

## ПРИМЕР ответов на вопросы специальной части экзаменационного билета

№п/п	Формулировка вопроса
6	Типы тепловых электростанций, простейшие тепловые схемы паротурбинных ТЭС

Тепловая электростанция (ТЭС) – электростанция, где используется химическая энергия горения органических топлив: твердого (уголь, торф, сланцы), жидкого (мазут), газообразного (газ)

Тепловые электрические станции подразделяют на:

- **конденсационные** электрические станции (КЭС), предназначенные для выработки только электрической энергии. Крупные КЭС районного значения получили название государственных районных электростанций (ГРЭС);
- **теплоэлектроцентрали (ТЭЦ)**, предназначенные для комбинированной выработки электрической и тепловой энергии (в виде горячей воды и пара).

В свою очередь КЭС и ТЭЦ оборудованы паросиловыми турбоустановками (работающими по циклу Ренкина):

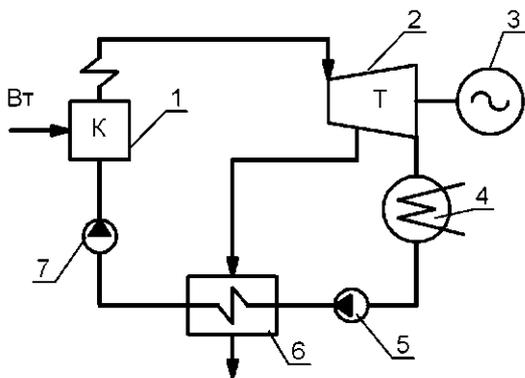
1) Докритического давления:

- без промежуточного перегрева пара, например, К-100-90 (КЭС), Т-100-130 (ТЭЦ);
- с промежуточным перегревом пара, например, К-200-130 (КЭС), Т-180-130 (ТЭЦ).

2) Сверхкритического давления с промежуточным перегревом пара, например, К-300-240 (КЭС), Т-250-240 (ТЭЦ).

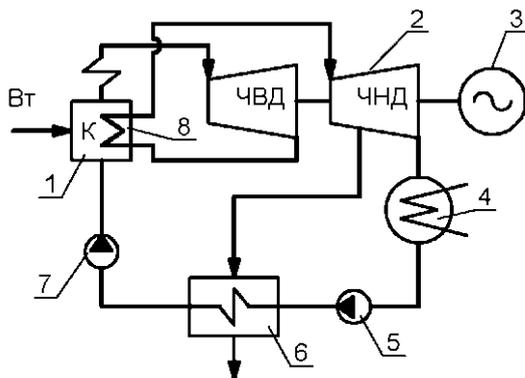
### Простейшие тепловые схемы КЭС

#### Без промежуточного перегрева пара



- 1 - паровой котел;
- 2 - паровая турбина;
- 3 - электрический генератор;
- 4 - конденсатор отработавшего пара турбины;
- 5 - конденсатный насос;
- 6 - регенеративный подогреватель;
- 7 – питательный насос.

#### С промежуточным перегревом пара



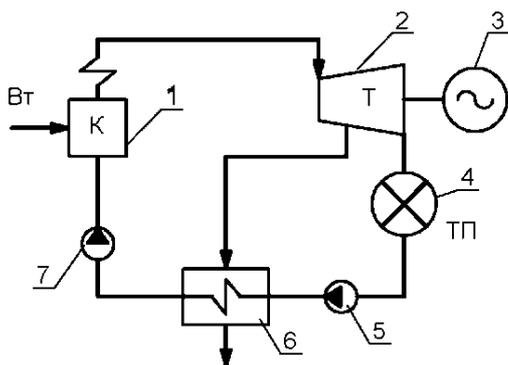
- 1 - паровой котел;
- 2 - паровая турбина;
- 3 - электрический генератор;
- 4 - конденсатор отработавшего пара турбины;
- 5 - конденсатный насос;
- 6 - регенеративный подогреватель;
- 7 – питательный насос;
- 8 - промежуточный перегрев пара.

Теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) предназначены:

- 1) Для снабжения паром промышленных предприятий и оборудованы турбоустановками
  - с конденсацией и производственным отбором пара (П-6-35/5, ПТ-80-130);
  - с противодавлением (Р-100-130) – **промышленные ТЭЦ**.
- 2) Для подогрева сетевой воды, поступающей к потребителям для отопления, вентиляции и горячего водоснабжения и оборудованы турбоустановками с конденсацией и теплофикационными регулируемыми отборами (Т-100/110-130, Т-250-240) – **отопительные ТЭЦ**.

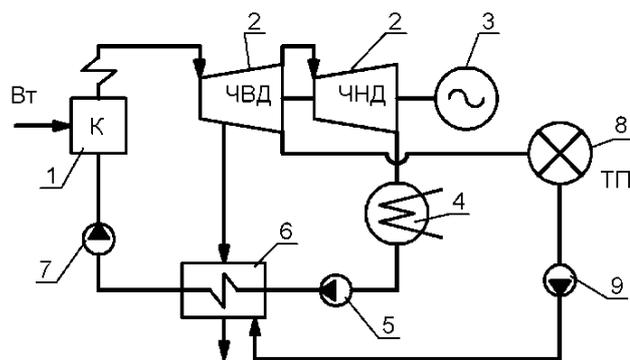
Простейшие тепловые схемы промышленной ТЭЦ

**С противодавлением**



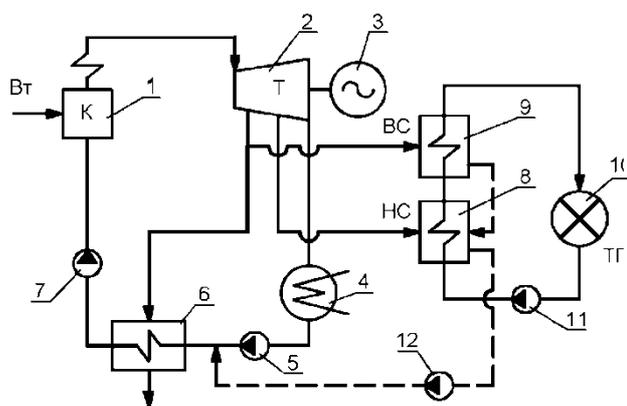
- 1 - паровой котел;
- 2 - паровая турбина;
- 3 - электрический генератор;
- 4 - промышленный потребитель пара;
- 5 - насос обратного конденсата с производства;
- 6 - регенеративный подогреватель;
- 7 – питательный насос.

С конденсацией и производственным отбором пара



- 1 - паровой котел;
- 2 - паровая турбина;
- 3 - электрический генератор;
- 4 - конденсатор отработавшего пара турбины;
- 5 - конденсатный насос;
- 6 - регенеративный подогреватель;
- 7 – питательный насос;
- 8- промышленный потребитель пара;
- 9- насос обратного конденсата с производства.

Простейшая тепловая схема отопительной ТЭЦ

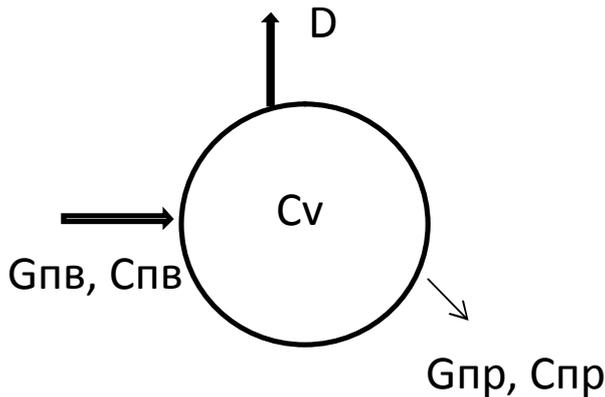


- 1-паровой котел;
- 2-паровая турбина;
- 3-электрический генератор;
- 4-конденсатор отработавшего пара турбины;
- 5-конденсатный насос;
- 6-регенеративный подогреватель;
- 7 – питательный насос;
- 8- нижний сетевой подогреватель;
- 9- верхний сетевой подогреватель;
- 10- тепловой потребитель;
- 11-сетевой насос.

№п/п	Формулировка вопроса
7	Постоянная и периодическая продувки. Двухступенчатые схемы испарения

С питательной в паровой котел (ПК) поступают примеси. Примеси могут растворять в воде и паре, растворять в воде и не растворяться в паре или частично растворяться и там и там. Если из контура котла вывести часть теплоносителя, то в установившемся режиме работы ПК количество вносимых примесей станет равно количеству выносимых примесей.

Схема постоянной продувки



Это называется постоянной продувкой (рис. 2.1). Простейшее уравнение материального баланса выглядит следующим образом:

$$C_v = C_{nv} (1+P)/P,$$

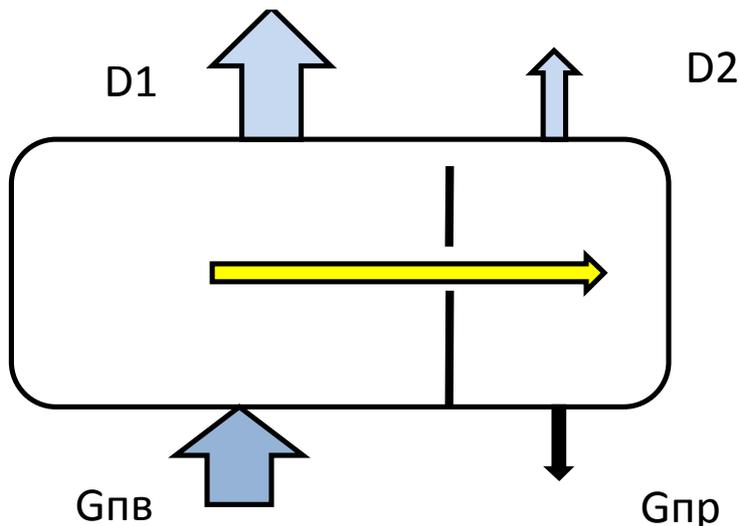
где P – относительный расход продувки.

Видно, что при увеличении P, концентрация примесей в котловой воде падает, то есть ее качество улучшается. Однако, при этом падает КПД котла. Необходимо отметить, что данная

модель действительна для ионно-молекулярной формы примесей. Для того, чтобы некоторые примеси, растворяясь в паре попадают на турбину (соединения железа, некоторые соли жесткости), вызывая процессы коррозии. Для предотвращения их переводят в нерастворимое состояния (шлам) при помощи тринатрийфосфата. Шлам выводят из нижнего коллектора.

Это называется периодическая продувка.

Схема двухступенчатого испарения



Если в барабане котла установить перегородку, а питательную воду подать левую часть, а постоянную продувку брать из правой, то качество котловой воды улучшится.

Это происходит потому, что для левого сечения переток слева направо является продувкой. Расход перетока кратно превосходит расход продувки. По выше написанной формуле видно, что чем больше расход продувки, тем лучше качество котловой воды.

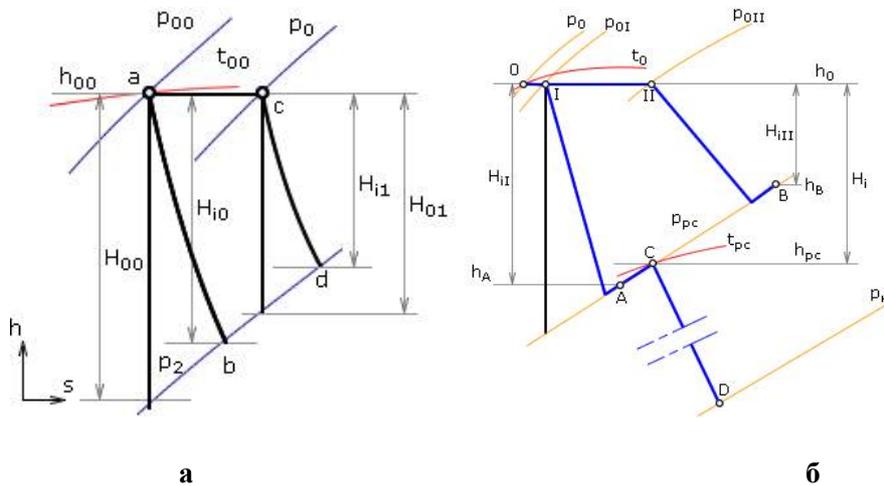
Для правого сечения переток является питательной водой. Качество котловой воды не зависит от расхода питательной воды, а расход продувки в левом сечении меньше.

Эта схема называется двухступенчатой схемой испарения. В современных котлах вместо перегородок в барабане используют выносные циклоны.

№п/п	Формулировка вопроса
8	Виды парораспределения в ПТУ

При дроссельном парораспределении турбины весь расход водяного пара при частичных нагрузках подвергается процессу дросселирования. При дроссельном парораспределении энтальпия пара перед первой ступенью сохраняется постоянной и равной энтальпии свежего пара ( $h_{01}=h_{00}=\text{const}$ ).

**Процесс расширения в турбине с дроссельным (а) и сопловым парораспределением (б)**



Располагаемый теплоперепад турбины при снижении расхода пара уменьшится с  $H_{00}$  до  $H_{01}$ . Уменьшение теплоперепада турбины при  $G_1 < G_0$  в широком диапазоне изменения расходов происходит в основном за счет ее последней ступени. Относительный внутренний КПД турбины в сравнении с расчетным режимом при дросселировании уменьшается:

$$\eta_{oi} = \frac{H_{i1}}{H_{00}} = \frac{H_{i1}}{H_{00}} \frac{H_{01}}{H_{01}} = \gamma_{op} \eta_{oi}^1$$

При сопловом парораспределении изменение расхода пара осуществляется несколькими регулирующими клапанами, открываемыми последовательно (рис. 1 (б)). Каждый клапан (группа клапанов) обслуживает свою группу сопел регулирующей ступени. Ее сопловые решетки выполнены в форме сопловых сегментов, которые устанавливаются в корпусах соответствующих сопловых коробок. Конструктивным признаком паровых турбин с сопловым парораспределением является наличие в ней регулирующей ступени. В турбинах с дроссельным парораспределением таких ступеней нет. Следует помнить, что регулирующая ступень является парциальной и ее экономичность из-за потерь от парциальности ниже, чем турбинных ступеней последующих отсеков. Поэтому общая экономичность турбин с дроссельным парораспределением на расчетном режиме выше, чем турбин с сопловым парораспределением. При сопловом парораспределении потери от дросселирования водяного пара относятся не ко всему расходу пара, а только к той его части, которая протекает через частично открытый клапан. Поэтому экономичность турбин с сопловым парораспределением при частичных нагрузках выше, чем с дроссельным, где потери от дросселирования относятся ко всему расходу пара. По этой причине сопловое парораспределение получило наибольшее распространение в турбинах ТЭС, которые чаще, чем турбины АЭС, работают при частичных нагрузках. Турбины, обеспечивающие несение базовой нагрузки в энергосистемах, выполняются с дроссельным парораспределением.

№п/п	Формулировка вопроса
9	Режимы работы теплофикационных турбин по тепловому графику (на тепловом потреблении). Общая характеристика. Процесс расширения в h-s диаграмме. Регулирование нагрузки. Тепловая экономичность. Основные ограничения

### Общая характеристика

При работе по тепловому графику электрическая мощность турбоагрегата  $N$  изменяется в зависимости от требуемой тепловой нагрузки отборов турбины  $Q_T$  и параметров отпуска тепла. В этом случае регулируемую диафрагму полностью закрывают (или приоткрывают минимально) только для пропуска вентиляционного потока через ЧНД в конденсатор, обеспечивающего допустимый температурный уровень проточной части ЧНД (обычно 2-4%  $D_0$ , зависит от типа турбины, давления в отборе перед диафрагмой, вакуума в конденсаторе, высоты последних ступеней ЦНД).

В этом режиме, если  $Q_T$  возрастает, тогда расход пара на турбину увеличивается путем открытия регулирующих клапанов, регулирующая диафрагма остается в неизменном положении (закрытом). Увеличение расхода пара одновременно ведет к росту отпуска тепловой нагрузки и параметров отпуска (если расход сетевой воды не меняется), при этом электрическая мощность, как правило, возрастает. При снижении  $Q_T$  расход пара на турбину уменьшается, регулирующие клапаны прикрываются, регулирующая диафрагма остается в неизменном положении (закрыто полностью) и тогда электрическая мощность  $N$  снижается. Если расход сетевой воды остается неизменным, то при снижении отпуска тепловой нагрузки, параметры отпускаемой среды снижаются.

Изменение тепловой нагрузки может происходить за счет изменения расхода сетевой воды (или отпуска пара), при неизменных параметрах. Тогда изменение расхода рабочей среды приводит к изменению отпуска тепла, соответственно пропорциональному изменению расхода пара на турбину и изменению мощности.

$$Q_T^{омб} = C_p * G_{св} * (t_{np\ ЧНД} * - t_{oc}).$$

Качественная характеристика процесса расширения пара в турбине, при работе по тепловому графику с одноступенчатым подогревом представлена на рис. 1.

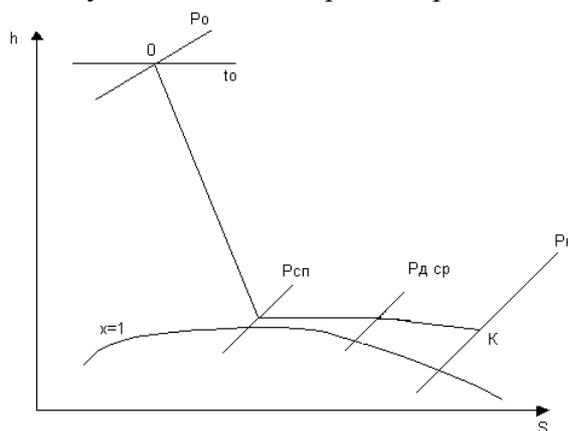


Рисунок.1 – Процесс расширения пара при работе по тепловому графику

Из рис. 1. видно, что при работе по тепловому графику ЧНД либо практически не вырабатывает мощность, либо вообще может потреблять. При этом в регулирующей диафрагме происходит дросселирование вентиляционного потока до давления за диафрагмой. Давление за диафрагмой определяется по формуле Стодоль-Флюгеля и зависит от давления в конденсаторе и расхода пара. Как правило, давление за диафрагмой лишь на несколько процентов выше давления в конденсаторе.

При использовании для подогрева сетевой воды одновременно обоих теплофикационных отборов регулятор давления поддерживает постоянство давления в верхнем отопительном отборе. При использовании для подогрева сетевой воды только одного нижнего отопительного отбора регулятор давления поддерживает постоянство давления в нижнем отборе.

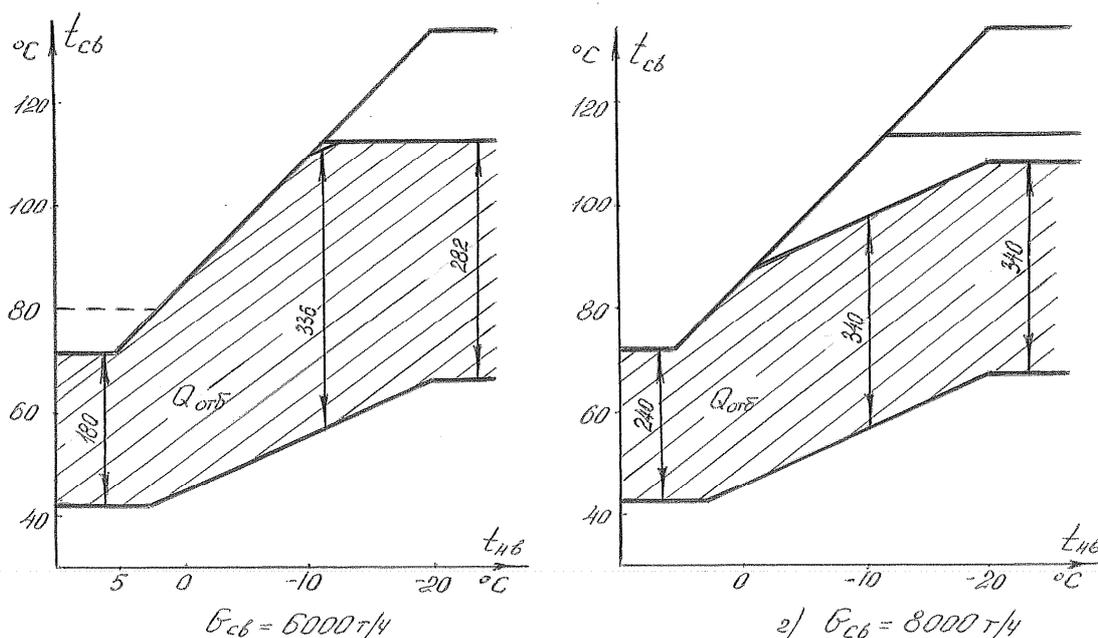
**Итог:** При работе по тепловому графику, вырабатываемая турбиной электрическая мощность, определяется тепловой нагрузкой и параметрами отпуска тепловой нагрузки.

Работа с закрытой диафрагмой, по тепловому графику, наиболее экономична, с точки зрения использования топлива. В этом случае коэффициент использования теплоты топлива может достигать 80%. Экономичность достигается за счет максимального снижения потерь в холодном источнике (конденсаторе).

### Ограничения

У теплофикационных турбин имеется ряд ограничений по режимам работы. Рассмотрим их на примере турбины типа Т-250/300-240-2. Ограничивается максимальный расход свежего пара в "голову" турбины величиной 980 т/час (27,2 кг/с). Ограничивается максимум тепловой нагрузки турбины величиной 340 Гкал/час. У турбин Т-250/300-240 некоторых выпусков максимальная суммарная тепловая нагрузка теплофикационных отборов турбины составляет 350 Гкал/час (1424,6 ГДж/час) (396,04 МВт). Ограничиваются пределы регулирования давлений пара в теплофикационных отборах следующими значениями:

- ✓ у верхнего отбора 0,6-2,0 ата (0,06-0,2 МПа);
- ✓ у нижнего отбора 0,5-1,5 ата (0,05-0,15 МПа).



**Рисунок. 2 – Характер изменения тепловой нагрузки отборов турбины при работе по тепловому графику, при разных расходах сетевой воды для турбины Т-250-240**

Для турбины Т-110-130, эти ограничения соответственно:

- ✓ у верхнего отбора 0,6-2,5 ата (0,06-0,25 МПа);
- ✓ у нижнего отбора 0,5-2,0 ата (0,05-0,2 МПа).

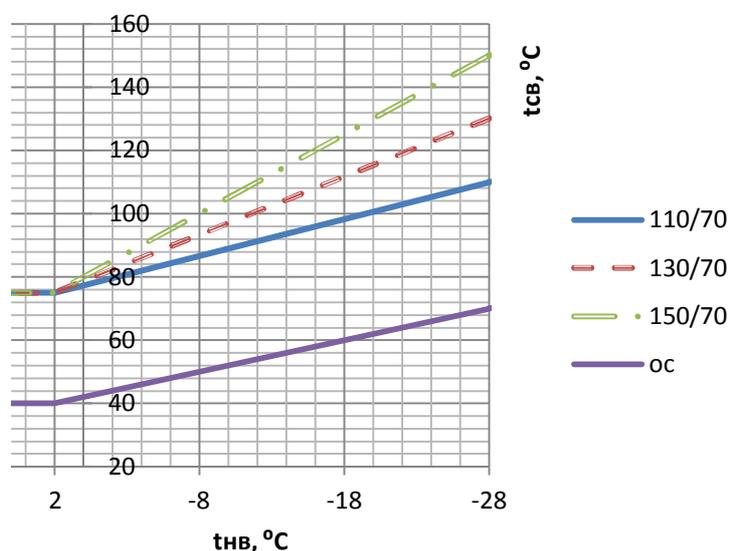
Аналогичные ограничения по минимальной и максимальной величине давления имеются для всех типов турбин. Эти ограничения могут существенным образом влиять на работу турбин при работе по тепловому графику и оказывать влияние на максимально-возможный отпуск тепла от отборов.

Скажем при давлении у Т-110-130 2,5 кг/см<sup>2</sup>, максимальный нагрев сетевой воды не превышает 120°C при работе с двумя ступенями подогрева.

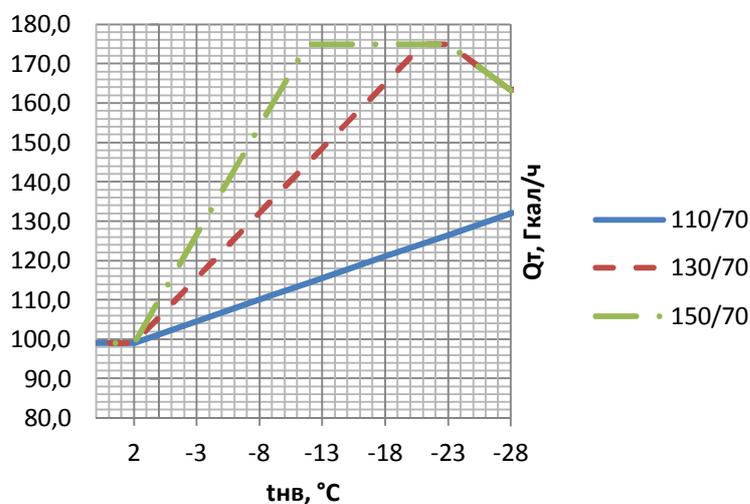
При расходе сетевой воды ниже проектного значения, предусмотренного на турбине, максимальное давление в отборе достигается, когда еще максимальная величина отпуска тепла не достигнута. В результате такого ограничения максимальная тепловая нагрузка может быть значительно меньше, указанной в паспорте турбины. При этом электрическая мощность, вырабатываемая на тепловом потреблении может быть значительно ниже указанной в паспорте турбины.

Следует отметить, что это ограничение происходит именно в те моменты, когда температура максимально отрицательная и требуется максимальный отпуск тепла от ТЭЦ. Существенное влияние в этом случае оказывает также температурный график теплосети. Для температурного графика теплосети, например 150/70 эти ограничения наступают при температурах уже минус 10 °С, в зависимости от расхода сетевой воды. Для температурного графика, например 110/70 данные температурные ограничения не наступают, но обеспечения максимального отпуска тепла тоже не удастся достигнуть, но уже по причине максимального подогрева сетевой воды в соответствии с температурным графиком только до 110°С.

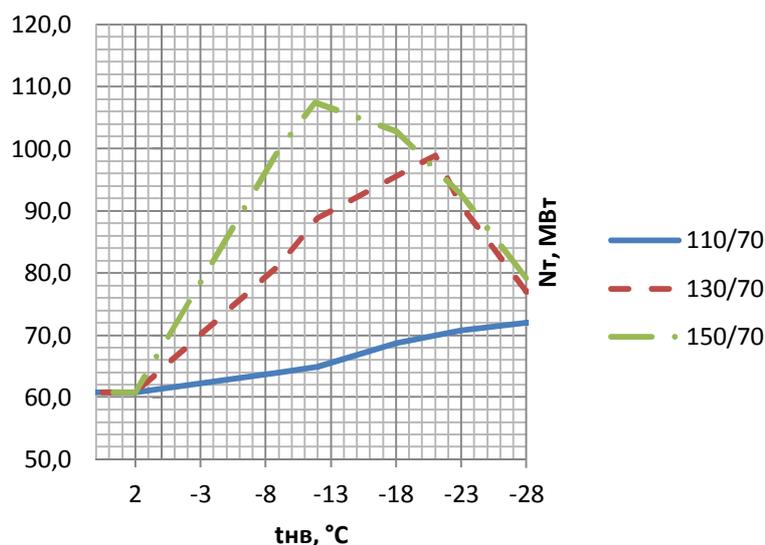
Ниже на рис. 3 представлены типовые температурные графики теплосети, на рис. 4 и 5 представлены возникающие ограничения по отпуску тепловой нагрузки и по выработке электрической мощности при работе по тепловому графику.



**Рисунок.3 – Типовые температурные графики теплосети**



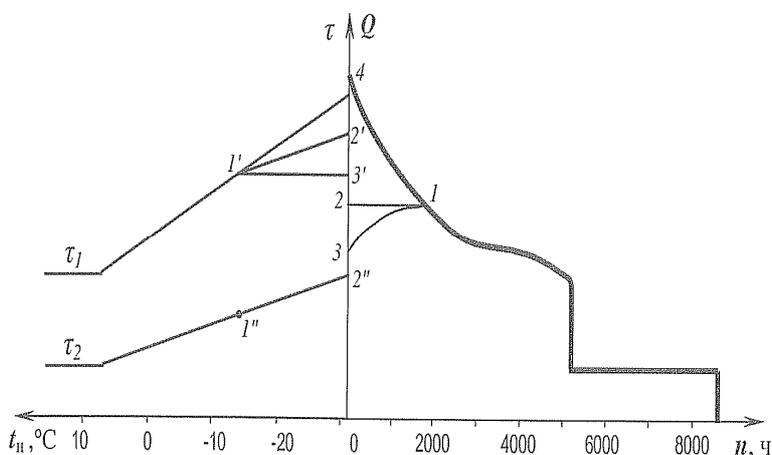
**Рисунок.4 – Изменение отпуска тепла из отборов турбины, при работе по тепловому графику с учетом ограничений ( $G_{св}=3300\text{т/ч}$ )**



**Рисунок.5 – Изменение электрической мощности турбины, при работе по тепловому графику с учетом ограничений ( $G_{св}=3300\text{т/ч}$ )**

Ниже на рис. 6 приводится изменение отпуска тепловой нагрузки с учетом возможных ограничений в течение года с учетом продолжительности стояния температур.

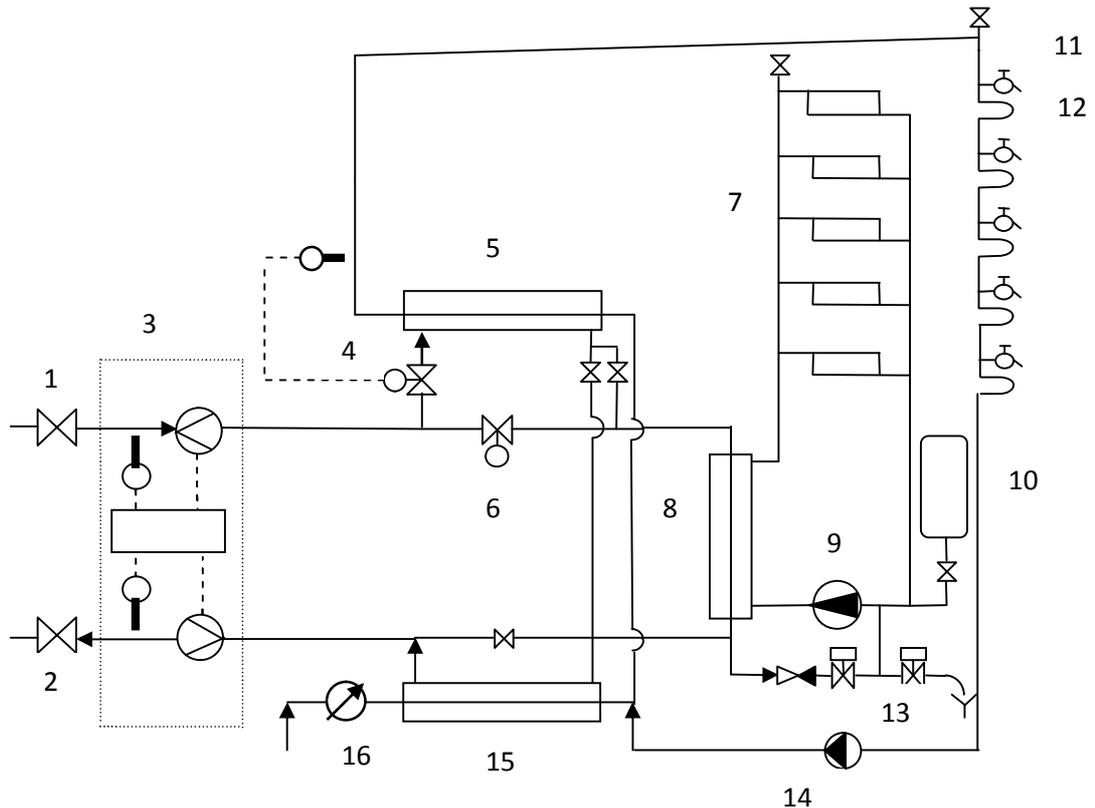
Линия 2' и 3' показывают в левом квадранте, показывают изменение степени подогрева сетевой воды в сетевых подогревателях, когда ограничение по давлению отсутствует (линия 2') и когда это ограничение имеется (линия 3'). Кривые соответственно 2 и 3 показывают, как меняется отпуск тепла из отборов для каждого варианта, и как в этом случае меняется загрузка пиковых источников.



**Рисунок. 6 – Изменение загрузки отборов и отпуска тепла пиковыми источниками в годовом разрезе, при наличии ограничений по максимальному давлению в отборах**

№п/п	Формулировка вопроса
10	Схема теплового пункта в закрытой водяной системе централизованного теплоснабжения с узлом учёта теплоты и присоединением систем отопления и горячего водоснабжения

Принципиальная схема теплового пункта в закрытой системе теплоснабжения. Установка отопления присоединена по независимой схеме. Теплообменники циркуляционной установки горячего водоснабжения присоединены по двухступенчатой схеме.



### Принципиальная схема теплового пункта в закрытой системе теплоснабжения

- 1 и 2 - задвижки на границе теплового пункта;
- 3 - теплосчётчик с датчиками температуры и расхода сетевой воды;
- 4 - регулятор температуры горячей воды в системе ГВС с датчиком температуры и регулирующим клапаном;
- 5 - теплообменник системы ГВС 2-й ступени;
- 6 - регулятор расхода сетевой воды на отопление с регулирующим клапаном;
- 7 - система отопления;
- 8 - теплообменник отопления;
- 9 - циркуляционный насос системы отопления;
- 10 - расширительный бак;
- 11 - водоразборное устройство;
- 12 - отопительный прибор ванной комнаты;
- 13 - система стабилизации давления в системе отопления;
- 14 - циркуляционный насос системы ГВС;
- 15 - теплообменник системы ГВС 1-й ступени;
- 16 - счётчик холодной воды.

№п/п	Формулировка вопроса
11	Типы золоуловителей ТЭС. Их преимущества и недостатки

На ТЭС находят применение следующие типы золоуловителей:

1. Инерционные золоуловители;
2. Мокрые золоуловители;
3. Электрофилтры;
4. Тканевые пылеуловители.

Эффективность работы золоуловителей характеризуется следующими показателями:

$$\eta = \frac{G_{\text{вх}} - G_{\text{вых}}}{G_{\text{вх}}} = \frac{c_{\text{вх}} - c_{\text{вых}}}{c_{\text{вх}}} \quad (1)$$

где  $\eta$  - степень улавливания золы в золоуловителе;  $G_{\text{вх}}$ ,  $G_{\text{вых}}$  - количество золы на входе и на выходе из золоуловителя в единицу времени;  $c_{\text{вх}}$ ,  $c_{\text{вых}}$  - концентрация золы на входе и на выходе из золоуловителя. Иногда удобней использовать величину проскока золы  $P$  через золоуловитель:

$$P = \frac{G_{\text{вых}}}{G_{\text{вх}}} = \frac{c_{\text{вых}}}{c_{\text{вх}}} \quad (2)$$

Степень улавливания золы и ее проскок связаны следующим соотношением:

$$P = 1 - \eta \quad (3)$$

Проскок золы через золоуловитель определяется из выражения:

$$P = \exp(-\Pi) \quad (4)$$

1. В качестве инерционных золоуловителей на ТЭС получили применение циклоны, в которых осаждение золы происходит за счет центробежных сил при вращательном движении потока. Скорость дрейфа в циклоне пропорциональна диаметру частицы во второй степени, поэтому циклоны очень плохо улавливают мелкие частицы золы. С увеличением радиуса циклона степень улавливания золы снижается, поэтому применяются батарейные циклоны, где в одном корпусе устанавливается большое число циклонов небольшого диаметра. Циклоны имеют степень улавливания золы ниже 90 %, поэтому они применялись на котлах малой мощности. Циклоны имеют высокое аэродинамическое сопротивление (600 – 800 Па). Это очень простые и недорогие устройства, которые не требуют высокой квалификации персонала.
2. Мокрые золоуловители

Простейшим типом мокрого золоуловителя является центробежный скруббер, у которого по стенке стекает пленка воды. Поэтому отсепарированная за счет инерционных сил зола лучше отводится из скруббера в бункер и снижается вторичный унос золы со стенок газовым потоком.

Более высокую степень улавливания можно получить при применении устройств с предварительным увлажнением золы. Наибольшее распространение получили мокрые золоуловители с предварительно включенным коагулятором в форме трубы Вентури. В поток газов на входе в трубу Вентури через специальные форсунки вводится вода. В конфузоре трубы Вентури происходит разгон пылегазового потока до скорости 50-70 м/с, в горловине происходит дробление капель воды при взаимодействии с быстро движущимся потоком, а в диффузоре происходит торможение пылегазового потока и столкновение частиц золы с каплями воды. После трубы Вентури поток тангенциально вводится в скруббер,

стенки которого орошаются водой, и коагулированные частицы удаляются в бункер. В трубе Вентури происходит захват мелких частиц золы более крупными каплями воды

Параметр золоулавливания для мокрых золоуловителей с коагулятором в форме трубы Вентури определяется по формуле:

$$П = \sqrt{q_{ж} u_2}, \quad (5)$$

где  $q_{ж}$  - удельный расход орошающей жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $u_2$  - скорость газов в горловине трубы Вентури, м/с. Обычно  $q_{ж}$  принимается в пределах 0,12-0,20 кг/м<sup>3</sup>, а  $u_2$  -50-70 м/с. Таким образом, эффективность работы мокрых золоуловителей с предвключенной трубой Вентури зависит от удельного расхода орошающей жидкости и от скорости газов в горловине. Это единственный вид золоуловителей, в котором эффективность очистки не зависит от размера частиц. В первом приближении можно принять, что все частицы от крупных до мелких улавливаются одинаково, и их дисперсный состав не учитывать.

Мокрые золоуловители с предвключенной трубой Вентури имеют степень улавливания 95 – 97 %, поэтому применялись на котлах малой и средней мощности. Имеют высокое аэродинамическое сопротивление (до 1000 Па). Температура дымовых газов снижается до 90 °С и происходит загрязнение воды. Их нельзя применять при сжигании углей с высоким содержанием СаО.

### 3. Электрофильтры

Применяются на котлах большой мощности и могут иметь степень улавливания золы 99,0 -99,5 %. Очень сложные и дорогие устройства, требуют высокой квалификации при их обслуживании и монтаже. Имеют низкое аэродинамическое сопротивление (200 Па).

В электрофильтрах запыленный газ движется в каналах, образованных осадительными электродами, между которыми расположены через определенное расстояние коронирующие электроды. К коронирующим электродам подводится постоянный ток высокого напряжения (как правило, отрицательный), а осадительные электроды заземлены. При определенной напряженности электрического поля происходит ионизация дымовых газов, сопровождающаяся возникновением коронного разряда, который на весь межэлектродный промежуток не распространяется и затухает по мере уменьшения напряженности электрического поля в направлении осадительного электрода. Газовые ионы различной полярности, образующиеся в зоне короны, под действием сил электрического поля движутся к разноименным электродам, вследствие чего в межэлектродном пространстве возникает электрический ток, называемый током короны. Частицы золы, адсорбируя ионы, приобретают электрический заряд и под действием электрического поля двигаются к электродам, осаждаюсь на них. Через определенные промежутки времени с помощью ударного механизма происходит встряхивание электродов, и частички золы под действием силы тяжести падают в бункер.

На степень улавливания в электрофильтрах влияют следующие факторы: размеры частиц; удельное электрическое сопротивление золы; скорость газов и равномерность поля скоростей; протечки газов через неактивные полуактивные зоны; число полей и время нахождения газов в электрофильтре; режим встряхивания золы; качество монтажа и состояние электродов.

### 4. Тканевые золоуловители

В тканевых фильтрах фильтрация осуществляется через гибкую ткань, изготовляемую из тонких нитей. Фильтры имеют цилиндрическую форму и получили название рукавных. С

помощью тканевых фильтров можно получить высокую степень улавливания пыли до 99,9% и выше. Скорость газового потока через ткань должна быть очень низкой, порядка  $u=0,01-0,02$  м/с, поэтому требуют большого расхода ткани. Гидравлическое сопротивление оказывается высоким, на уровне 0,5–1,5 кПа. Материал фильтра должен быть устойчивым к повышенной влажности и влиянию химических соединений. В качестве материала фильтров нашли применение стекловолно и стекловолно с графитом, а также оксалин. Длительность работы ткани составляет около 3 -4 лет. Тканевые фильтры конструктивно выполняются многокамерными. Регенерация фильтра осуществляется с помощью сжатого воздуха. Капитальные затраты на тканевые фильтры на 20- 30 % ниже, чем на электрофильтры, но через 3 -4 года требуется полная замена ткани. Рукавные фильтры следует применять при высокой зольности угля для котлов большой мощности.