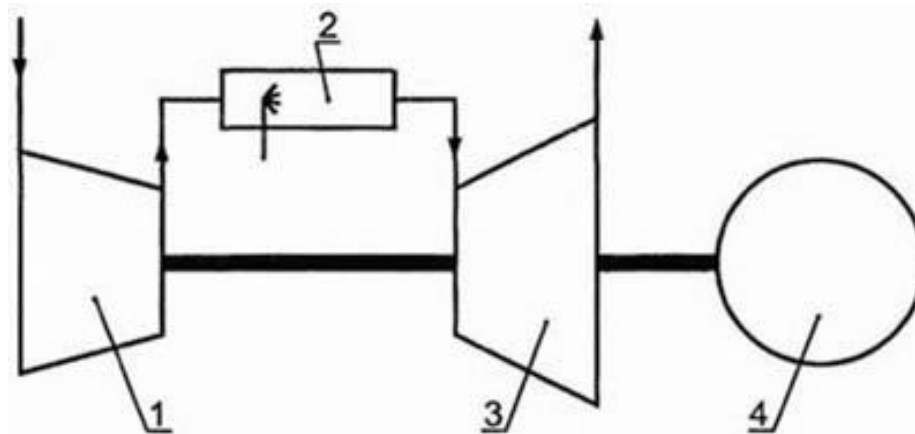


Рис.1. Схема ГТУ с одновальным ГТД простого цикла

В компрессор (1) газотурбинного силового агрегата подается чистый воздух. Под высоким давлением воздух из компрессора направляется в камеру сгорания (2), куда подается и основное топливо — газ. Смесь воспламеняется. При сгорании газовой смеси образуется энергия в виде потока раскаленных газов. Этот поток с высокой скоростью устремляется на рабочее колесо турбины (3) и вращает его. Вращательная кинетическая энергия через вал турбины приводит в действие компрессор и электрический генератор (4). С клемм электрогенератора произведенное электричество, обычно через трансформатор, направляется в электросеть, к потребителям энергии.

Газовые турбины описываются термодинамическим циклом Брайтона Цикл Брайтона/Джоуля — термодинамический цикл, описывающий рабочие процессы газотурбинного, турбореактивного и прямоточного воздушно-реактивного двигателей внутреннего сгорания, а также газотурбинных двигателей внешнего сгорания с замкнутым контуром газообразного (однофазного) рабочего тела.

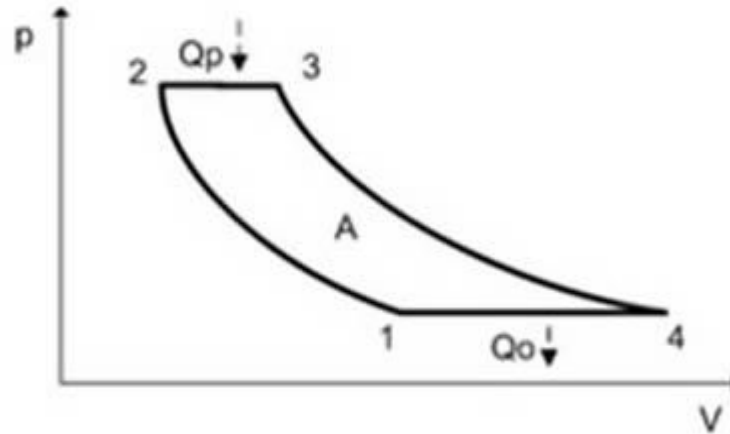
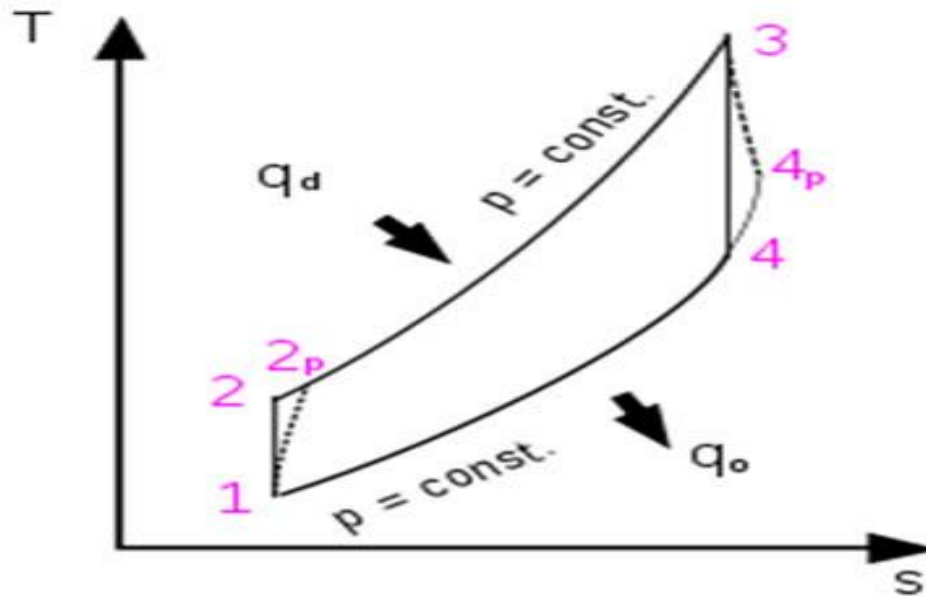


Рис.2. P,V диаграмма цикла Брайтона

- Идеальный цикл Брайтона состоит из процессов:
  - 1—2 Изобарическое сжатие.
  - 2—3 Изобарический подвод теплоты.
  - 3—4 Изобарическое расширение.
  - 4—1 Изобарический отвод теплоты.

С учётом отличий реальных адиабатических процессов расширения и сжатия от изэнтропических, строится реальный цикл Брайтона (1—2<sub>p</sub>—3—4<sub>p</sub>—1 на T-S диаграмме)(рис.3)



идеального (1—2—3—4—1)  
Реального (1—2<sub>p</sub>—3—4<sub>p</sub>—1)

Термический КПД идеального цикла Брайтона принято выражать формулой:

$$\eta = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}$$

- где  $\pi = p_2 / p_1$  — степень повышения давления в процессе изэнтропийного сжатия (1—2);
- $k$  — показатель адиабаты (для воздуха равный 1,4)

Как и во всех циклических тепловых двигателях, чем выше температура сгорания, тем выше КПД. Сдерживающим фактором является способность стали, никеля, керамики или других материалов, из которых состоит двигатель, выдерживать температуру и давление. Значительная часть инженерных разработок направлена на то, чтобы отводить тепло от частей турбины. Большинство турбин также пытаются рекуперировать тепло выхлопных газов, которые, в противном случае, теряется впустую.

**Рекуператоры** — это теплообменники, которые передают тепло выхлопных газов сжатому воздуху перед сгоранием. При комбинированном цикле тепло передается системам паровых турбин. И при комбинированном производстве тепла и электроэнергии (когенерация) отработанное тепло используется для производства горячей воды.

Механически газовые турбины могут быть значительно проще, чем поршневые двигатели внутреннего сгорания. Простые турбины могут иметь одну движущуюся часть: вал/компрессор/турбина/альтернативный ротор в сборе, не учитывая топливную систему.

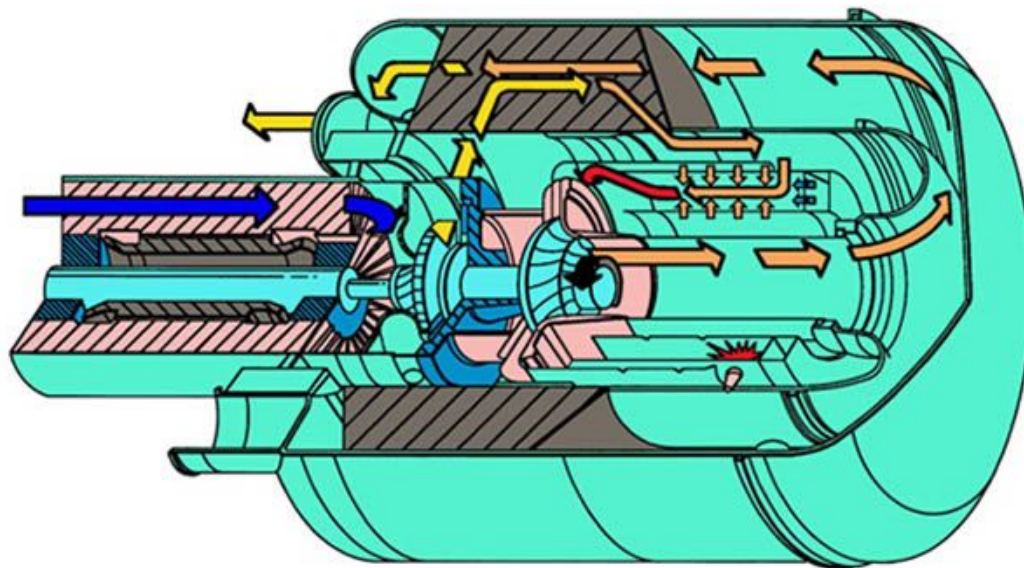


Рис.4. Эта машина имеет одноступенчатый радиальный компрессор, турбину, рекуператор, и воздушные подшипники.

Более сложные турбины (те, которые используются в современных реактивных двигателях), могут иметь несколько валов (катушек), сотни турбинных лопаток, движущихся статорных лезвий, а также обширную систему сложных трубопроводов, камер сгорания и теплообменников. Как правило, чем меньше двигатель, тем выше должна быть частота вращения вала(ов), необходимая для поддержания максимальной линейной скорости лопаток.

Максимальная скорость турбинных лопаток определяет максимальное давление, которое может быть достигнуто, что приводит к получению максимальной мощности, независимо от размера двигателя. Реактивный двигатель вращается с частотой около 10000 об/мин и микро-турбина — с частотой около 100000 об/мин.

# Устройство ГТУ. Основные элементы газотурбинных установок

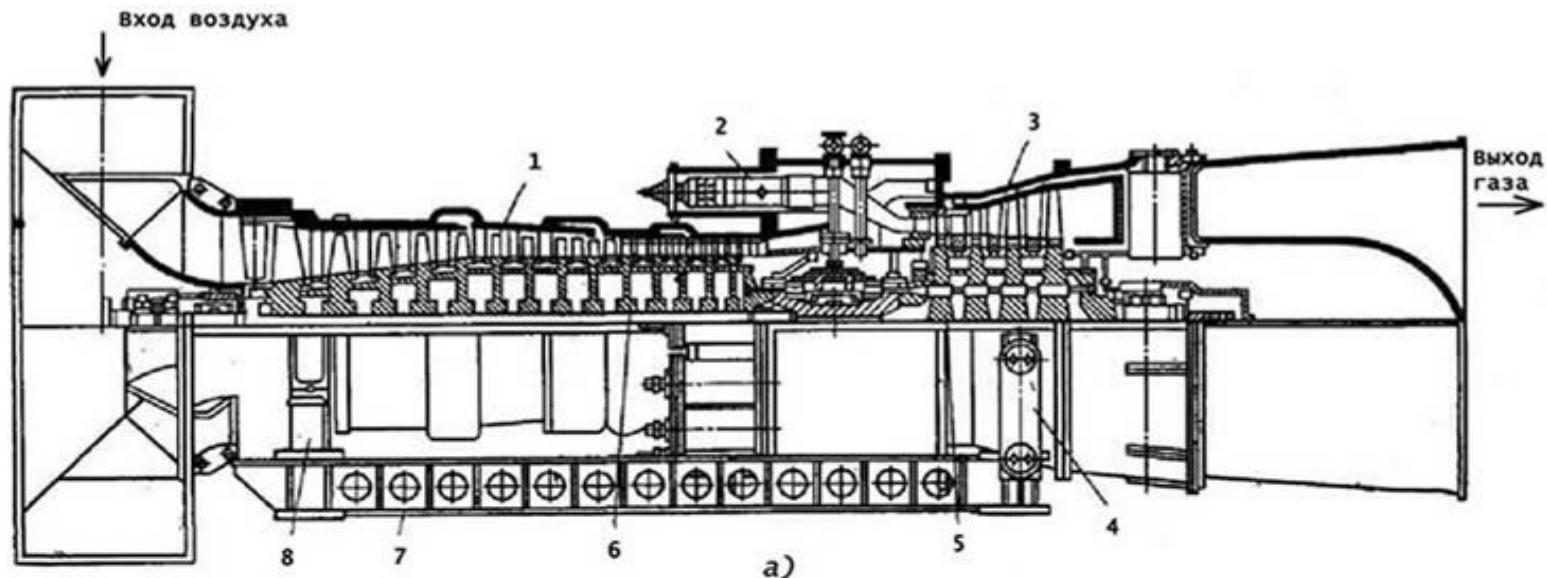
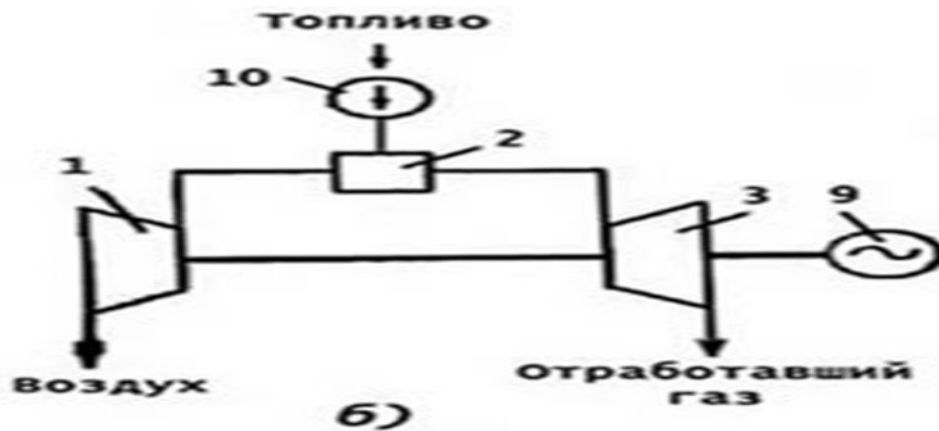


Рис.1 Газотурбинная установка  
а - устройство, б - тепловая схема;  
1 - компрессор, 2 - камеры сгорания, 3 - газовая турбина,  
4,8 - опоры, 5,6 - роторы турбины и компрессора,  
7 - рама, 9 - потребитель мощности, 10 - топливный насос.

Газотурбинная установка состоит из трех основных элементов. газовой турбины, камер сгорания и воздушного компрессора.

На рис. 1-а показана газотурбинная установка, компрессор 1, камеры сгорания 2 и газовая турбина 3 которой расположены в едином сборном корпусе. Роторы 6 и 5 компрессора и турбины жестко соединены друг с другом и опираются на три подшипника. Четырнадцать камер сгорания располагаются вокруг компрессора каждая в своем корпусе. Воздух поступает в компрессор через входной патрубок и уходит из газовой турбины через выхлопной патрубок. Корпус газотурбинной установки опирается на четыре опоры 4 и 8, которые расположены на единой раме 7.



Б)-Тепловая схема

Тепловая схема такой газотурбинной установки показана на рис. 1-б. В камеры сгорания топливным насосом подаются топливо и сжатый воздух после компрессора. Топливо перемешивается с воздухом, который служит окислителем, поджигается и сгорает. Чистые продукты сгорания также смешиваются с воздухом, чтобы температура газа, получившегося после смешения, не превышала заданного значения. Из камер сгорания газ поступает в газовую турбину, которая предназначена для преобразования его потенциальной энергии в механическую работу. Совершая работу, газ остывает и давление его уменьшается до атмосферного. Из газовой турбины газ выбрасывается в окружающую среду. Из атмосферы в компрессор поступает чистый воздух. В компрессоре его давление увеличивается и температура растет. На привод компрессора приходится отбирать значительную часть мощности турбины. Газотурбинные установки, работающие по такой схеме, называют установками открытого цикла. Большинство современных ГТУ работает по этой схеме.



Кроме того, применяются замкнутые ГТУ (рис. 2). В замкнутых ГТУ также имеются компрессор 1 и турбина 2. Вместо камеры сгорания используется источник теплоты 4, в котором теплота передается рабочему телу без перемешивания с топливом. В качестве рабочего тела может применяться воздух, углекислый газ, пары ртути или другие газы.

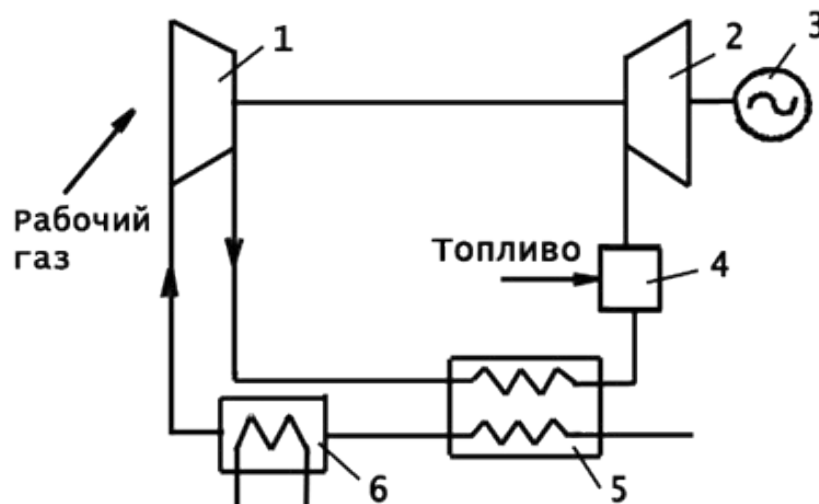


Рис. 2. Схема замкнутой ГТУ:

- 1 - компрессор, 2 - турбина, 3 - электрический генератор,  
4 - источник теплоты, 5 - регенератор, 6 – охладитель

Рабочее тело, давление которого повышено в компрессоре, в источнике теплоты 4 нагревается и поступает в турбину 2, в которой отдает свою энергию. После турбины газ поступает в промежуточный теплообменник 5 (регенератор), в котором он подогревает воздух, а затем охлаждается в охладителе 6, поступает в компрессор 1, и цикл повторяется. В качестве источника теплоты могут использоваться специальные котлы для нагрева рабочего тела энергией сжигаемого топлива или атомные реакторы.

# Устройство современной стационарной высокотемпературной ГТУ

Традиционная современная газотурбинная установка (ГТУ) — это совокупность воздушного компрессора, камеры сгорания и газовой турбины, а также вспомогательных систем, обеспечивающих ее работу. Совокупность ГТУ и электрического генератора называют газотурбинным агрегатом.

Необходимо подчеркнуть одно важное отличие ГТУ от ПТУ. В состав ПТУ не входит котел, точнее котел рассматривается как отдельный источник тепла; при таком рассмотрении котел — это «черный ящик»: в него входит питательная вода с температурой  $t_{п.в}$ , а выходит пар с параметрами  $p_0$ ,  $t_0$ . Паротурбинная установка без котла как физического объекта работать не может. В ГТУ камера сгорания — это ее неотъемлемый элемент. В этом смысле ГТУ — самодостаточна.

Газотурбинные установки отличаются чрезвычайно большим разнообразием, пожалуй, даже большим, чем паротурбинные. Ниже рассмотрим наиболее перспективные и наиболее используемые в энергетике ГТУ простого цикла.

Принципиальная схема такой ГТУ показана на рис.1. Воздух из атмосферы поступает на вход воздушного компрессора, который представляет собой роторную турбомашину с проточной частью, состоящей из вращающихся и неподвижных решеток. Отношение давления за компрессором  $p_b$  к давлению перед ним  $p_a$  называется степенью сжатия воздушного компрессора. Ротор компрессора приводится газовой турбиной. Поток сжатого воздуха подается в одну, две (как на рис.1) или более камер сгорания. При этом в большинстве случаев поток воздуха, идущий из компрессора, разделяется на два потока. Первый поток направляется к горелочным устройствам, куда также подается топливо (газ или жидкое топливо). При сжигании топлива образуются продукты сгорания топлива высокой температуры. К ним подмешивается относительно холодный воздух второго потока с тем, чтобы получить газы (их обычно называют рабочими газами) с допустимой для деталей газовой турбины температурой.

Рабочие газы с давлением  $p_c$  ( $p_c < p_b$  из-за гидравлического сопротивления камеры сгорания) подаются в проточную часть газовой турбины, принцип действия которой ничем не отличается от принципа действия паровой турбины (отличие состоит только в том, что газовая турбина работает на продуктах сгорания топлива, а не на паре). В газовой турбине рабочие газы расширяются практически до атмосферного давления  $p_d$ , поступают в выходной диффузор 14, и из него — либо сразу в дымовую трубу, либо предварительно в какой-либо теплообменник, использующий теплоту уходящих газов ГТУ.

Вследствие расширения газов в газовой турбине, последняя вырабатывает мощность. Весьма значительная ее часть (примерно половина) тратится на привод

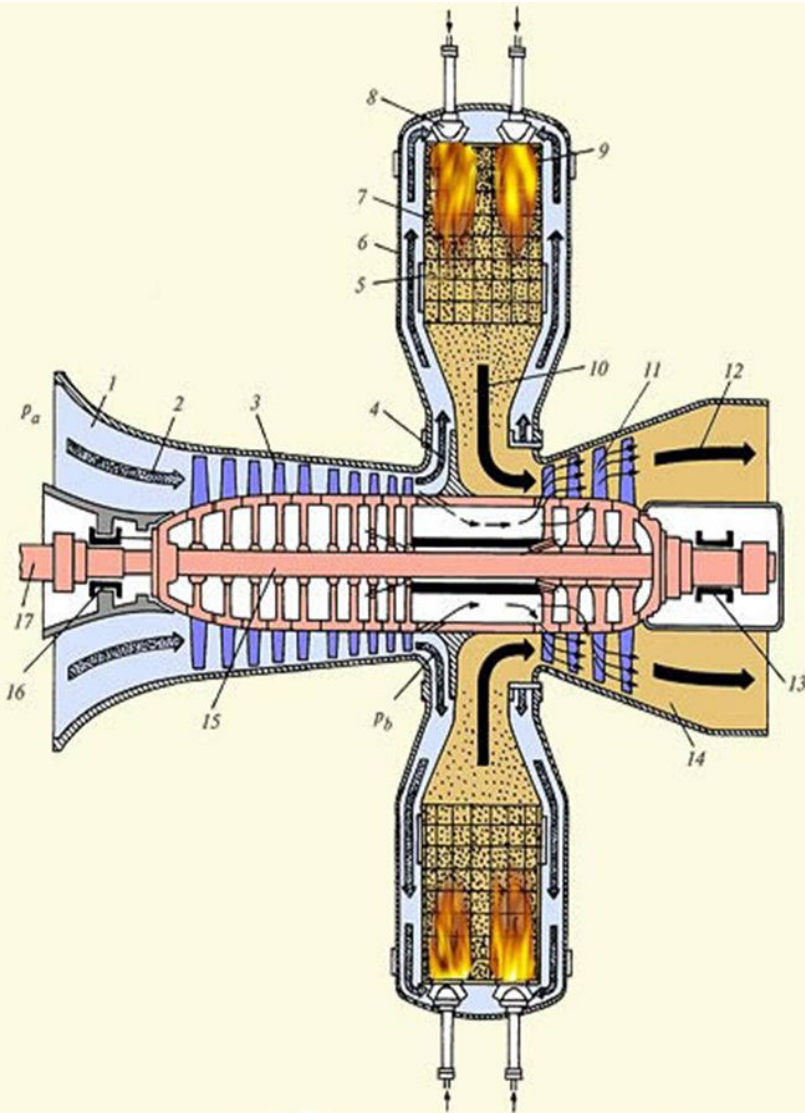
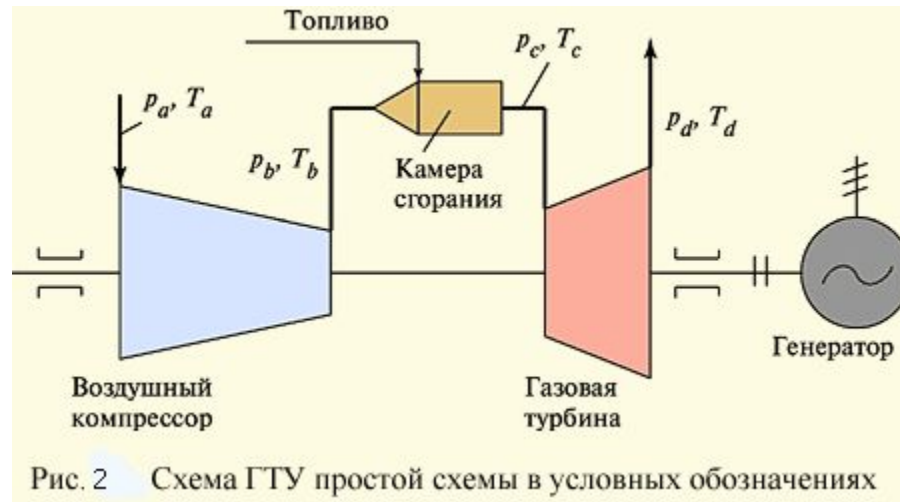


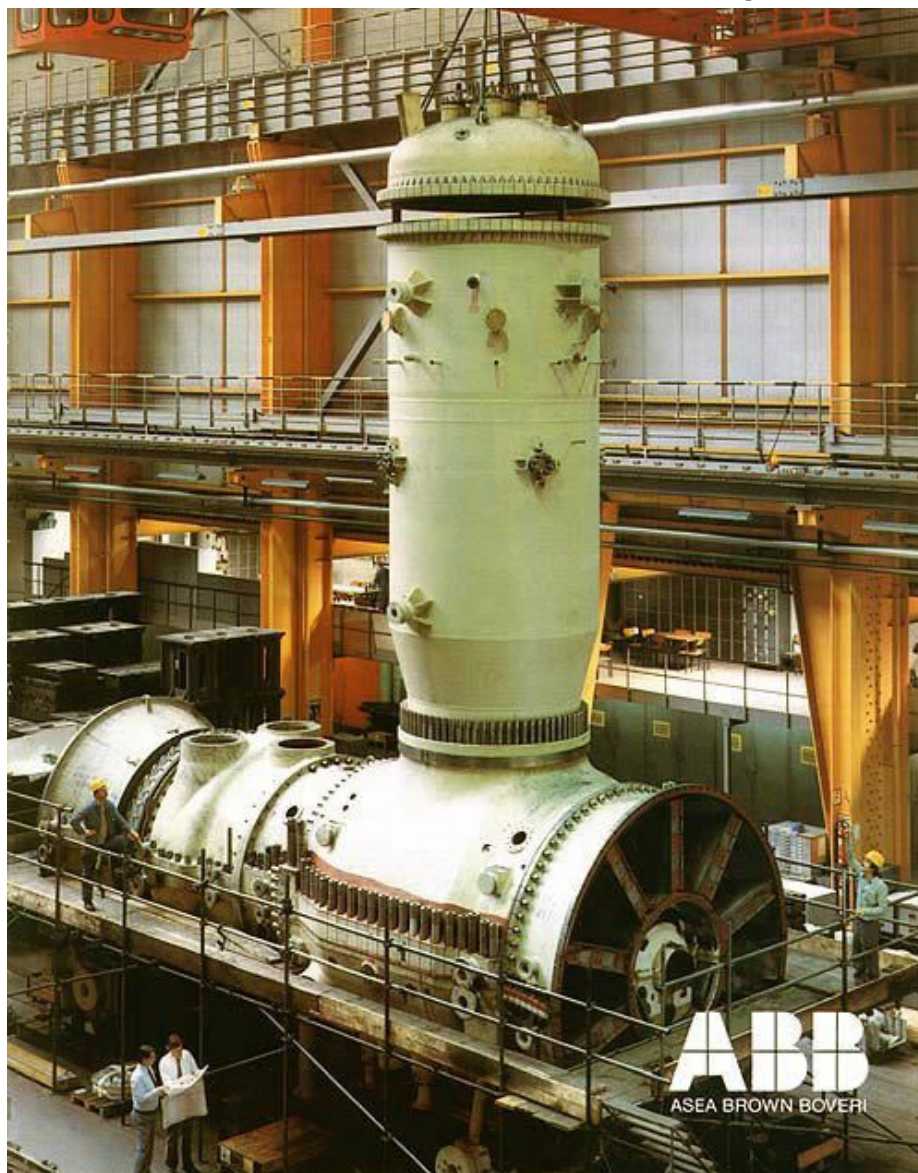
Рис. 1 Принципиальная схема ГТУ (рисунок из проспекта фирмы Siemens)

Для изображения схем ГТУ применяют условные обозначения, подобные тем, которые используют для ПТУ (рис.2).



Из рассмотрения рис.1 и 2 становится ясным, почему описанная ГТУ называется ГТУ простого термодинамического цикла. Более простой ГТУ быть не может, так как она содержит минимум необходимых компонентов, обеспечивающих последовательные процессы сжатия, нагрева и расширения рабочего тела: один компрессор, одну или несколько камер сгорания, работающих в одинаковых условиях, и одну газовую турбину. Наряду с ГТУ простого цикла, существуют ГТУ сложного цикла, которые могут содержать несколько компрессоров, турбин и камер сгорания.

## Камеры сгорания ГТУ



Главный недостаток выносных камер сгорания — большие габариты, которые хорошо видны из рис.12. Справа от камеры размещается газовая турбина, слева — компрессор.

Рис. 12. Внешний вид ГТУ типа 13Е на сборочном стенде завода



# Газовая турбина

Газовая турбина является наиболее сложным элементом ГТУ, что обусловлено в первую очередь очень высокой температурой рабочих газов, протекающих через ее проточную часть: температура газов перед турбиной  $1350^{\circ}\text{C}$  в настоящее время считается «стандартной», и ведущие фирмы, в первую очередь General Electric, работают над освоением начальной температуры  $1500^{\circ}\text{C}$ . Напомним, что «стандартная» начальная температура для паровых турбин составляет  $540^{\circ}\text{C}$ , а в перспективе — температура  $600\text{—}620^{\circ}\text{C}$ .

Стремление повысить начальную температуру связано, прежде всего, с выигрышем в экономичности, который она дает.

Для обеспечения длительной работы газовой турбины используют сочетание двух средств. Первое средство — применение для наиболее нагруженных деталей жаропрочных материалов, способных сопротивляться действию высоких механических нагрузок и температур (в первую очередь для сопловых и рабочих лопаток). Если для лопаток паровых турбин и некоторых других элементов применяются стали (т.е. сплавы на основе железа) с содержанием хрома  $12\text{—}13\%$ , то для лопаток газовых турбин используют сплавы на никелевой основе (нимоники), которые способны при реально действующих механических нагрузках и необходимом сроке службы выдержать температуру  $800\text{—}850^{\circ}\text{C}$ . Поэтому вместе с первым используют второе средство — охлаждение наиболее горячих деталей.

## Система охлаждения газовой турбины

Для охлаждения большинства современных ГТУ используется воздух, отбираемый из различных ступеней воздушного компрессора. Уже работают ГТУ, в которых для охлаждения используется водяной пар, который является лучшим охлаждающим агентом, чем воздух. Охлаждающий воздух после нагрева в охлаждаемой детали сбрасывается в проточную часть газовой турбины. Такая система охлаждения называется открытой. Существуют замкнутые системы охлаждения, в которых нагретый в детали охлаждающий агент направляется в холодильник и затем снова возвращается для охлаждения детали. Такая система не только весьма сложна, но и требует утилизации тепла, отбираемого в холодильнике.

Система охлаждения газовой турбины — самая сложная система в ГТУ, определяющая ее срок службы. Она обеспечивает не только поддержание допустимого уровня рабочих и сопловых лопаток, но и корпусных элементов, дисков, несущих рабочие лопатки, запирающие уплотнения подшипников, где циркулирует масло и т.д. Эта система чрезвычайно сильно разветвлена и организуется так, чтобы каждый охлаждаемый элемент получал охлаждающий воздух тех параметров и в том количестве, который необходим для поддержания его оптимальной температуры. Излишнее охлаждение деталей так же вредно, как и недостаточное, так как оно приводит к повышенным затратам охлаждающего воздуха, на сжатие которого в компрессоре затрачивается мощность турбины. Кроме того, повышенные расходы воздуха на охлаждение приводят к снижению температуры газов за турбиной, что очень существенно влияет на работу оборудования, установленного за ГТУ (например, паротурбинной установки, работающей в составе ПТУ). Наконец, система охлаждения должна обеспечивать не только необходимый уровень температур деталей, но и равномерность их прогрева, исключая появление опасных температурных напряжений, циклическое действие которых приводит к появлению трещин.

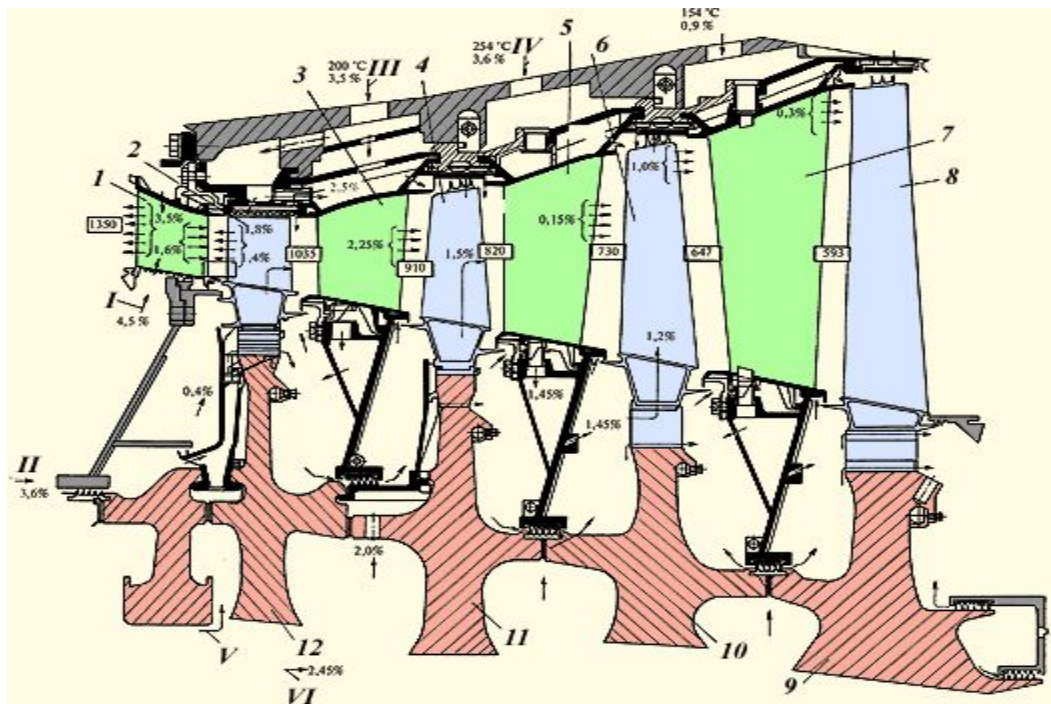


Рис. 17. Схема охлаждения современной газовой турбины (проект ЛМЗ-«Авиадвигатель»)

На рис.17 показан пример схемы охлаждения типичной газовой турбины. В прямоугольных рамках приведены значения температур газов. Перед сопловым аппаратом 1-й ступени 1 она достигает  $1350^{\circ}\text{C}$ . За ним, т.е. перед рабочей решеткой 1-й ступени она составляет  $1130^{\circ}\text{C}$ . Даже перед рабочей лопаткой последней ступени она находится на уровне  $600^{\circ}\text{C}$ . Газы этой температуры омывают сопловые и рабочие лопатки, и если бы они не охлаждались, то их температура равнялась бы температуре газов и срок их службы ограничивался бы несколькими часами.





Рис. 18. Сопловые (слева) и рабочие (справа) лопатки газовой турбины ГТУ фирмы Siemens

Газовая турбина обычно имеет 3—4 ступени, т.е. 6—8 венцов решеток, и чаще всего охлаждаются лопатки всех венцов, кроме рабочих лопаток последней ступени. Воздух для охлаждения сопловых лопаток подводится внутрь через их торцы и сбрасывается через многочисленные (600—700 отверстий диаметром 0,5—0,6 мм) отверстия, расположенные в соответствующих зонах профиля (рис.18). К рабочим лопаткам охлаждающий воздух подводится через отверстия, выполненные в торцах хвостовиков.

# Топливо для газотурбинной установки

Газотурбинная установка может работать как на газообразном, так и на жидком топливе. Так, в газотурбинных агрегатах может использоваться:

- Дизельное топливо
- Керосин
- Природный газ
- Попутный нефтяной газ
- Биогаз (образованный из отходов сточных вод, мусорных свалок и т.п.)
- Шахтный газ
- Коксовый газ
- Древесный газ и др.

Большинство газотурбинных установок могут работать на низкокалорийных топливах с минимальной концентрацией метана (до 30%).

## Преимущества газотурбинных электростанций:

- Минимальный ущерб для окружающей среды: низкий расход масла, возможность работы на отходах производства; выбросы вредных веществ: в пределах 25 мг/кг.
- Низкий уровень шума и вибраций. Этот показатель не превышает 80-85 дБа.
- Компактные размеры и небольшой вес дают возможность разместить газотурбинную установку на небольшой площади, что позволяет существенно сэкономить средства. Возможны варианты крышного размещения газотурбинных установок небольшой мощности.
- Возможность работы на различных видах газа позволяет использовать газотурбинный агрегат в любом производстве на самом экономически выгодном виде топлива.
- Эксплуатация газотурбинных электростанций как в автономном режиме, так и параллельно с сетью.
- Возможность работы газотурбинной электростанции в течение длительного времени при очень низких нагрузках, в том числе в режиме холостого хода.
- Максимально допустимая перегрузка: 150% номинального тока в течение 1 минуты, 110% номинального тока в течение 2 часов.
- Способность системы генератора и возбuditеля выдерживать не менее 300% номинального непрерывного тока генератора в течение 10 секунд в случае трехфазного симметричного короткого замыкания на клеммах генератора, тем самым, обеспечивая достаточное время для срабатывания селективных выключателей.