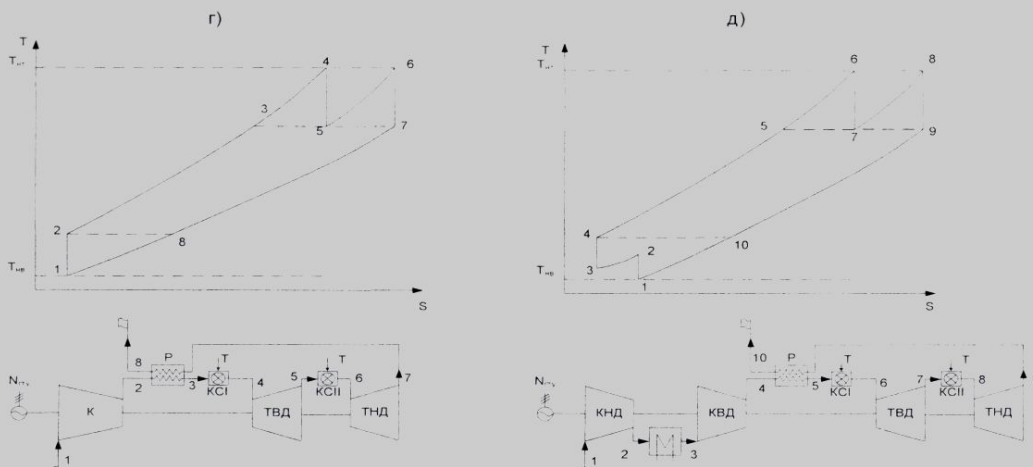
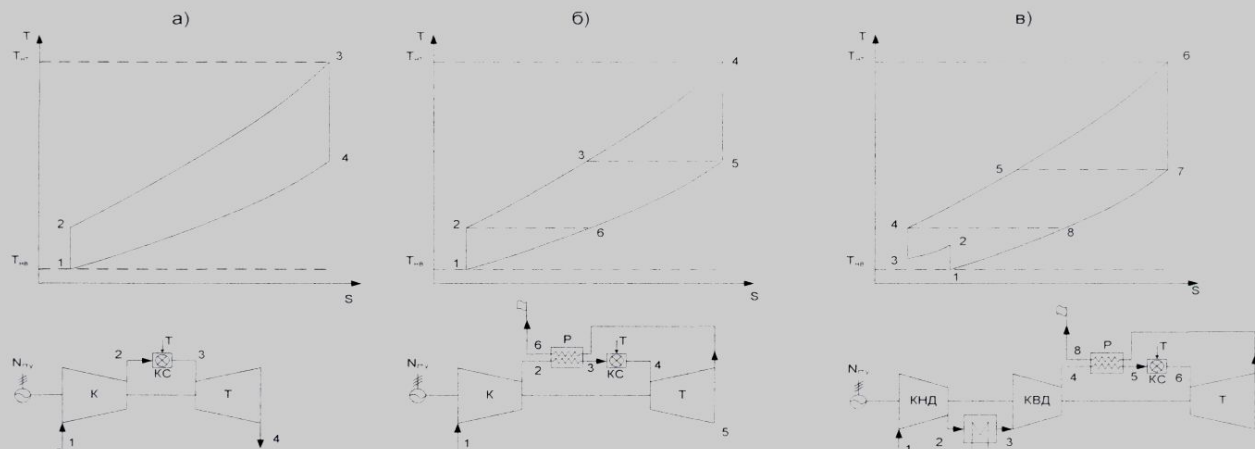


Повышение экономичности газотурбинных установок

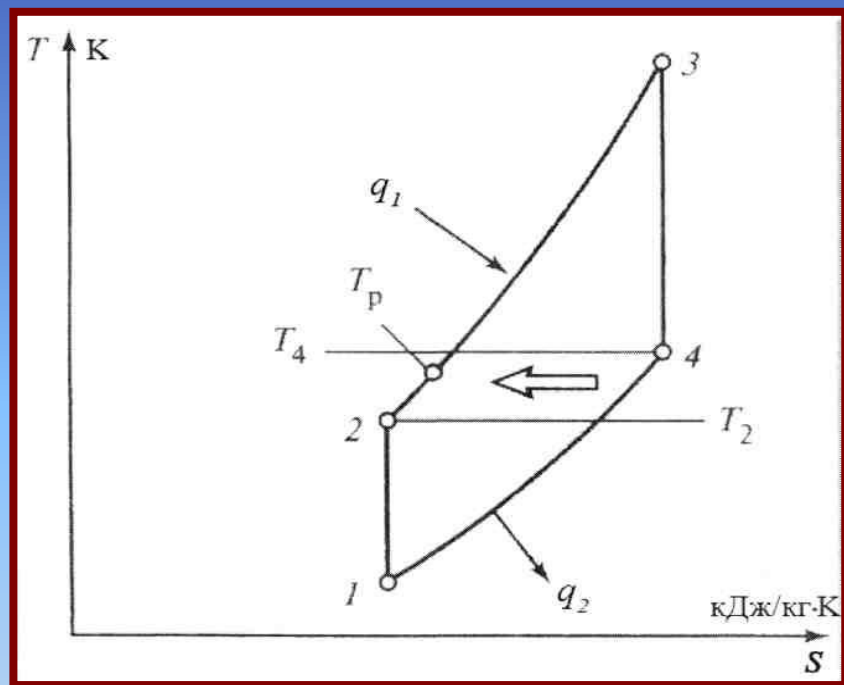
Тепловые схемы и термодинамические процессы различных типов



а) одновальная ГТУ с разомкнутым циклом
 б) ГТУ с регенерацией
 в) ГТУ с регенерацией и промежуточным охлаждением воздуха при сжатии в компрессоре
 г) ГТУ с регенерацией и промежуточным подогревом газов в газовой турбине
 д) ГТУ с регенерацией, промежуточным охлаждением воздуха в компрессоре и подогревом газов в газовой турбине

- Варианты тепловых схем ГТУ:
- а) без регенерации;
 - б) с применением регенерации;
 - в) сочетание регенерации с промежуточным охлаждением воздуха в процессе его сжатия в компрессоре;
 - г) с регенерацией и промежуточным подогревом газов в газовой турбине;
 - д) схема с сочетанием вариантов б, в, г.

Схема и цикл ГТУ с регенерацией теплоты



В регенераторе температура воздуха повышается на 180...250°C

Степень регенерации

$$\sigma = \frac{c_{PB}(T_P - T_2)}{c_{PG}(T_4 - T_2)} \approx \frac{T_P - T_2}{T_4 - T_2}$$

T_P - температура нагрева воздуха в регенераторе

$$\eta_{ip} = \frac{\left(1 - \frac{1}{\pi^m}\right) \cdot \left[\frac{1}{(\eta_K^i \cdot \tau)}\right] \cdot (\pi^m - 1)}{(1 - \sigma) \cdot \left\{ \left[1 - \eta_T^i \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi^m}\right)\right] - \frac{1}{\tau} \cdot \left[1 + \left(\frac{1}{\eta_K^i}\right) \cdot (\pi^m - 1)\right] \right\}} \cdot \eta_{KC}^T$$

Основная идея - снижение расхода топлива за счёт сокращения потерь теплоты с уходящими газами.

Основные потери в газотурбинной установке - это потери теплоты с уходящими газами, которые составляют 60...70 %, а иногда и более процентов от подводимой с топливом энергии. В простой ГТУ газы, покидающие турбину, имеют высокую температуру 400...700 °С. Поэтому экономичность ГТУ существенно повысится, если применить регенерацию теплоты, т.е. использовать часть уходящей теплоты для подготовки сжатого воздуха, поступающего в камеру сгорания.

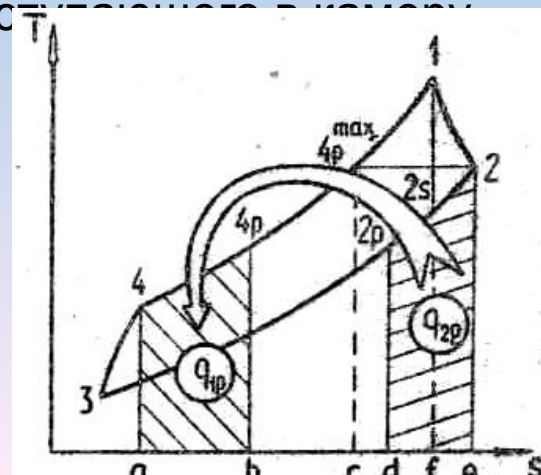
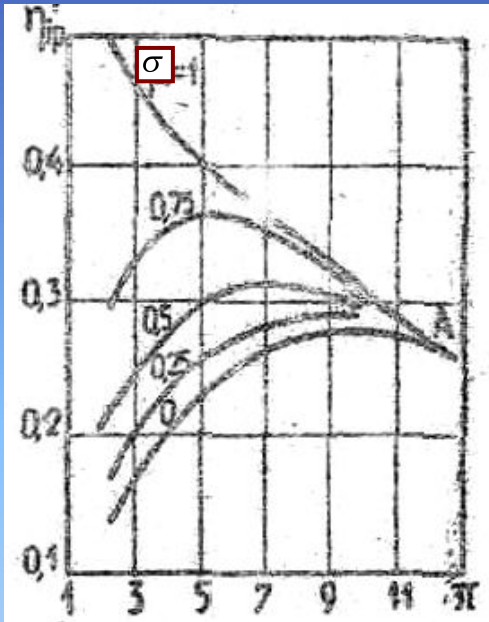


Схема и цикл ГТУ с регенерацией теплоты



При $\sigma > 0,5$ с увеличением степени регенерации экономичность ГТУ соответственно возрастает за счет уменьшения затраты топлива в камере сгорания.

Величина σ практически определяется поверхностью нагрева F регенератора. Эта зависимость установлена проф. В.В. Уваровым:

$$F = M_B \cdot \frac{C_p}{K} \cdot \frac{\sigma}{1 - \sigma}$$

где: M_B —

C_p —

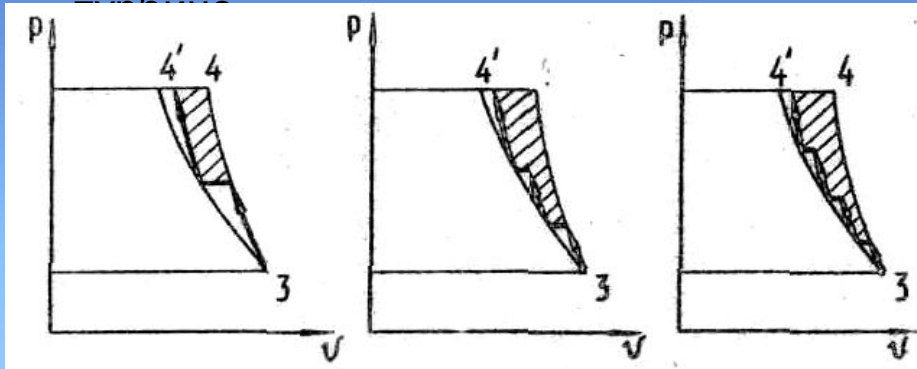
- 1) кривые пересекаются в одной точке A , соответствующей такому значению степени повышения давления π , при котором $T_4 = T_2$. В этом случае регенерация становится невозможной;
- 2) при повышении степени регенерации μ оптимальная степень повышения давления $\pi_{\text{опт}}$ снижается. Это облегчает проектирование компрессора;
- 3) при значениях $\sigma = 0,4 \dots 0,5$ влияние регенерации на к.п.д. ГТУ становится малоэффективным.

У большинства современных ГТУ с регенерацией обычно $\sigma = 0,6 \dots 0,8$. При этом экономия в расходе топлива за счет регенерации составляет примерно 22...28 %. На практике известны ГТУ с $\sigma = 0,91$ (регенератор фирмы "Эшер-Висс") и гелиевые регенераторы с $\sigma = 0,95$. Здесь нужно иметь в виду, что при $\sigma > 0,8$ поверхность нагрева регенератора, а, следовательно, его габариты и вес, получаются обычно очень большими. Выбор оптимального σ производится на основе технико-экономического расчета с учетом всех влияющих факторов.

к.п.д. ГТУ с регенерацией теплоты в настоящие время составляет примерно 39...43 % в то время как без регенерации 35...38 %. Повышение к.п.д. на 4...5 %, например, для одного агрегата 20 МВт, позволит сэкономить 140...180 м³/ч топливного газа или 0,9...1,1 млн. м³ в год.

Схемы ГТУ со ступенчатым сжатием с промежуточным охлаждением, со ступенчатым расширением и промежуточным подводом теплоты

Основная идея – уменьшение затрачиваемой работы на сжатие воздуха в компрессоре и увеличение работы, получаемой при расширении рабочего газа в турбине



Процессы ступенчатого сжатия с промежуточным охлаждением а, б, в - соответственно двухступенчатое, трехступенчатое и четырехступенчатое сжатие с промежуточным охлаждением после каждой ступени

Промежуточное охлаждение снижает суммарную работу сжатия и повышает электрическую мощность установки. Более холодный воздух после компрессора не требует дополнительного топлива для его нагрева до начальной температуры перед ГТ, так как он получает больше тепла от выходных газов. Это существенно повышает удельную мощность и эффективность, которая может составить 47 – 48 %.

Внутренний к.п.д. ГТУ с промежуточным охлаждением

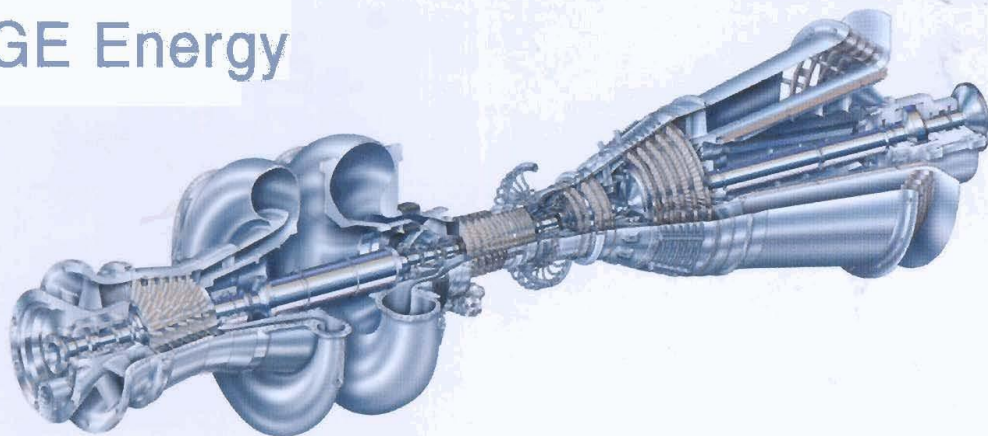
$$\eta_{i_{оох}} = \frac{L_i}{q_{KC}} = \frac{L_T \cdot \eta_T^i - (L_{K1}/\eta_{K1} + L_{K2}/\eta_{K2})}{q_{KC}}$$

Находят применение циклы Брайтона с «влажной» регенерацией (Water-Injected Recuperated WIR). Вода в таких циклах впрыскивается после компрессора, а также в регенераторе. Это позволяет охладить сжатый воздух и забрать больше теплоты от уходящих газов, понизив при этом температуру отвода теплоты. Водяные пары, расширяясь в газовой турбине, повышают ее мощность за счет использования дополнительной теплоты.

ПРИМЕРЫ НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ТИПОВ ГТУ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

ГТУ со ступенчатым сжатием с промежуточным охлаждением

GE Energy



Газовая турбина **LMS100** (50Гц)

Фирма GE разработала ГТУ типа LMS 100 с промежуточным охлаждением воздуха, но без регенерации, с высокой степенью повышения давления $\pi_K = 40$. Ее КПД достигает 45 %.

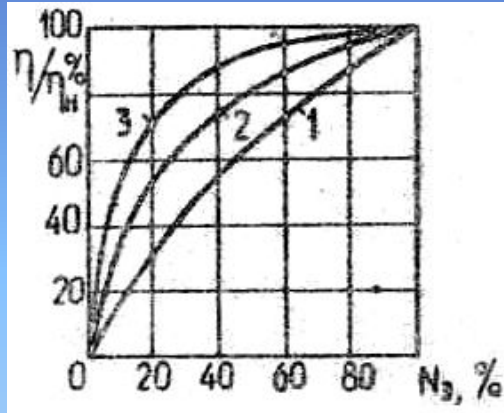
Показатели ГТУ LMS100 в зависимости от температуры наружного воздуха

Температура наружного воздуха, °C	-30	-15	0	15	30
Мощность ГТУ на клеммах генератора, МВт	100,4	100,7	101,4	102,5	97,1
КПД ГТУ, %	44,4	44,2	43,9	43,7	42,7
Температура газов за ГТУ, °C	385	389	398	415,0	428
Расход газов за ГТУ, кг/с	217	216	215	212	202

МНГОВАЛЬНЫЕ

ГТУ

Основная идея - деление турбины на две и более ступеней с их независимым друг от друга числом оборотов, что позволяет регулировать мощность ГТУ при частичных нагрузках, не снижая эффективности изменением расхода и топлива, и воздуха.



Изменение относительного к.п.д. ГТУ в зависимости от нагрузки:

1-простая одновальная ГТУ открытого цикла; 2-двухвальная ГТУ открытого цикла; 3-замкнутая ГТУ

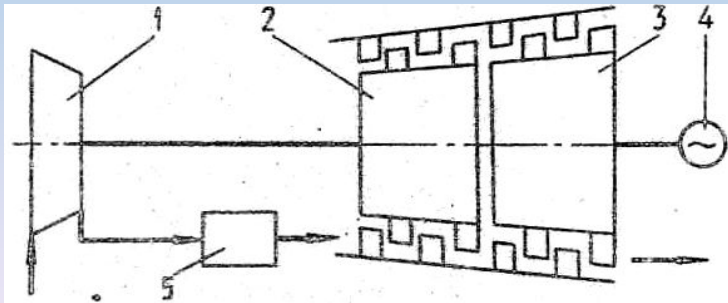


Схема простой двухвальной ГТУ открытого цикла:

1-компрессор; 2-ТВД; 3-ТНД (силовая); 4-нагрузка; 5-камера сгорания

Многовальные ГТУ дают возможность повысить эффективность ГТУ особенно при работе на частичных (неполных) нагрузках. В одновальной ГТУ мощность в установке регулируется только изменением расхода топлива. Для уменьшения нагрузки, уменьшают расход топлива, а при этом расход воздуха остается постоянным, поскольку компрессор и газовая турбина жестко связаны одним валом.

Отсюда вывод,, что всегда, когда по условиям эксплуатации большую часть времени приходится работать на частичных нагрузках, целесообразно применять многовальные ГТУ.

Одна часть, обычно высокого давления 2, служит приводом компрессора 1 и может работать с переменным числом оборотов. Вторая часть, силовая турбина 3, работает со строго постоянным числом оборотов, если она предназначена для привода электрогенератора, и может иметь практически любую скорость вращения, если она предназначена для привода нагнетателя. Регулирование в ГТУ этого типа осуществляется не только путем изменения расхода топлива, но и за счет изменения расхода воздуха, подаваемого компрессором 1.

Такой метод позволяет значительно меньше снижать или вообще не снижать температуру T_1 при работе на частичных нагрузках и, тем самым поддерживать к.п.д. цикла на более высоком уровне