

Тепловые электрические станции.  
Технологическая и тепловая схема ТЭС.  
Энергетический баланс ТЭС и их  
энергетические показатели

Автор – доцент каф. ТиГ ВятГУ  
Суворов Дмитрий Михайлович  
*E-mail: dmilar@mail.ru*

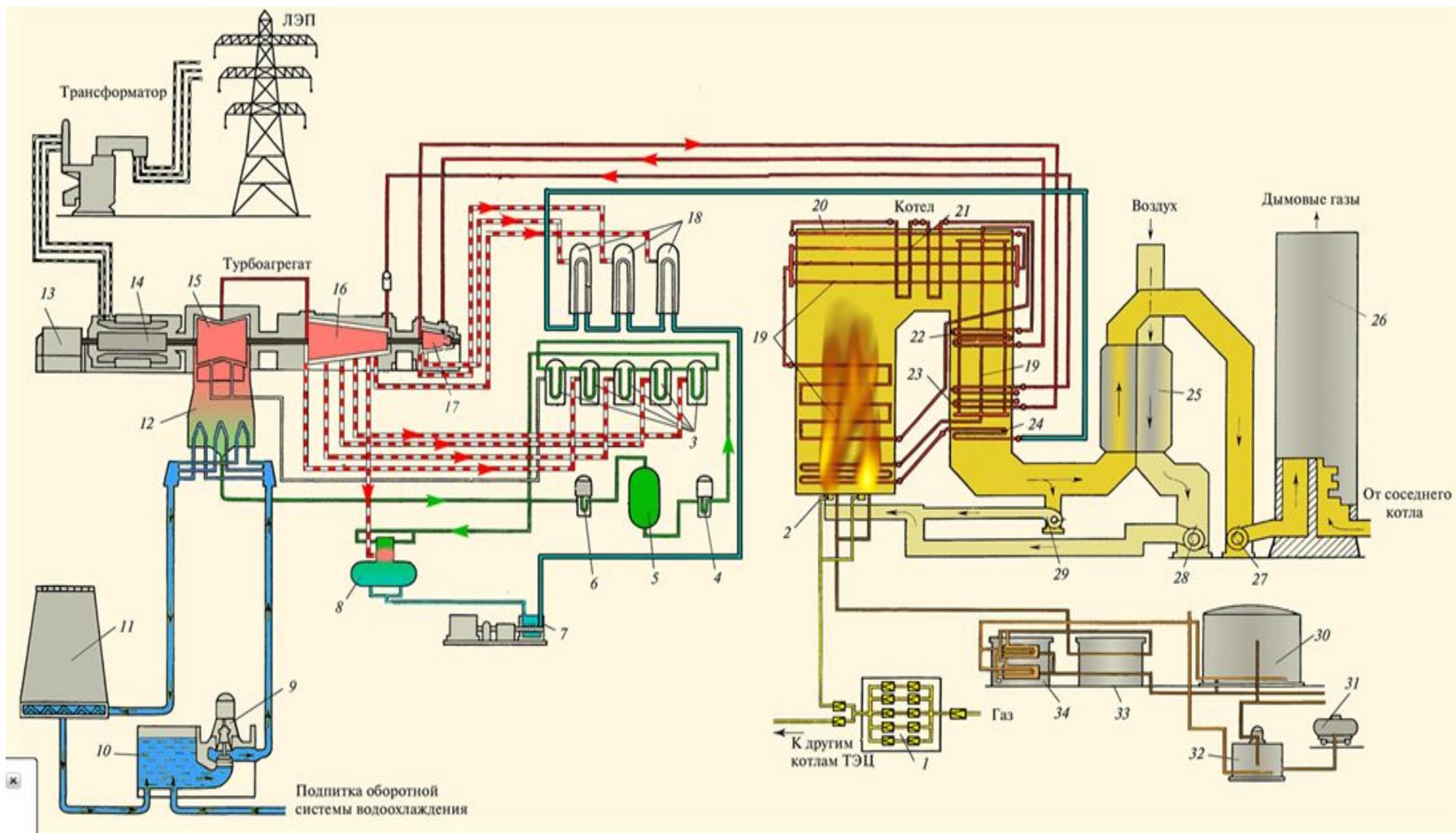
# Типы ТЭС

- **Тепловые электрические станции** – это промышленные предприятия, которые вырабатывают и реализуют потребителям 2 основных вида продукции – электрическую энергию и тепловую энергию, – и для которых источником тепловой энергии служит органическое топливо .
  - **ТЭС классифицируют по следующим признакам:**
    - **Основной вид отпускаемой продукции:**
      - Конденсационные (КЭС), которые не имеют регулируемого тепловыми двигателями (турбинами) отпуска тепловой энергии потребителям
      - Теплофикационные или когенерационные (ТЭЦ), которые имеют регулируемый тепловыми двигателями отпуск тепловой энергии потребителям и у которых доля отпускаемой тепловой энергии в общем объеме отпуска энергии потребителям не менее половины
    - **Технология производства электрической и тепловой энергии:**
      - Паротурбинная (ПТУ-ТЭС)
      - Газотурбинная (ГТУ-ТЭС)
      - Парогазовая (ПГУ-ТЭС)
      - Газопоршневая (ТЭС-ДВС или ТЭС-ГПА)
    - **Ведомственная принадлежность предприятия**
      - ТЭС энергетических компаний
      - ТЭС промышленных предприятий или фирм
    - **Основной вид топлива для ТЭС (уголь, газ, мазут, сланцы, топливные вторичные энергетические ресурсы)**

# Технологический процесс преобразования теплоты в электроэнергию на паротурбинной ТЭС

- Любая конденсационная паротурбинная электростанция включает в себя четыре обязательных элемента:
- **энергетический котел**, или просто котел, в который подводится питательная вода под большим давлением, топливо и атмосферный воздух для горения. В топке котла идет процесс горения — химическая энергия топлива превращается в тепловую и лучистую энергию. *Питательная вода* протекает по трубной системе, расположенной внутри котла. Далее нагревается до температуры кипения и испаряется. Получаемый пар в этом же котле перегревается сверх температуры кипения и по одному или нескольким трубопроводам подается в паровую турбину;
- **турбоагрегат**, состоящий из **паровой турбины, электрогенератора и возбuditеля**. Паровая турбина, в которой пар расширяется до очень низкого давления, преобразует потенциальную энергию сжатого и нагретого до высокой температуры пара в кинетическую энергию вращения ротора турбины. Турбина приводит электрогенератор, преобразующий кинетическую энергию вращения ротора генератора в электрический ток.
- **конденсатор** служит для конденсации пара, поступающего из турбины, и создания глубокого разрежения. Это позволяет очень существенно сократить затрату энергии на последующее сжатие образовавшейся воды и одновременно увеличить работоспособность пара, т.е. получить большую мощность от пара, выработанного котлом;
- **питательный насос** для подачи питательной воды в котел и создания высокого давления перед турбиной.
- Таким образом, **в ПТУ рабочим телом совершается непрерывный цикл преобразования химической энергии сжигаемого топлива в электрическую энергию.**

# Принципиальная технологическая схема паротурбинной ТЭС, работающей на газе (схема отпуски теплоты внешним потребителям не изображена)



# Технологический процесс преобразования теплоты в электроэнергию на паротурбинной ТЭС

- Основным элементом котельной установки является **котел**. Газ для работы котла подается от газораспределительной станции, подключенной к магистральному газопроводу (на рисунке не показан), к **газораспределительному пункту (ГРП) 1**. Здесь его давление снижается до нескольких атмосфер и он подается к **горелкам 2**.
- Собственно котел представляет собой П-образную конструкцию с газоходами прямоугольного сечения. Внутренняя часть топки свободна, и в ней происходит горение топлива газа. Для этого к горелкам специальным **дутьевым вентилятором 28** непрерывно подается горячий воздух, нагреваемый в **воздухоподогревателе 25**. Для повышения температуры воздуха используется рециркуляция: часть дымовых газов, уходящих из котла, специальным **вентилятором рециркуляции 29** подается к основному воздуху и смешивается с ним. Горячий воздух смешивается с газом и через горелки котла подается в его топку — камеру, в которой происходит горение топлива. Стены топки облицованы **экранами 19** — трубами, к которым подается питательная вода из **экономайзера 24**. На схеме изображен так называемый **прямоточный котел**, в экранах которого питательная вода, проходя трубную систему котла только 1 раз, нагревается и испаряется, превращаясь в сухой насыщенный пар. Широкое распространение получили барабанные котлы, в экранах которых осуществляется многократная циркуляция питательной воды, а отделение пара от котловой воды происходит в барабане.
- Пространство за топкой котла достаточно густо заполнено трубами, внутри которых движется пар или вода. Снаружи эти трубы омываются горячими дымовыми газами, постепенно остывающими при движении к **дымовой трубе 26**.
- Сухой насыщенный пар поступает в основной пароперегреватель, состоящий из **потолочного 20, ширмового 21 и конвективного 22** элементов. В основном пароперегревателе повышается его температура и, следовательно, потенциальная энергия. Мощная паровая турбина обычно состоит из нескольких как бы отдельных турбин — цилиндров.
- К первому цилиндру — **цилиндру высокого давления (ЦВД) 17** пар подводится прямо из котла, и поэтому он имеет высокие параметры. Если бы пар продолжал расширяться в турбине дальше от этих параметров до давления в конденсаторе, то он стал бы настолько влажным, что длительная работа турбины была бы невозможной из-за эрозионного износа его деталей в последнем цилиндре. Поэтому из ЦВД относительно холодный пар возвращается обратно в котел в так называемый **промежуточный пароперегреватель 23**. В нем пар попадает снова под воздействие горячих газов котла, его температура повышается до исходной (540 °С). Полученный пар направляется в **цилиндр среднего давления (ЦСД) 16**. После расширения в ЦСД до давления 0,2—0,3 МПа (2—3 ат) пар поступает в один или несколько одинаковых **цилиндров низкого давления (ЦНД) 15**.
- Таким образом, расширяясь в турбине, пар вращает ее ротор, соединенный с ротором **электрического генератора 14**, в статорных обмотках которого образуется электрический ток. Трансформатор повышает его напряжение для уменьшения потерь в линиях электропередачи, передает часть выработанной энергии на питание собственных нужд ТЭС, а остальную электроэнергию отпускает в энергосистему.
- Пар, покидающий ЦНД турбины, поступает в **конденсатор 12** — теплообменник, по трубкам которого непрерывно протекает охлаждающая вода, подаваемая **циркуляционным насосом 9** из реки, водохранилища или специального охладительного устройства (градирни).

# Технологический процесс преобразования теплоты в электроэнергию на паротурбинной ТЭС

- Внутри градирни на высоте 10—20 м устанавливают оросительное (разбрызгивающее устройство). Воздух, движущийся вверх, заставляет часть капель (примерно 1,5—2 %) испаряться, за счет чего охлаждается вода, поступающая из конденсатора и нагретая в нем. Охлажденная вода собирается внизу в бассейне, перетекает в аванкамеру 10 (см. рис. 2.2), и оттуда циркуляционным насосом 9 она подается в конденсатор 12. Наряду с оборотной, используют *прямоточное водоснабжение*, при котором охлаждающая вода поступает в конденсатор из реки и сбрасывается в нее ниже по течению. Пар, поступающий из турбины в межтрубное пространство конденсатора, конденсируется и стекает вниз; образующийся конденсат **конденсатным насосом 6** подается через группу **регенеративных подогревателей низкого давления (ПНД) 3** в **деаэратор 8**. В ПНД температура конденсата повышается за счет теплоты конденсации пара, отбираемого из турбины. Это позволяет уменьшить расход топлива в котле и повысить экономичность электростанции. В деаэраторе 8 происходит *деаэрация* — удаление из конденсата растворенных в нем газов, нарушающих работу котла. Одновременно бак деаэратора представляет собой емкость для питательной воды котла.

- Из деаэратора питательная вода **питательным насосом 7**, приводимым в действие электродвигателем или специальной паровой турбиной, подается в группу **подогревателей высокого давления (ПВД)**.

- **Регенеративный подогрев конденсата в ПНД и ПВД — это основной и очень выгодный способ повышения КПД ТЭС.** Пар, который расширился в турбине от входа до трубопровода отбора, выработал определенную мощность, а поступив в регенеративный подогреватель, передал свое тепло конденсации питательной воде (а не охлаждающей!), повысив ее температуру и тем самым сэкономив расход топлива в котле. Температура питательной воды котла за ПВД, т.е. перед поступлением в котел, составляет в зависимости от начальных параметров 240—280 °С. Таким образом замыкается технологический пароводяной цикл преобразования химической энергии топлива в механическую энергию вращения ротора турбоагрегата.

- Газообразные продукты сгорания топлива, отдав свою основную теплоту питательной воде, поступают на трубы **экономайзера 24** и в **воздухоподогреватель 25**, в которых они охлаждаются до температуры 140—160 °С и направляются с помощью **дымососа 27** к **дымовой трубе 26**. Дымовая труба создает разрежение в топке и газоходах котла; кроме того, она рассеивает вредные продукты сгорания в верхних слоях атмосферы, не допуская их высокой концентрации в нижних слоях.

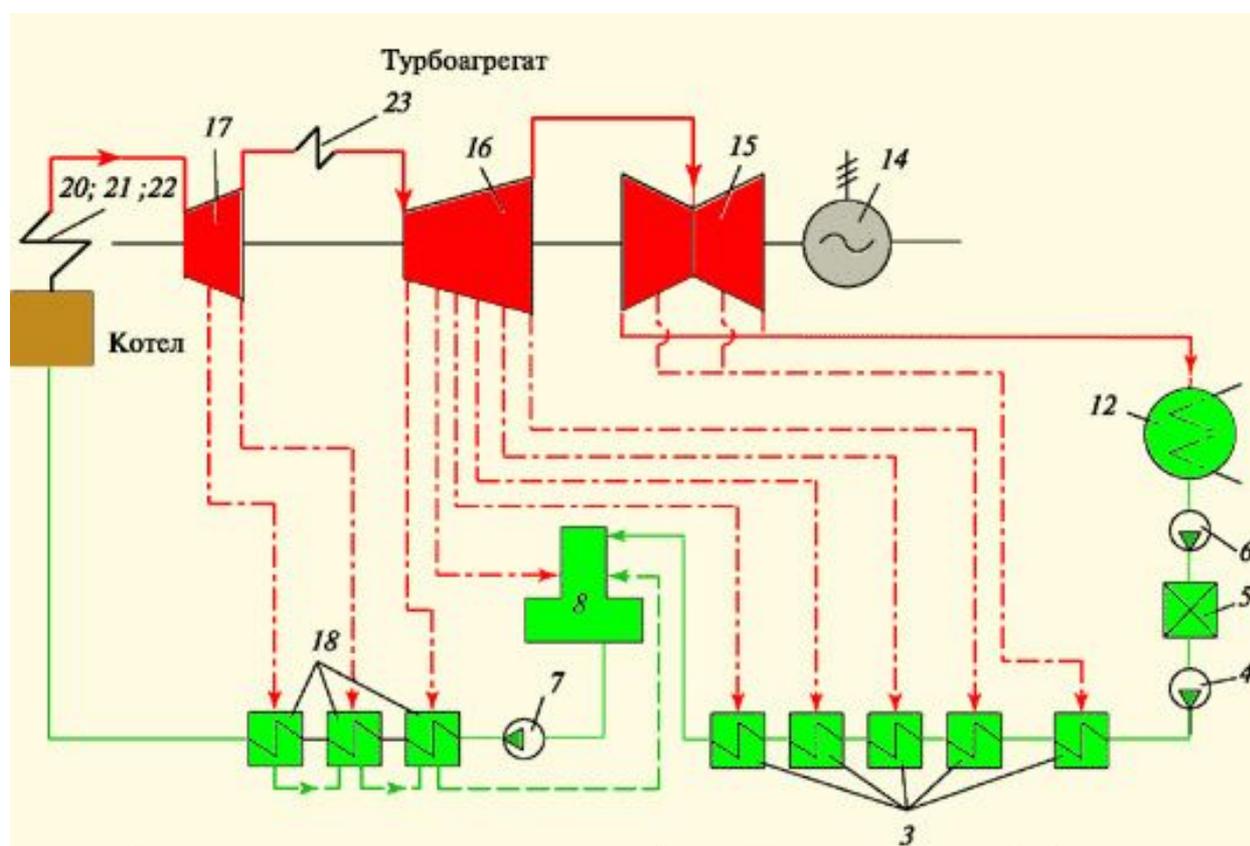
- Если на ТЭС используется твердое топливо, то она снабжается топливоподачей и пылеприготовительной установкой. Прибывающий на ТЭС в специальных вагонах уголь разгружается, дробится до размера кусков 20—25 мм и ленточным транспортером подается в бункер, вмещающий запас угля на несколько часов работы. Из бункера уголь поступает в специальные мельницы, в которых он размалывается до пылевидного состояния. В мельницу непрерывно специальным дутьевым вентилятором подается воздух, нагретый в воздухоподогревателе. Горячий воздух смешивается с угольной пылью и через горелки котла подается в его топку в зону горения.

- Пылеугольная ТЭС снабжается специальными электрофильтрами, в которых происходит улавливание сухой летучей зоны. Зола, образующаяся при горении топлива и не унесенная потоком газов, удаляется из донной части топки и транспортируется на золоотвалы.

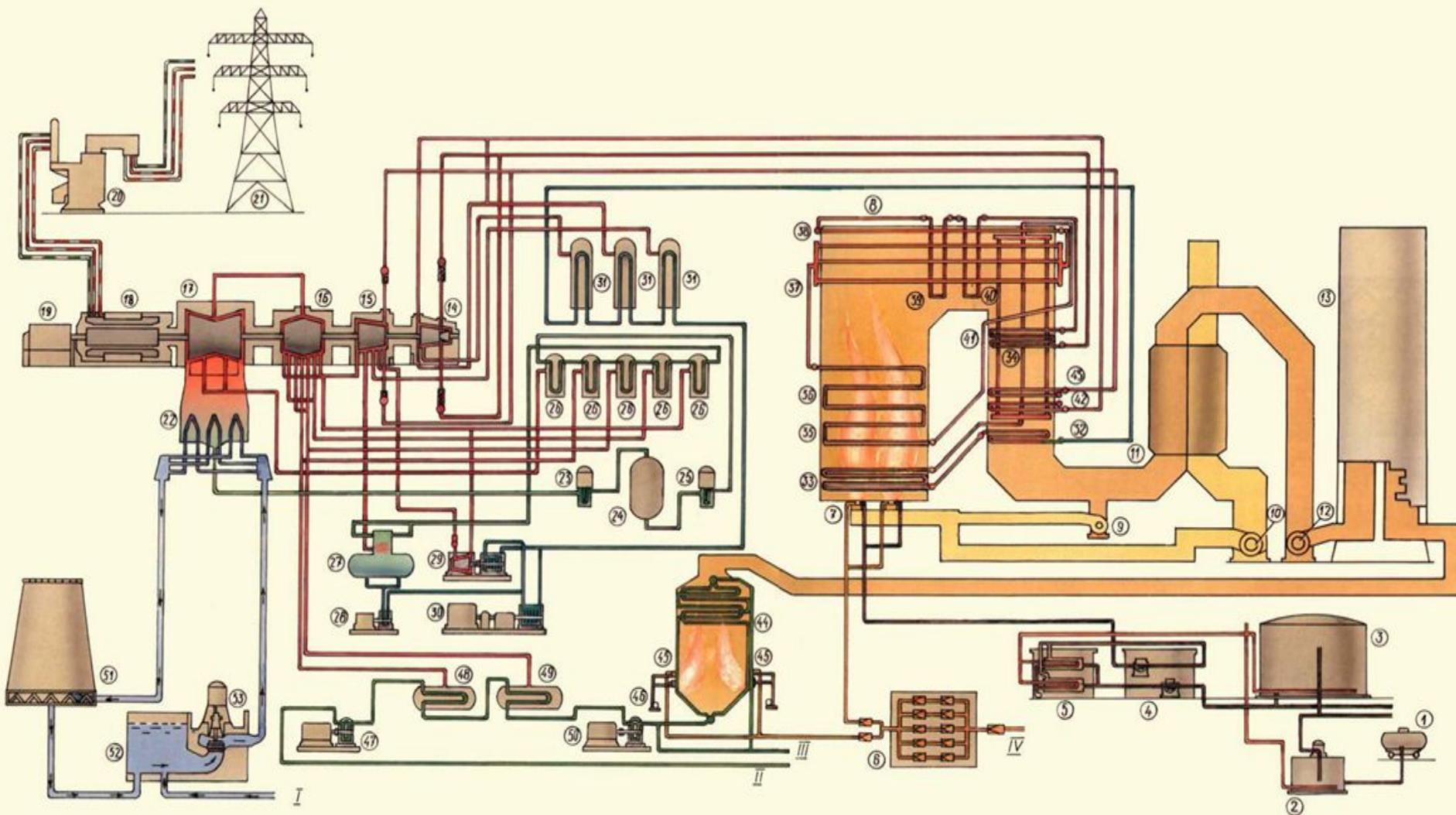
# Принципиальная тепловая схема ТЭС

(обозначения соответствуют предыдущему рис.)

- **Принципиальная тепловая схема ТЭС (ПТС)** - графическое изображение (с помощью условных обозначений) отдельных элементов оборудования, осуществляющих технологический процесс и входящих в состав пароводяного тракта, и соединяющих его трубопроводов.
- ПТС ТЭС изображается как одноагрегатная и однолинейная схема



# Принципиальная технологическая схема ТЭЦ на газе



# Принципиальная технологическая схема ТЭЦ на газе (описание)

- Главное существенное отличие турбоустановки отопительной ТЭЦ от ТЭС состоит в использовании не конденсационной, а теплофикационной паровой турбины — турбины, позволяющей выполнять большие регулируемые отборы пара на сетевые подогреватели, регулируя давление пара в них непосредственно в проточной части с помощью регулирующих диафрагм или клапанов).
- Как на КЭС, так и на ТЭЦ имеется водонагревательная (теплофикационная) сетевой установки. На КЭС имеются основной и пиковый сетевые подогреватели, получающие пар из нерегулируемых отборов турбин.
- На предыдущем слайде изображена технологическая схема ТЭЦ, отличающаяся от КЭС только схемой подготовки сетевой воды. Остывшая в теплоприемниках тепловой сети **обратная сетевая вода (магистраль II)** поступает к **сетевым насосам I подъема 47**. Насосы повышают давление сетевой воды, исключая ее закипание при нагреве в сетевых подогревателях и обеспечивая ее прокачку через сетевые подогреватели. Из сетевого насоса *СН-I* сетевая вода последовательно проходит через трубную систему **нижнего и верхнего сетевых подогревателей 48 и 49**. Нагрев сетевой воды в них осуществляется теплотой конденсации пара, отбираемого из двух отборов паровой турбины. Отбор пара осуществляется при таких давлениях, чтобы температура его конденсации в сетевом подогревателе была достаточной для нагрева сетевой воды (см. рис.)
- Нагретая в НСП и ВСП сетевая вода поступает к **сетевым насосам II подъема 49**, которые подают ее в **пиковый водогрейный котел (ПВК) 44** и обеспечивают ее прокачку через всю или часть тепловой сети. Для нагрева сетевой воды в *ПВК* в него от *ГРП* подается газ, а от дутьевого вентилятора — воздух. Нагретая до требуемой температуры сетевая вода (прямая) подается в **магистраль прямой сетевой воды III** и из нее — тепловым потребителям.

# Энергетический баланс ТЭС

- Энергетический баланс ТЭС в единицах мощности записывается следующим образом, МВт

$$Q_c = N_{\varepsilon} + \Delta N_m + \Delta N_{\varepsilon} + Q_m + \Delta Q_m + Q_k + \Delta Q_{mp} + \Delta Q_{ка}$$

В этой формуле:

- $Q_c$  - теплота, выделившаяся при сгорании топлива;
- $N_{\varepsilon}$  - электрическая мощность, вырабатываемая ТЭС (турбоустановкой);
- $\Delta N_m + \Delta N_{\varepsilon}$  - сумма потерь механических (преимущественно в подшипниках турбоагрегата) и в генераторе (в обмотках ротора и статора и в стали статора);
- $Q_m$  - мощность тепловой нагрузки (суммарный отпуск теплоты с горячей водой и с паром);
- $\Delta Q_m$  - потери при отпуске теплоты (этой величиной часто пренебрегают);
- $Q_k$  - потери теплоты в окружающую среду (для паротурбинной установки – потери в конденсаторе, отводимые с охлаждающей водой);
- $\Delta Q_{mp}$  - потери при транспорте теплоты в основном цикле установки (для паротурбинной установки – потери от утечек пара, потери от непрерывной продувки и тепловые потери трубопроводов и других элементов оборудования);
- $\Delta Q_{ка}$  - потери в котельном агрегате (с уходящими газами, от химического и механического недожога топлива и др.)

# Энергетический баланс ТЭС

Справедливы также следующие частные балансовые энергетические соотношения:

$$Q_c = Q_{ту} + \Delta Q_{тр} + \Delta Q_{ка},$$

где  $Q_{ту} = N_{э} + \Delta N_M + \Delta N_2 + Q_m + \Delta Q_m + Q_k$  - расход теплоты на турбоустановку (тепловая мощность турбоустановки);

$N_i = N_{э} + \Delta N_M + \Delta N_2$  - внутренняя мощность турбоагрегата (механическая, передаваемая на вал);

$Q_{ка} = Q_{ту} + \Delta Q_{тр}$  - расход теплоты (тепловая мощность) котельного агрегата.

$$N_{э} = N_{э}^{отп} + N_{с.н.},$$

где  $N_{э}^{отп}$  - электрическая мощность, отпущенная с шин станции;

$N_{с.н.}$  - электрическая мощность собственных нужд, включая привод питательных, конденсатных, сетевых и циркуляционных насосов, тягодутьевого оборудования, механизмов топливоприготовления и топливоподачи.

# Показатели энергетической эффективности ТЭС

При отпуске от ТЭС потребителям как электрической, так и тепловой энергии (это наиболее распространенный вариант их работы) распределение расходов теплоты и топлива по двум энергетической продукции осуществляется по **физическому** (энергетическому), по **нормативному** или по **эксергетическому** методу.

В первом случае весь энергетический эффект от совместной (комбинированной) выработки относится на электрическую энергию, во втором – он делится между двумя видами продукции в определенной пропорции, в третьем – относится на отпускаемую тепловую энергию.

Рассмотрим показатели энергетической эффективности ТЭС при распределении расходов теплоты и топлива по **физическому методу**.

Расход теплоты на выработку электроэнергии равен

$$Q_{ту}^э = Q_{ту} - Q_{ту}^m,$$

где  $Q_{ту}^m = Q_m + \Delta Q_m$  - расход теплоты турбоустановки, относимый на отпускаемую тепловую энергию (в других методах именно этот показатель определяется по-иному).

Удельный расход теплоты (брутто) на выработку электроэнергии для турбин без турбопривода питательного насоса равен

$$q_{ту}^э = \frac{Q_{ту}^э}{N_э}.$$

# Показатели энергетической эффективности ТЭС

**КПД ТЭС по выработке электроэнергии** определяется как

$$\eta_c^{\text{э}} = \eta_{\text{ту}}^{\text{э}} \cdot \eta_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{ка}}^{\text{бр}},$$

где  $\eta_{\text{тр}} = \frac{Q_{\text{ту}}}{Q_{\text{ка}}} \approx 0,97-0,985$  – КПД транспорта теплоты;

$\eta_{\text{ту}}^{\text{э}} = (q_{\text{ту}}^{\text{э}})^{-1}$  – КПД турбоустановки по выработке электроэнергии;

$\eta_{\text{ка}}^{\text{бр}} = \frac{Q_{\text{ка}}}{Q_c}$  – КПД котлоагрегата (брутто), принимается по справочным

данным парогенератора при работе на указанном топливе (в среднем  $\eta_{\text{ка}}^{\text{бр}} \approx 0,88-0,94$  при работе энергетических котлов на проектном топливе).

**КПД ТЭС по отпуску теплоты** равен

$$\eta_c^{\text{т}} = \eta_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{ка}}^{\text{бр}},$$

где  $\eta_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{т}}}{Q_{\text{ту}}^{\text{т}}} \approx 0,995$  – КПД турбоустановки по отпуску тепловой

энергии.

# Показатели энергетической эффективности ТЭС

**Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии (брутто) определяется как**

$$v_y^{\text{э}} = 0,123 \cdot (\eta_c^{\text{э}})^{-1}, \text{ кг у.т./кВт}\cdot\text{ч.}$$

**Удельный расход топлива (нетто) определяется с учетом доли расхода электроэнергии на собственные нужды и равен**

$$v_y^{\text{э.н}} = \frac{N_{\text{э}}}{N_{\text{э}}^{\text{отп}}} v_y^{\text{э}}, \text{ кг у.т./кВт}\cdot\text{ч.}$$

**Удельный расход условного топлива на отпуск тепловой энергии равен**

$$v_y^m = 34,1 \cdot (\eta_c^m)^{-1}, \text{ кг у.т./ГДж.}$$