

ТЕПЛОСИЛОВЫЕ ЦИКЛЫ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК

Комбинированный цикл – последовательность простых циклов, реализуемых на различных рабочих телах и в различных температурных зонах.

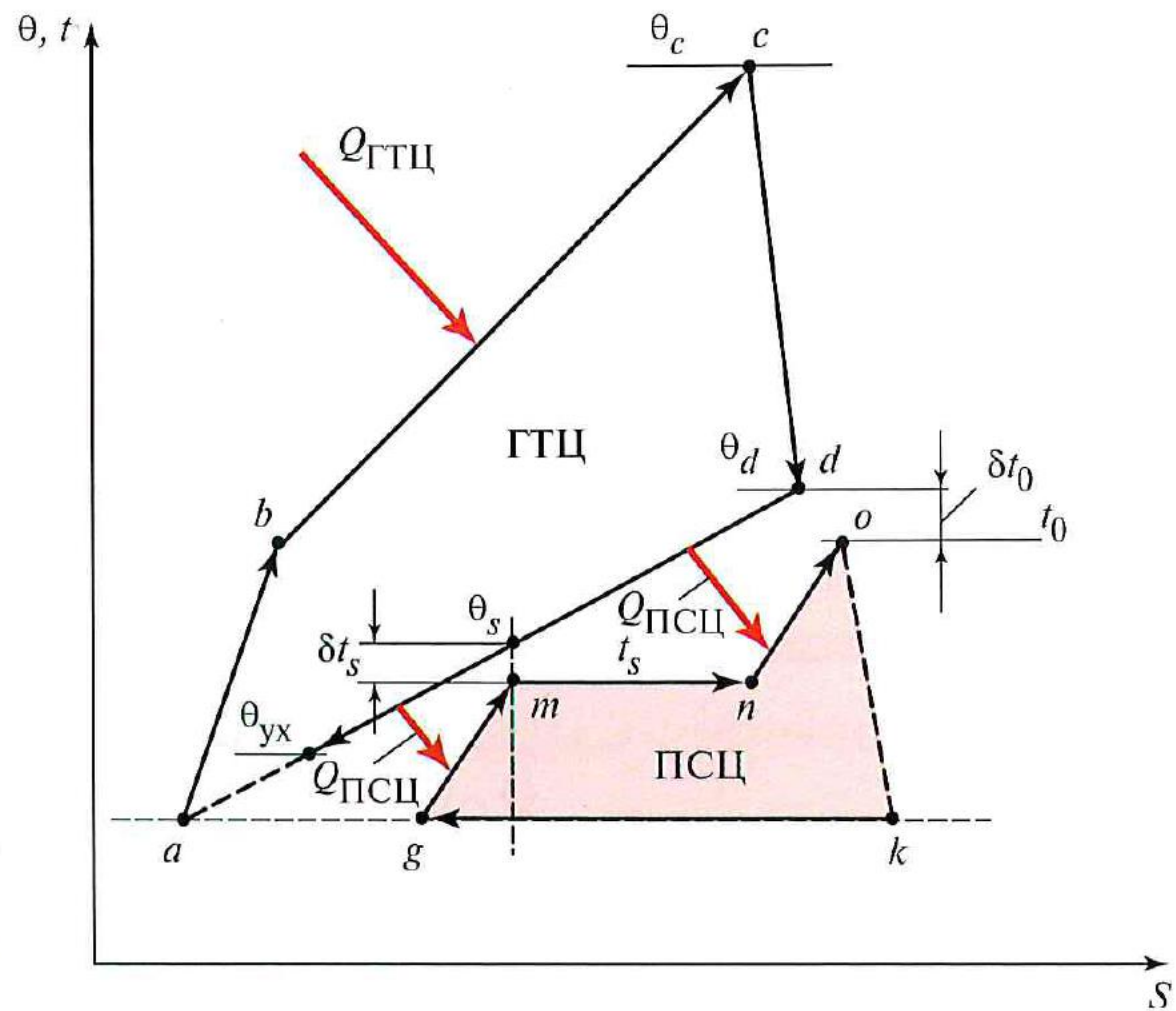
Между простыми циклами обязательно имеется *термодинамическая связь*: в цикле, осуществляемом в наиболее высокотемпературной зоне, часть подведенной теплоты преобразуется в работу, а другая часть в соответствии со вторым законом термодинамики передается в цикл, реализуемый в более низкой температурной зоне, для получения дополнительной работы.

Бинарный цикл – частный случай комбинированного цикла.

Энергетические установки, использующие газотурбинный и паросиловой циклы, называются парогазовыми.

Парогазовый цикл – частный случай бинарного цикла, в котором роль высокотемпературного цикла играет газотурбинный цикл, а роль низкотемпературного – паротурбинный.

Парогазовые циклы отличаются большим разнообразием, вызванным способами использования тепловой энергии выхлопных газов ГТУ.



Простейший утилизационный цикл, состоящий из газотурбинного (ГТЦ) и паросилового (ПСЦ) циклов

Фигура $abcd$ представляет собой ГТЦ с подводом в камеру сгорания (bc) тепловой мощности $Q_{гтц}$. Площадь данной фигуры пропорциональна мощности ГТЦ $N_{гтц}$, а разность $(Q_{гтц} - N_{гтц})$ равна тепловой мощности выхлопных газов ГТУ.

Данная тепловая мощность передается в теплосиловой цикл $gmno$ и затрачивается на нагрев сжатой насосом воды (gm), ее испарение (mn) и перегрев пара (no).

Начальная температура газов в среднем составляет 1200-1400 °С, степень расширения в газовой турбине $\pi=16-18$. Данные показатели обеспечивают температуру выхлопных газов ГТУ 550-580 °С, что позволяет обеспечить получение пара с начальной температурой 510-560 °С.

Механическая мощность ПСЦ получается за счет тепловой мощности выхлопных газов ГТУ, и поэтому рассматриваемая ПГУ называется утилизационной. В ней теплота топлива, подведенная в камеру сгорания, последовательно используется сначала в газотурбинном, а затем в паросиловом цикле, поэтому утилизационные ПГУ являются самыми экономичными из всех известных типов.

КПД рассматриваемого утилизационного цикла:

$$\eta_{\text{упгц}} = \eta_{\text{гтц}} + (1 - \eta_{\text{гтц}})\eta_{\text{псц}}.$$

В более общем случае ПГУ может быть организована таким образом, что в ПСЦ поступает не только тепловая мощность выхлопных газов ГТУ, но и дополнительная тепловая мощность $Q_1^{\text{к}}$, получаемая в результате сжигания дополнительного топлива.

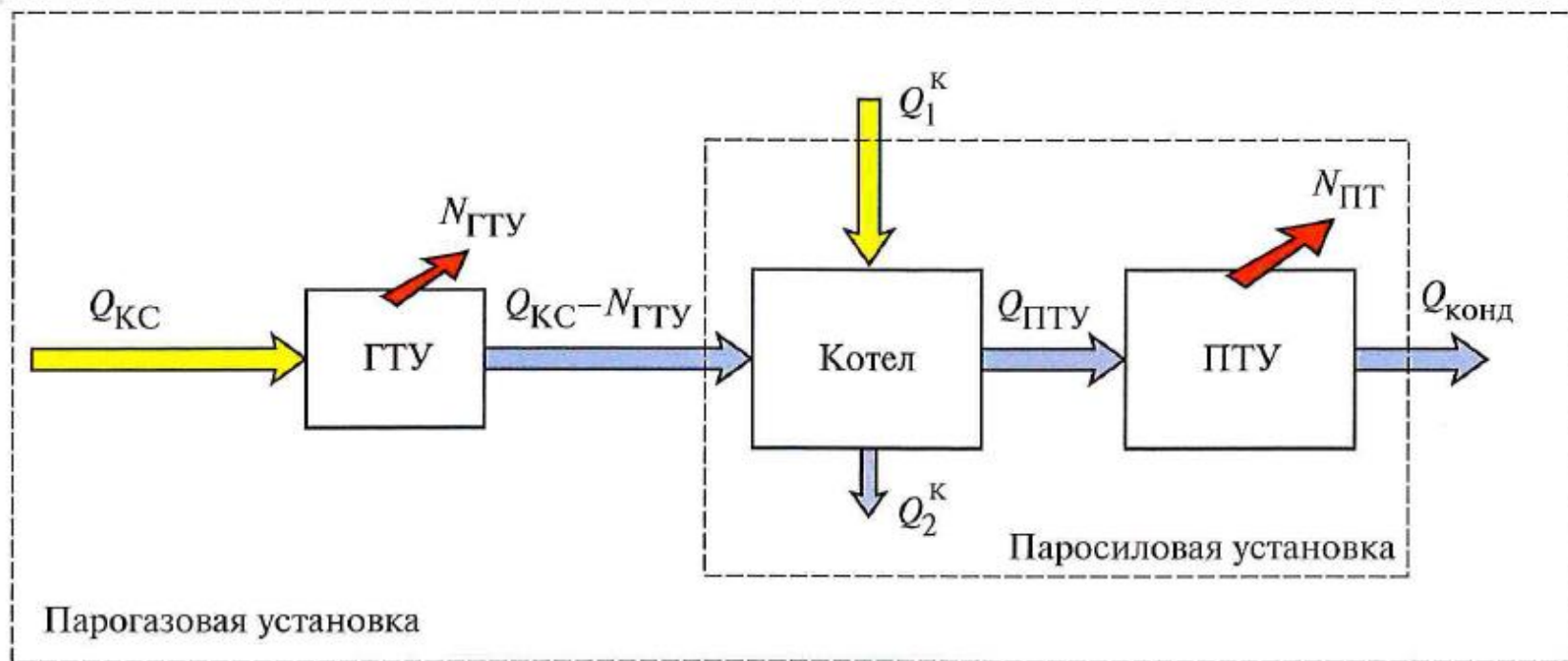


Рис. 1.3. Схема потоков мощности в ПГУ с дополнительным подводом теплоты в низкотемпературный цикл

В соответствии с первым законом термодинамики тепловая мощность потока пара

$$Q_{\text{ПТУ}} = (Q_{\text{КС}} - N_{\text{ГТУ}}) + Q_1^{\text{К}} - Q_2^{\text{К}},$$

где $Q_2^{\text{К}}$ — тепловая мощность уходящих газов котла.

Из схемы потоков мощности следует, что КПД ПТУ:

$$\eta_{\text{ПТУ}} = N_{\text{ПТ}} / Q_{\text{ПТУ}},$$

КПД котла-утилизатора:

$$\eta_{\text{к}} = \frac{Q_{\text{ПТУ}}}{(Q_{\text{КС}} - N_{\text{ГТУ}}) + Q_1^{\text{к}}}.$$

КПД паросиловой установки:

$$\eta_{\text{ПСУ}} = \frac{N_{\text{ПТ}}}{(Q_{\text{КС}} - N_{\text{ГТУ}}) + Q_1^{\text{к}}},$$

$$\eta_{\text{ПСУ}} = \eta_{\text{к}} \eta_{\text{ПТУ}}.$$

КПД ПГУ:

$$\begin{aligned}\eta_{\text{ПГУ}} &= \frac{N_{\text{ГТУ}} + N_{\text{ПТ}}}{Q_{\text{КС}} + Q_1^{\text{к}}} = \frac{N_{\text{ГТУ}}}{Q_{\text{КС}}} \frac{Q_{\text{КС}}}{Q_{\text{КС}} + Q_1^{\text{к}}} + \frac{N_{\text{ПТ}}}{Q_{\text{КС}} - N_{\text{ГТУ}} + Q_1^{\text{к}}} \frac{Q_{\text{КС}} - N_{\text{ГТУ}}}{Q_{\text{КС}} + Q_1^{\text{к}}} \\ &= \beta \eta_{\text{ГТУ}} + (1 - \beta) \eta_{\text{к}} \eta_{\text{ПТУ}},\end{aligned}$$

где, как и ранее,

$$\beta = Q_{\text{КС}} / (Q_{\text{КС}} + Q_1^{\text{к}})$$

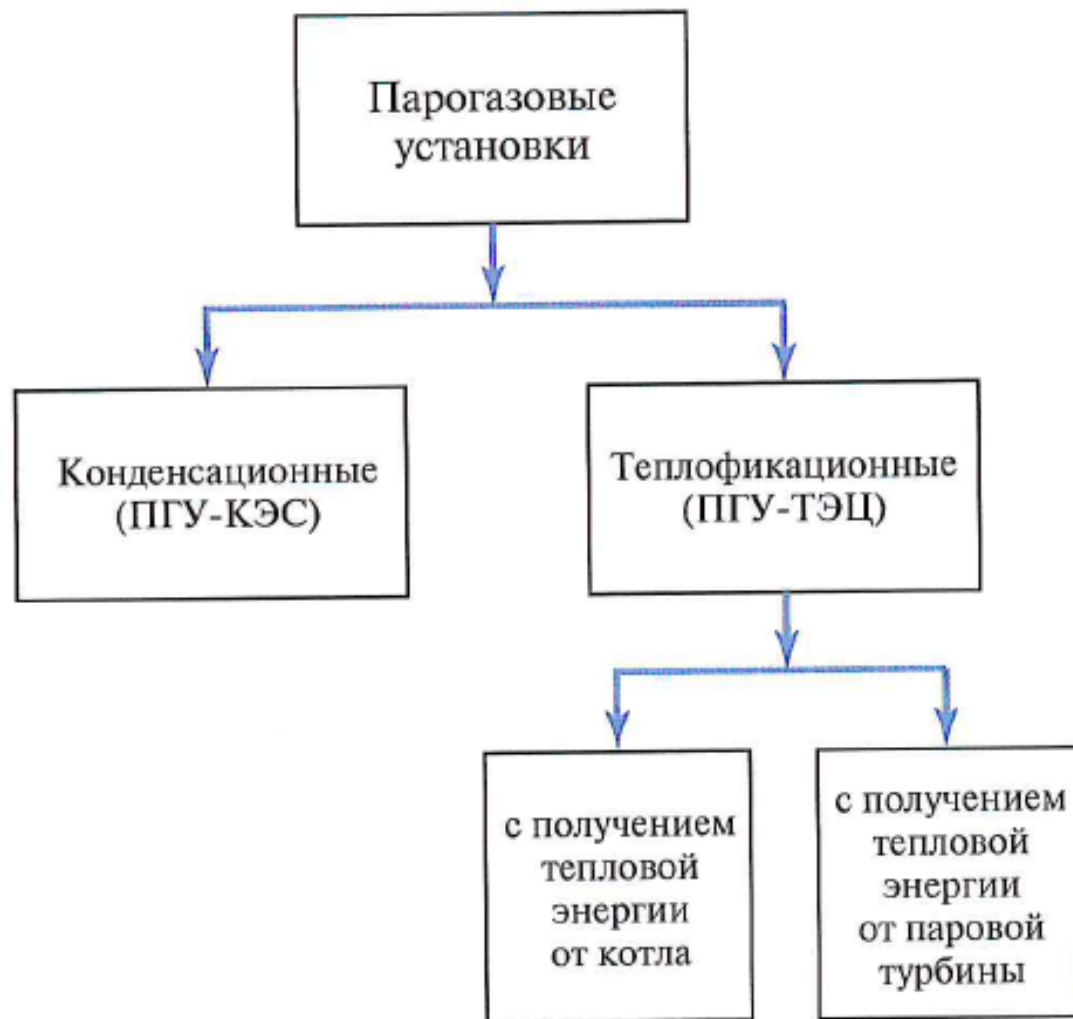
β - степень бинарности парогазового цикла (для утилизирующей ПГУ равна 1).

Экономичность ПГУ зависит от 4 параметров:

- степени бинарности;
- КПД ГТУ;
- КПД котла-утилизатора;
- КПД ПТУ.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПГУ

По назначению:



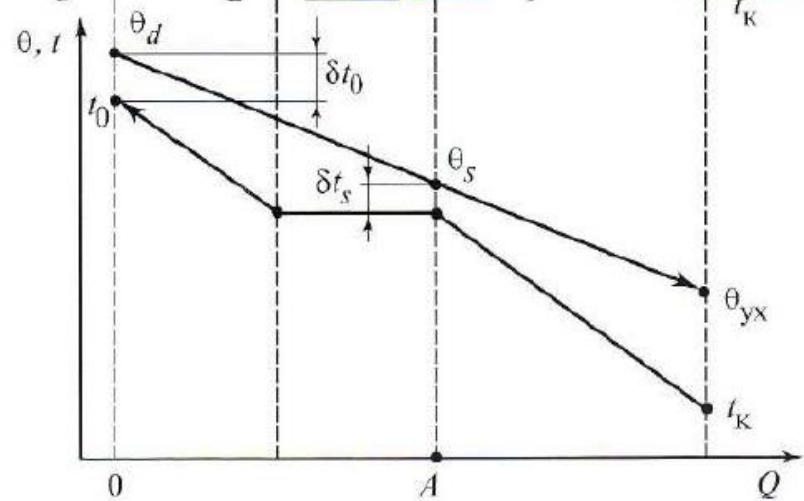
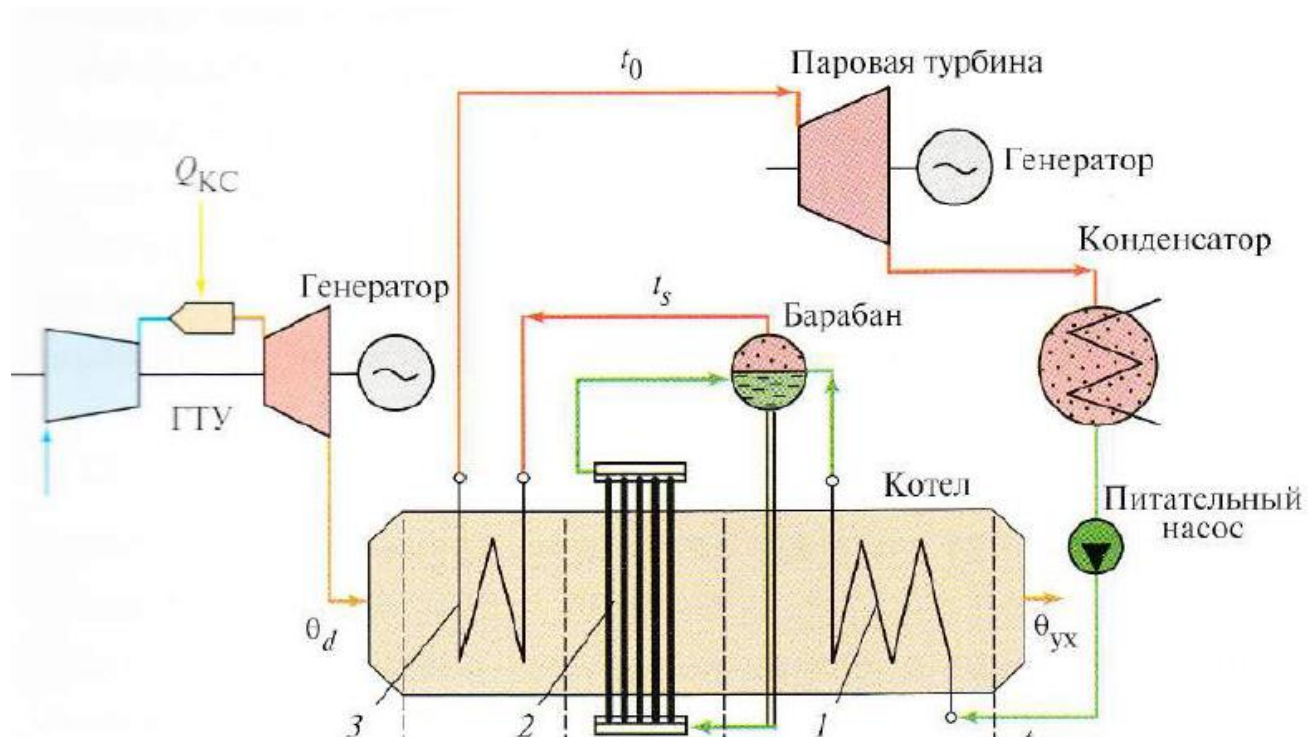
По способам утилизации тепловой энергии выхлопных газов ГТУ



УТИЛИЗАЦИОННЫЕ ПГУ

Выхлопные газы ГТУ поступают в теплообменник противоточного типа – котле-утилизатор, в котором за счет их тепловой энергии генерируется перегретый пар, направляемый в паровую турбину. Дополнительное топливо в котле-утилизаторе не сжигается.

Данный тип ПГУ является самым экономичным и самым распространенным.



a)

В одноконтурных ПГУ давление в барабане котла составляет 4 – 5 МПа. Этому давлению соответствует температура насыщения $t_s=250-265$ °С. При проектировании котла-утилизатора значение температурного напора выбирается в пределах 25-30 °С с тем, чтобы обеспечить максимально высокую температуру пара для достаточной экономичности ПГУ, а также – исключить большие затраты на трубную систему пароперегревателя.

Минимальная разность температур продуктов сгорания и рабочего тела ПТУ достигается в пинч-точке, где начинается кипение воды. Поэтому при расчете котла задаются температурным напором 5-8 °С.

КПД котла-утилизатора:

$$\eta_{\text{КУ}} = \frac{I_d - I_{\text{yx}}}{I_d - I_{\text{н.в}}} \approx \frac{\theta_d - \theta_{\text{yx}}}{\theta_d - t_{\text{н.в}}},$$

КПД утилизационной ПГУ:

$$\eta_{\text{э}}^{\text{ПГУ}} = \eta_{\text{э}}^{\text{ГТУ}} + \left(1 - \eta_{\text{э}}^{\text{ГТУ}}\right) \eta_{\text{КУ}} \eta_{\text{э}}^{\text{ПТУ}}$$

$1 - \eta_{\text{э}}^{\text{ГТУ}}$ – доля тепловой мощности $Q_{\text{КС}}$;

$(1 - \eta_{\text{э}}^{\text{ГТУ}}) \eta_{\text{КУ}}$ – доля тепловой мощности $Q_{\text{КС}}$, которая поступила в ПТУ;

Если левую и правую часть умножить на тепловую мощность подведенную в камере сгорания, то получим:

$$N_{\text{э}}^{\text{ПГУ}} = N_{\text{э}}^{\text{ГТУ}} + N_{\text{э}}^{\text{ПСУ}},$$

Откуда следует соотношение мощностей ГТУ и ПСУ:

$$\frac{N_{\text{э}}^{\text{ГТУ}}}{N_{\text{э}}^{\text{ПСУ}}} = \frac{\eta_{\text{э}}^{\text{ГТУ}}}{\left(1 - \eta_{\text{э}}^{\text{ГТУ}}\right) \eta_{\text{э}}^{\text{ПСУ}}}.$$

Основные показатели утилизационной ПГУ: мощность и экономичность определяются показателями ГТУ. Поэтому долгое время реализация утилизационной ПГУ была нецелесообразной.

Эффективность утилизационной ПГУ напрямую зависит от ГТУ: от температуры уходящих из ГТ газов.

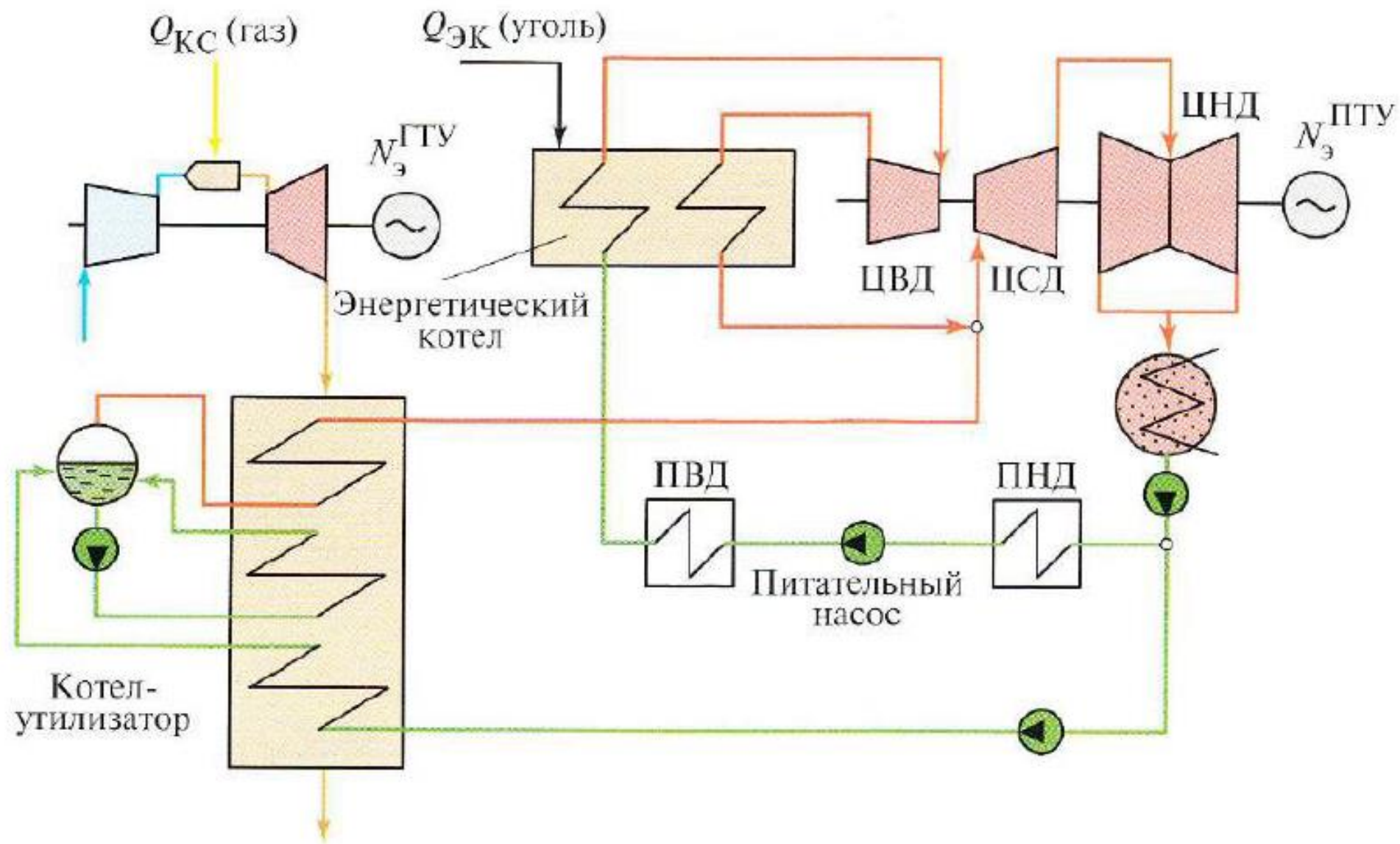
Температура газов за ГТУ должна быть достаточно высокой, обеспечивающей высокие параметры генерируемого пара для ПТУ.

ПГУ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СХЕМОЙ

В данных ПГУ параллельно традиционной современной ПСУ устанавливаются ГТУ и котел-утилизатор, параметры которого подбираются так, чтобы максимально использовать тепловую энергию выхлопных газов ГТУ, в меньшей степени заботясь о параметрах этого пара. Генерируемый пар вводится в проточную часть турбины.

Единая парогазовая установка представляет собой комбинацию высокоэкономичной утилизационной ПГУ и менее экономичной традиционной ПСУ.

Такая схема позволяет сжигать в энергетическом котле твердое топливо, а для ГТУ необходимо использовать природный газ.



ГТУ совместно с КУ и ПТ, которая включает в себя ЦСД и ЦНД, образует утилизационную ПГУ. Энергетический котел с ЦВД, ЦСД и ЦНД, регенерацией ПВ – традиционный паросиловой блок с ПП.

КПД ПГУ с параллельной схемой:

$$\eta_{\text{э}}^{\text{ПГУ}} = \beta \eta_{\text{э}}^{\text{УТ}} + (1 - \beta) \eta_{\text{э}}^{\text{ПСУ}},$$

где

$$\beta = \frac{Q_{\text{КС}}}{Q_{\text{КС}} + Q_{\text{ЭК}}} = \frac{Q_{\text{КС}}}{Q_{\Sigma}}.$$

Повышение экономичности при использовании параллельной схемы будет происходить когда $\eta_{\text{э}}^{\text{УТ}} > \eta_{\text{э}}^{\text{ПСУ}}$.

ПГУ с параллельной схемой целесообразно использовать для надстройки работающих угольных классических ПСУ.

ПГУ С ДОЖИГАНИЕМ

По конструктивному исполнению ПГУ с дожиганием похожа на утилизационную ПГУ.

В данных установках дополнительное небольшое количество газа сжигается в котле-утилизаторе. Чаще всего оно используется для получения дополнительной тепловой энергии для отопления помещений в холодное время года.

Подвод дополнительной тепловой энергии в КУ ведет к росту параметров и расхода рабочего тела ПГУ. Поэтому он всегда приводит к повышению мощности ПСУ и всей ПГУ.

Степень бинарности ПГУ с дожиганием:

$$\beta = Q_{\text{КС}} / (Q_{\text{КС}} + Q_{\text{дож}})$$

Дожигание в КУ всегда приводит к уменьшению степени бинарности и экономичности цикла.

В ряде случаев дожигание оказывается технически необходимым.

Например:

- В парогазовой установке используется газовая турбина с низкой температурой выхлопных газов.
- Сезонное изменение климатических условий: при снижении температуры конденсации в конденсаторе.
- Небольшая степень дожигания может привести к повышению экономичности при снижении степени бинарности. Вызвано это тем, что дожигание повышает степень сухости пара в проточной части турбины, потери с влажностью снижаются.
- Дожигание вводят для получения дополнительного количества пара для производственных процессов либо для нагрева сетевой воды.

ПГУ С ГАЗОПАРОВОЙ ТУРБИНОЙ

В таких ПГУ пар, генерируемый котлом-утилизатором, направляется в камеру сгорания, где он смешивается с продуктами сгорания основного топлива. В результате образуется однородная смесь газов, которая направляется в турбину и расширяется в ней. В такой смеси преобладают продукты сгорания, поэтому турбину называют газопаровой.

Главным преимуществом ПГУ с газопаровой турбиной является отсутствие паровой турбины, конденсатора, а также всего вспомогательного оборудования паросилового цикла.

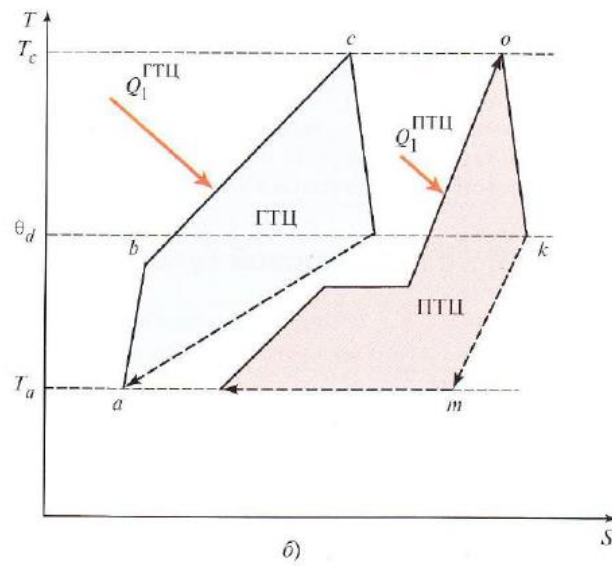
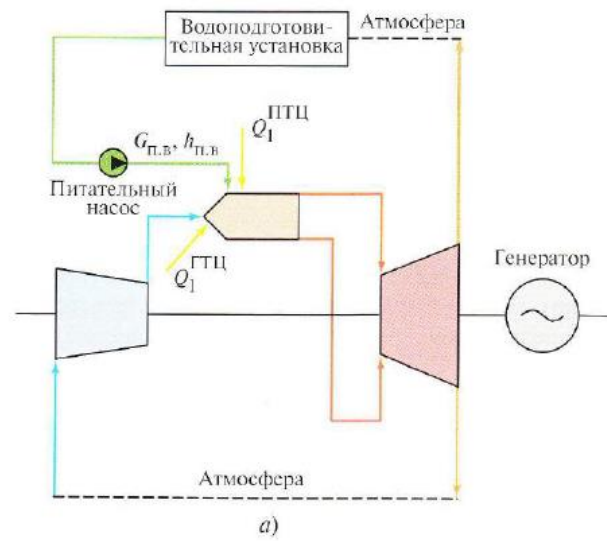


Рис. 2.11. Схема и теплосиловой цикл ГТУ с вводом воды в камеру сгорания:
 а — схема установки; б — теплосиловые циклы для продуктов сгорания и воды, вводимой в КС

Для функционирования данной установки необходимо иметь постоянно работающую водоподготовительную установку.

Достоинства:

- Ввод воды в КС приводит к увеличению расхода рабочего тела через ГПТ и увеличению мощности турбины.

Недостатки:

- Экологические ограничения по влажности выхлопных газов ГПТ;
- Необходимость иметь достаточно мощный источник природной воды и дорогостоящую в эксплуатации водоподготовительную установку.
- Ввод воды в КС всегда приводит к снижению экономичности установки.

Особенности применения:

В ряде ГТУ в зону горения вводится небольшое количество воды (1-1,5% расхода воздуха) для подавления оксидов азота путем снижения температуры в зоне горения.

Эффективность такой установки можно повысить, если выхлопные газы направить в котел-утилизатор, а полученный в нем пар подавать в камеру сгорания.

Таким образом теплосиловой цикл состоит из двух простых: газотурбинного и паротурбинного.

Совокупность ГТЦ и ПТЦ образует *бинарный цикл*.

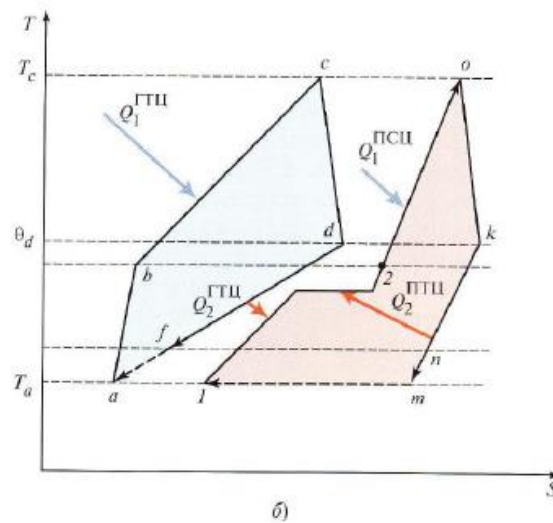
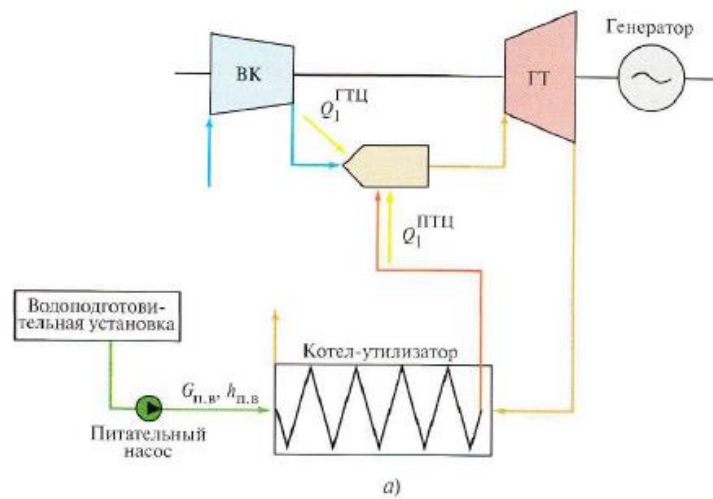


Рис. 2.12. Схема и теплосиловой цикл ПГУ с вводом пара в камеру сгорания:
 а — схема ПТУ; б — теплосиловые циклы для продуктов сгорания и пара, вводимого в КС; ВК — воздушный компрессор

КПД для данной ПГУ:

$$\eta_{\text{ПГУ}} = (N_{\text{ГТЦ}} + N_{\text{ПТЦ}})/Q_{\Sigma},$$

где мощность ГТЦ:

$$N_{\text{ГТЦ}} = Q_1^{\text{ГТЦ}} \eta_{\text{ГТЦ}},$$

мощность ПТЦ:

$$N_{\text{ПТЦ}} = Q_{\Sigma}^{\text{ПТЦ}} \eta_{\text{ПТЦ}},$$

Суммарная тепловая мощность, подведенная в паротурбинный цикл:

$$Q_{\Sigma}^{\text{ПТЦ}} = Q_1^{\text{ПТЦ}} + Q_2^{\text{ГТЦ}} + Q_2^{\text{ПТЦ}}.$$

Отношение утилизированной теплоты к ПГУ к суммарной тепловой мощности называется коэффициентом утилизации тепла паротурбинной установки:

$$k_{\text{yT}} = \left(Q_2^{\text{ГТЦ}} + Q_2^{\text{ПТЦ}} \right) / Q_{\Sigma}^{\text{ПТЦ}} = (h_2 - h_1) / (h_0 - h_1)$$

КПД газопаровой ПГУ:

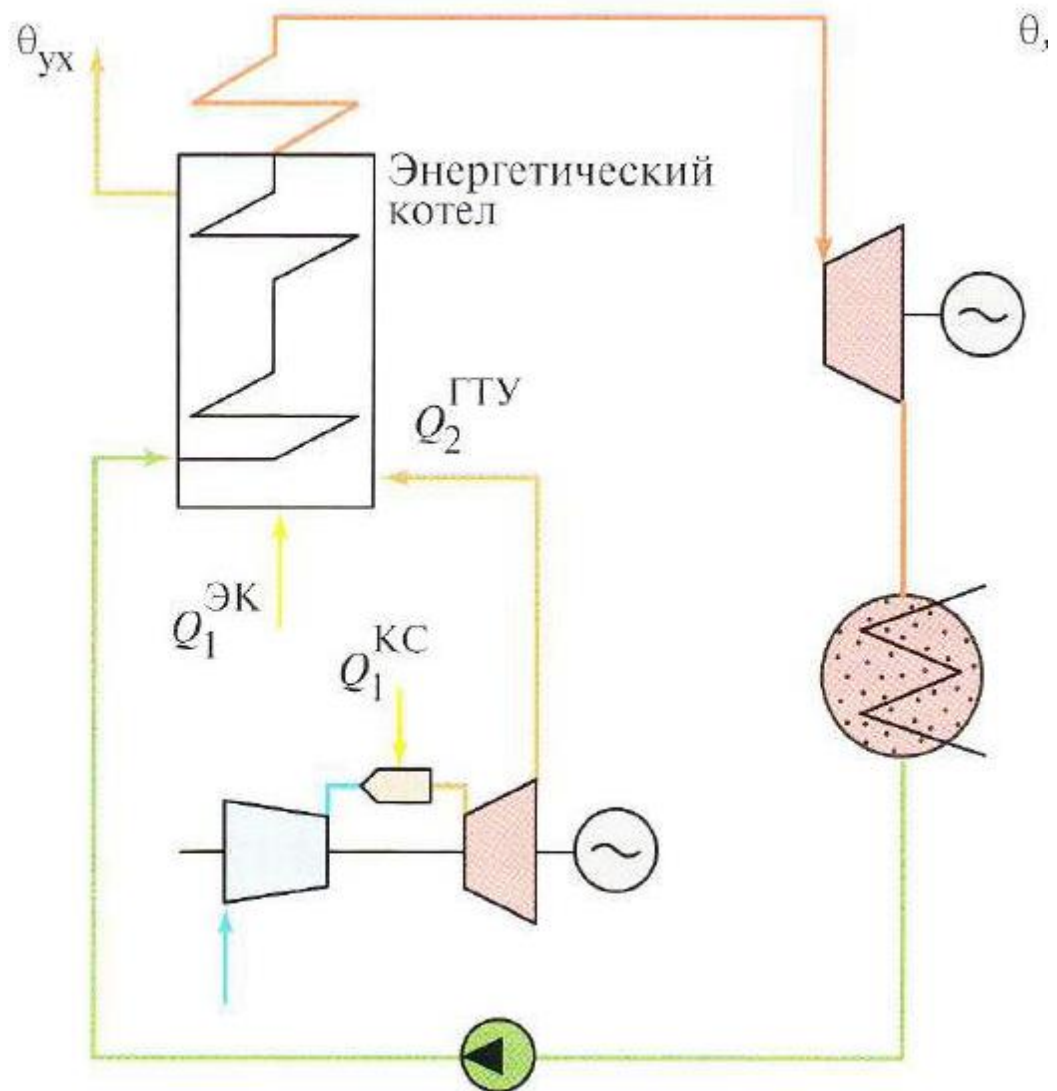
$$\eta_{\text{ПГУ}} = \beta \eta_{\text{ГТЦ}} + \frac{1 - \beta}{1 - k_{\text{yT}}} \eta_{\text{ПТЦ}}.$$

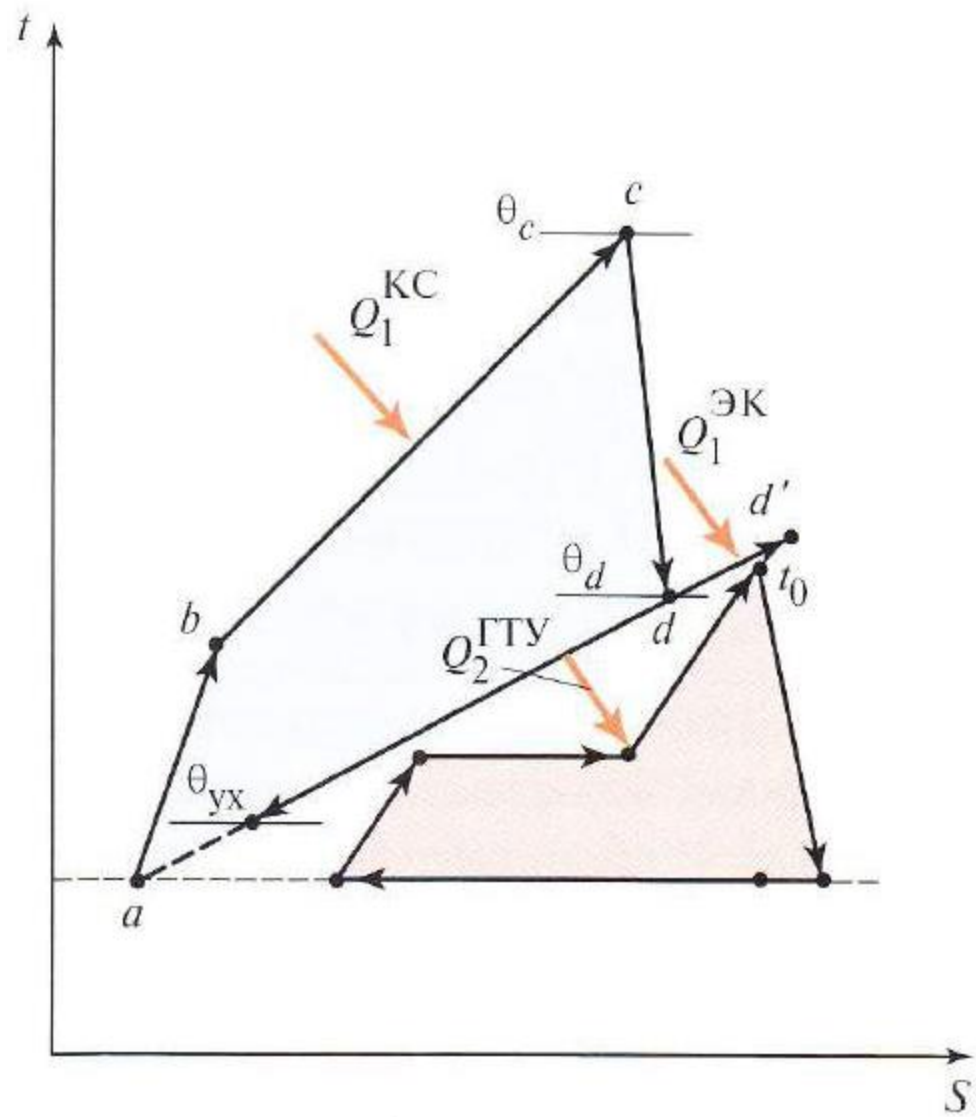
СБРОСНЫЕ ПГУ

В сбросных ПГУ горячие выхлопные газы ГТУ, которые имеют достаточное количество кислорода, направляются в энергетический котел традиционной паросиловой установки. Тепловая энергия этих газов служит либо для выработки дополнительного количества пара для паровой турбины, либо для экономии топлива.

Главным достоинством такой ПГУ является возможность работы на разных видах топлива (твердом – в энергетическом котле, газообразном – в ГТУ).

Также такие ПГУ называют ПГУ с низконапорным парогенератором, указывая на то, что в них используется традиционный котел с давлением, примерно равным атмосферному.





Базовым элементом *сбросной ПГУ* является традиционная паросиловая установка, включающая в себя **энергетический котел**.

Данная установка надстраивается ГТУ, выхлопные газы которой содержат большое количество кислорода, подаются в данный котел.

Отпадает необходимость в установке дутьевых вентиляторов, воздухоподогревателях, калориферах.

Степень бинарности сбросной ПГУ:

$$\beta = Q_1^{\text{КС}} / (Q_1^{\text{КС}} + Q_1^{\text{ЭК}}),$$

Абсолютный электрический КПД:

$$\eta_{\text{э}} = \beta \eta_{\text{э}}^{\text{ГТУ}} + (1 - \beta \eta_{\text{э}}^{\text{ГТУ}}) \eta_{\text{ЭК}} \eta_{\text{э}}^{\text{ПГУ}}.$$

$$\beta \approx 1/\alpha_{\text{ГТУ}},$$

Если $\alpha_{\text{ГТУ}}$ находится в пределах 2,5-3, то степень бинарности равна 0,33.

Сбросные ПГУ являются самыми сложными и по составу оборудования и по эксплуатации, однако самыми надежными.

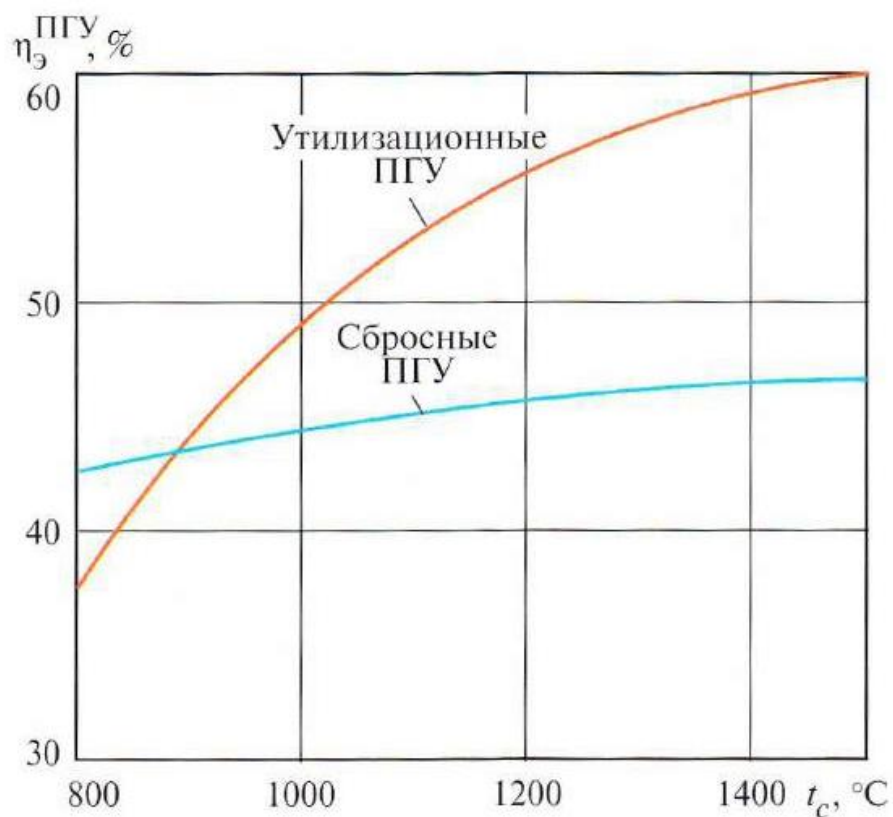


Рис. 2.15. Сравнение экономичности утилизационных и сбросных ПГУ при различных температурах газов перед газовой турбиной

ПГУ С ВЫСОКОДАВЛЕНИЕМ ПАРОГЕНЕРАТОРОМ

Характерным элементом данной установки является котел специальной конструкции, в котором вводимое топливо сжигается под давлением. Стенки котла облицованы испарительными экранными трубами, где генерируется пар. Таким образом, котел является и **камерой сгорания**, и **энергетическим котлом**. Воздух в камеру сгорания подается компрессором. Продукты сгорания поступают в газовую турбину ГТУ. Выхлопные газы ГТУ направляются в газовый подогреватель конденсата.

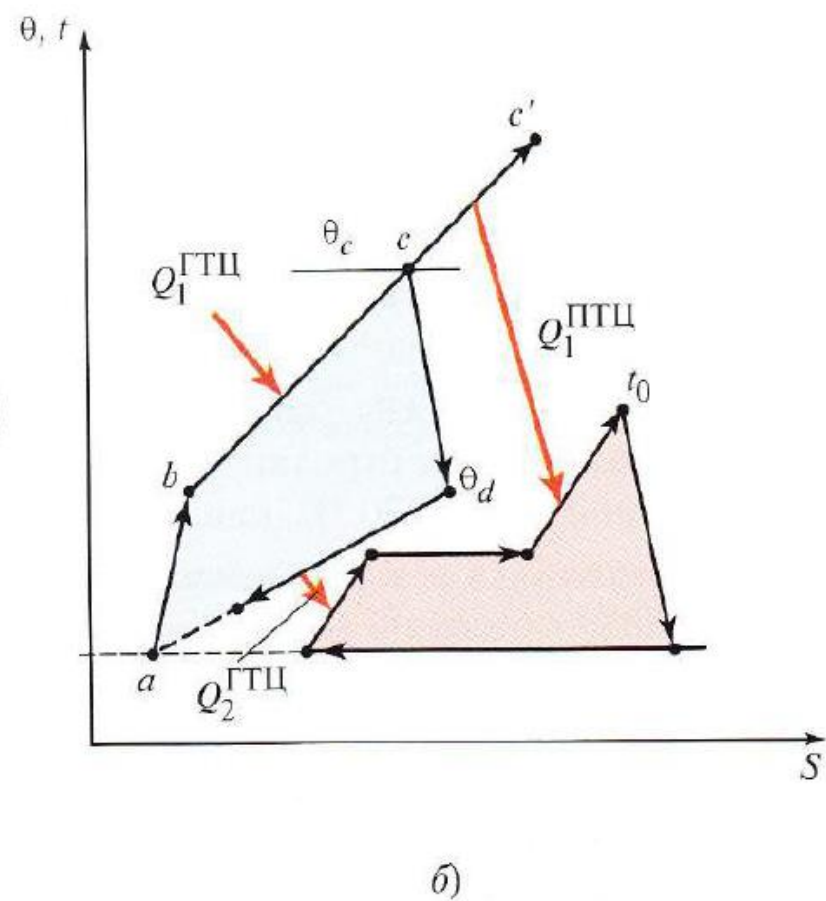
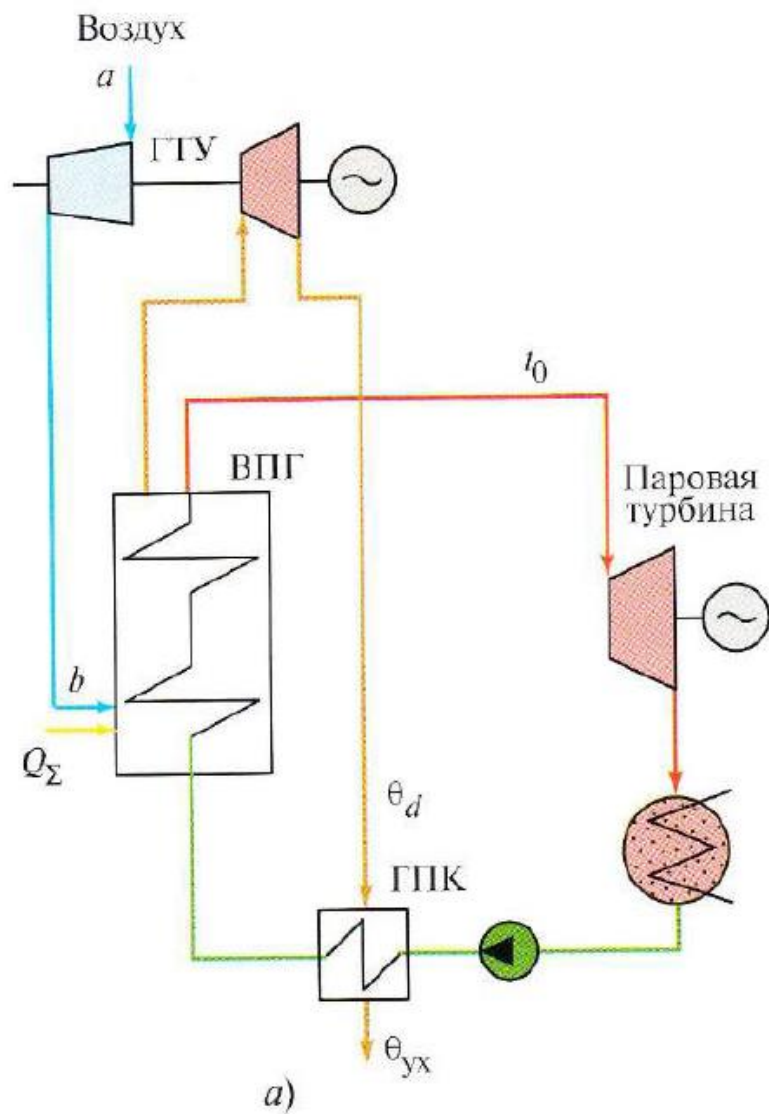


Рис. 2.19. Схема ПГУ с высоконапорным парогенератором и ее тепловой цикл

Продукты сгорания передают часть своей тепловой мощности $Q_1^{\text{ПТЦ}}$ рабочему телу – питательной воде, поступающей в ВПГ.

ВПГ имеет все атрибуты обычного котла – топку, экраны, основной и промежуточный пароперегреватели и пр. Однако весь процесс горения происходит при высоком давлении.

Оставшаяся часть тепловой мощности топлива

$$Q_1^{\text{ГТЦ}} = Q_{\Sigma} - Q_1^{\text{ПТЦ}}$$

в виде продуктов сгорания направляется в ГТ, где расширяется.

Обязательным элементом ПГУ с ВНГ является ГПК.

Особенности:

ПГУ с ВНГ принципиально не отличается от цикла сбросной ПГУ. Разница состоит в большем начальном температурном уровне тепловой мощности, поступающей в паротурбинный цикл, что не изменяет соотношения основных термодинамических показателей:

- степени бинарности

$$\beta = Q_1^{\text{ГТЦ}} / Q_{\Sigma}$$

- КПД

- соотношения мощностей циклов

ПГУ с нагревом питательной воды выхлопными газами ГТУ

(ПГУ с вытеснением пара отборов = ПГУ с вытеснением регенерации)

Нагрев конденсата и питательной воды перед ее подачей в котел осуществляется не теплотой конденсации пара, а тепловой энергией выхлопных газов ГТУ, поступающих в газовые подогреватели. При этом пар отборов расширяется в паровой турбине и вырабатывает дополнительную мощность.

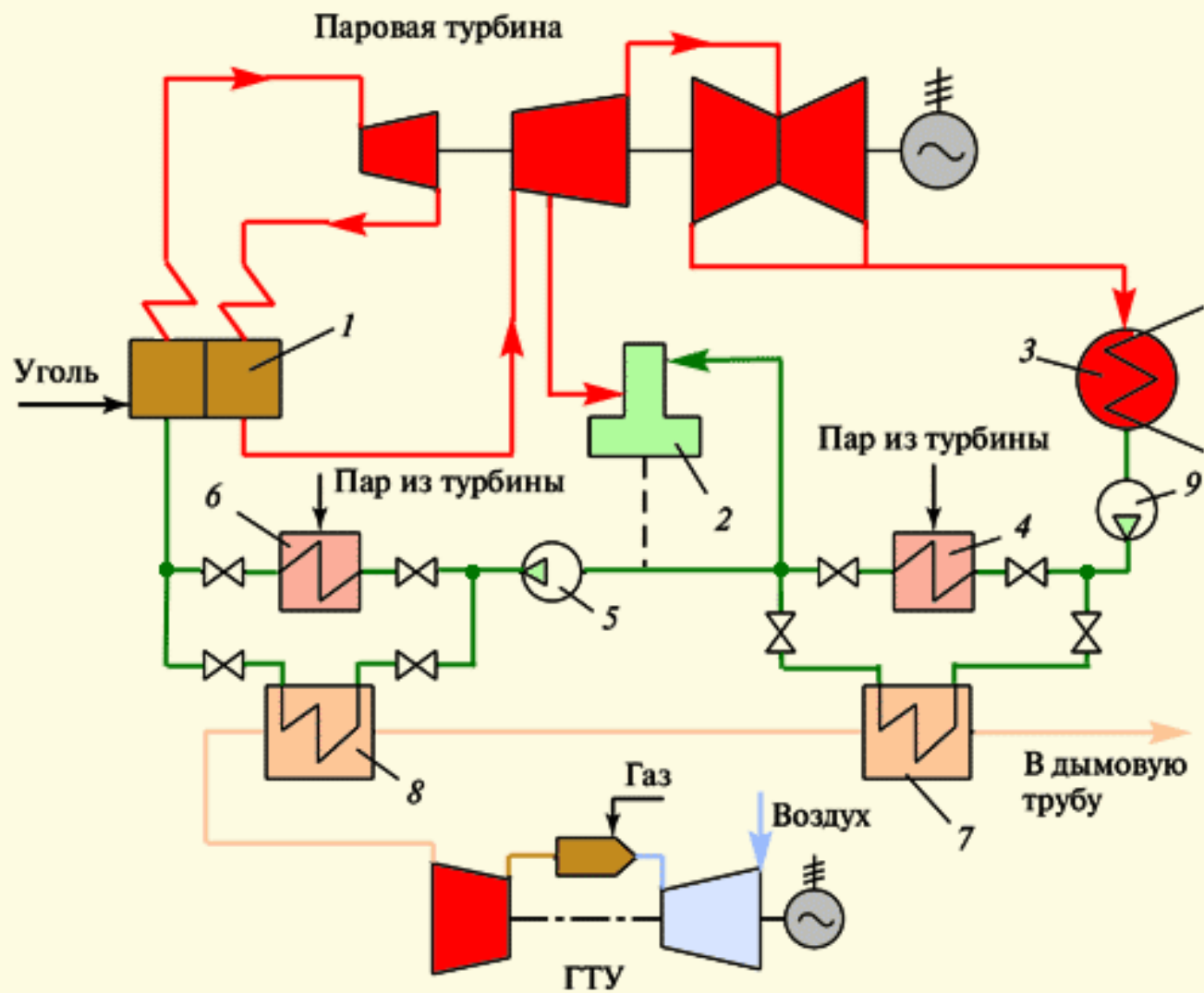


Рис. 8.6. Принципиальная схема ПГУ с вытеснением регенерации

Экономия топлива в ПГУ с вытеснением регенерации по сравнению с ПСУ существенно меньше, чем в утилизационной и сбросной ПГУ, прежде всего из за малой степени бинарности парогазового цикла.

По существу, весь выигрыш в экономичности ПГУ с вытеснением регенерации возникает за счет того, что тепловая энергия выхлопных газов ГТУ, затрачиваемая на нагрев конденсата и питательной воды в ГППВ и ГПК замещает тепловую энергию регенеративных отборов.

Расход пара вытесненных отборов в сумме составляет около 20-25 % от расхода свежего пара, получаемая электрическая мощность на 30-35% выше, то степень бинарности такой схемы составляет 8-10%.

Для снабжения ГППВ и ГПК требуется относительно небольшая мощность выхлопных газов ГТУ, поэтому повышение экономичности ПГУ составляет **3-5%**.

Преимущества ПГУ с вытеснением регенерации:

- Возможность надстройки работающей ПСУ, использующей любой вид топлива.
- Малый срок ввода в эксплуатацию.
- Малые капитальные вложения.
- Легкая компоновка.
- Повышение мощности ПСУ, за счет снятия нагрузки на РП.
- Повышение маневренности ТЭС.
- Возможность повышения выработки теплоты в ПСУ теплофикационной турбиной.

КЛАССИФИКАЦИЯ УТИЛИЗАЦИОННЫХ ПГУ

По назначению:

- *Конденсационные утилизационные ПГУ.*

Наиболее простые ПГУ. Вырабатывают только электроэнергию.

- *Теплофикационные утилизационные ПГУ.*

Имеют теплофикационную установку с возможностью пикового подогрева сетевой воды низкопотенциальным паром из котла-утилизатора.

По числу контуров генерации пара в котле-утилизаторе:

- *Одноконтурные ПГУ* – наименее экономичные, т.к. не могут обеспечить полноценную утилизацию тепловой энергии выхлопных газов ГТУ. Температура уходящих газов за КУ составляет 160-200 °С, КПД КУ – 65-70%, экономичность ПГУ – 45-46%.
- *Двухконтурные ПГУ* – наиболее распространенный тип ПГУ. На выходе газов из КУ размещают ГПК, в который поступает весь конденсат НД. Барабан НД играет роль бака запаса питательной воды для контура ВД. Установка контура НД за ВД позволяет снизить температуру уходящих газов за КУ до 95-105 °С. Что при оптимизации параметров ПГУ позволяет получить экономичность 50-52 %.

- *Трехконтурные ПГУ* – обеспечивают максимальную утилизацию теплоты уходящих газов ГТУ и используются совместно с промежуточным перегревом пара в КУ.