

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ ЗАОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВПО РГАУ)**

**Факультет механизации и технического сервиса
Кафедра эксплуатации машинно-тракторного парка**

Старший преподаватель Ю. Б. Юдин

ТЕПЛОТЕХНИКА

презентация лекций

для направления подготовки:

110800 - «Агроинженерия» _ все профили

190600 – Эксплуатация ТТМиК

профиль - Автомобильный сервис

Москва -2014 г

Содержание дисциплины «Теплотехника»

- Теплотехника — это наука, занимающаяся проблемами получения, преобразования и использования энергии. Очевидно, что чем меньше потери будут при использовании или преобразовании энергии, тем выше будет эффективность производства.
- Все большая энерговооруженность сельского хозяйства, необходимость ее рационального использования требуют от специалистов глубокого знания предмета теплотехники и ее составных частей: технической термодинамики, теории теплообмена и массообмена, промышленной теплотехники и применения теплоты в сельском хозяйстве.

Содержание дисциплины

«Теплотехника»

- **Модуль 1. Введение. Техническая термодинамика**
- Тема 1.1. Введение. Основные понятия и определения термодинамики
- Тема 1.2. Первый закон термодинамики. Термодинамические процессы
- Тема 1.3. Второй закон термодинамики.
- **Модуль 2. Термодинамические циклы.**
- Тема 2.1. Циклы тепловых двигателей
- Тема 2.2. Термодинамика потока. Истечение и дросселирование газов и паров
- Тема 2.3. Циклы холодильных установок
- Тема 2.4. Новые способы преобразования энергии. Прямые преобразователи энергии

Содержание дисциплины «Теплотехника»

- **Модуль 3. Теория теплообмена.**
- Тема 3.1. Основные понятия и определения теории теплообмена. Теплопроводность.
- Тема 3.2. Конвективный теплообмен.
- Тема 3.3. Теплообмен излучением
- Тема 3.4. Теплопередача
- Тема 3.5. Основы расчета теплообменных аппаратов
- **Модуль 4. Промышленная теплоэнергетика.**
- Тема 4.1. Топливо, основы теории горения
- Тема 4.2. Котельные установки
- Тема 4.3. Тепловые двигатели
- Тема 4.4. Тепловые электрические станции.

Содержание дисциплины «Теплотехника»

- **Модуль 5. Применение теплоты в сельском хозяйстве**
- Тема 5.1. Теплоснабжение предприятий сельского хозяйства.
- Тема 5.2. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха
- Тема 5.3. Теплоснабжение защищенного грунта
- Тема 5.4. Тепловая сушка с.-х. продукции.
- Тема 5.5. Холодильные машины.

Модуль 1. Техническая термодинамика

- Тема 1.1. Введение. Основные понятия и определения термодинамики
- **Параметры состояния рабочего тела.**
- Превращение тепловой энергии в механическую энергию возможно только при посредстве какого-либо тела, которое называют *рабочим*.
- Рабочее тело может совершать работу только тогда, когда оно расширяется. Способностью к существенному расширению при подведении теплоты обладают тела, находящиеся в газообразном состоянии.
- Для упрощения изучения свойств газообразных тел в технической термодинамике введено понятие *идеального газа*, т.е. такого состояния газа, в котором отсутствуют силы взаимодействия между молекулами, а их объем принимается настолько малым, что им можно пренебречь.
- Водяной пар в технической термодинамике рассматривается как реальный газ, на который не распространяются законы и зависимости идеальных газов.

- *Основные параметры*, характеризующие условия, в которых находится газообразное тело: давление, удельный объем, температура.
- *Давление p* - результат ударов молекул газа о стенки сосуда; определяется силой, действующей по нормали на единицу площади поверхности.
- В Международной системе единиц измерения СИ за единицу давления принят «Паскаль»: $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$. В практике используют обозначения «килоПаскаль» (кПа), «мегаПаскаль» (МПа) и др.: $1 \text{ МПа} = 10^3 \text{ кПа} = 10^6 \text{ Па}$.
- В технике используют и внесистемные единицы измерения давления: техническая атмосфера $1 \text{ ат} = 1 \text{ кг(силы)/см}^2 = 10^4 \text{ кгс/м}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па} = 10^4 \text{ мм вод. ст.} = 735,6 \text{ мм рт. ст.}$
- Давление в замкнутом пространстве называется абсолютным. Оно может быть больше или меньше атмосферного давления:
- $p_{\text{абс}} = p_{\text{бар}} + p_{\text{изб}}$
- $p_{\text{абс}} = p_{\text{бар}} - p_{\text{вак}}$
- где $p_{\text{абс}}$ - абсолютное давление; $p_{\text{бар}}$ - барометрическое (атмосферное) давление; $p_{\text{изб}}$ - избыточное давление; $p_{\text{вак}}$ - вакуумметрическое давление (разрежение).
- Избыточное давление измеряется манометрами, разрежение (вакуум) - вакуумметрами.

$$v = \frac{V}{M},$$

- *Удельный объем* v - объем единицы массы рабочего тела ($\text{м}^3/\text{кг}$): $v = V/m$
- где V — объем рабочего тела, м^3 ; m — масса рабочего тела, кг.
- Величина, обратная удельному объему, - *плотность* ρ ($\text{кг}/\text{м}^3$): ,
- $\rho = 1/v$.
- *Температура* характеризует степень нагрева тела, т. е. степень интенсивности движения молекул или меру его средней кинетической энергии.
- В термодинамике в качестве параметра состояния газа используется термодинамическая (абсолютная) температура (T). Она измеряется в градусах Кельвина (K), пропорциональна средней кинетической энергии движения молекул и отсчитывается от абсолютного нуля.
- Кроме термодинамической (абсолютной) шкалы Кельвина применяется и Международная (практическая) стоградусная шкала (t), в которой единица измерения температуры — градус Цельсия ($^{\circ}\text{C}$). За ноль градусов (0°C) в этой шкале принята температура тающего льда, а за 100°C — температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении.
- Величина градуса Цельсия равна градусу Кельвина. Связь между этими шкалами
- $$T = t + 273,15.$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{p_1}{p_2}.$$

- Основные газовые законы.
- Закон Бойля-Мариотта (при $T = \text{const}$);
- $p v = \text{const}$ (при $T = \text{const}$): $v_2/v_1 = p_1/p_2$
- где v_1, v_2, p_1, p_2 - удельные объемы и давления двух различных состояний газа.
- Закон Гей-Люссака устанавливает зависимость удельного объема газа от его температуры: при постоянном давлении удельный объём прямо пропорционален абсолютной температуре:
 - (при $p = \text{const}$): $v_2/v_1 = T_2/T_1$
 - где T_1, T_2 — температуры двух различных состояний газа.
- Закон Шарля устанавливает зависимость давления газа от его температуры: при постоянном удельном объеме абсолютное давление газа прямо пропорционально абсолютной температуре:
 - (при $v = \text{const}$): $p_2/p_1 = T_2/T_1$
- Связь между основными параметрами состояния идеального газа устанавливается уравнением Б. Клапейрона (1834 г.), которое он вывел на основе законов Бойля-Мариотта и Гей-Люссака. Это уравнение называется

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ

- Для равновесной термодинамической системы существует функциональная связь между термодинамическими параметрами, называемая **уравнением состояния**:

- $f(p, v, T) = 0$

- Уравнение состояния 1 кг идеального газа (ур-е Клайперона-Менделеева) будет иметь вид

- $pv/T = \text{const} = R$ или $pv = RT$,

- где R – удельная газовая постоянная, Дж/(кг · К).
- Газовая постоянная - это работа 1 кг идеального газа при постоянном давлении и изменении температуры на 1 К.

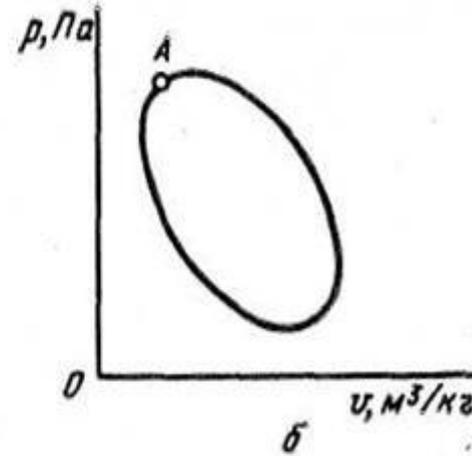
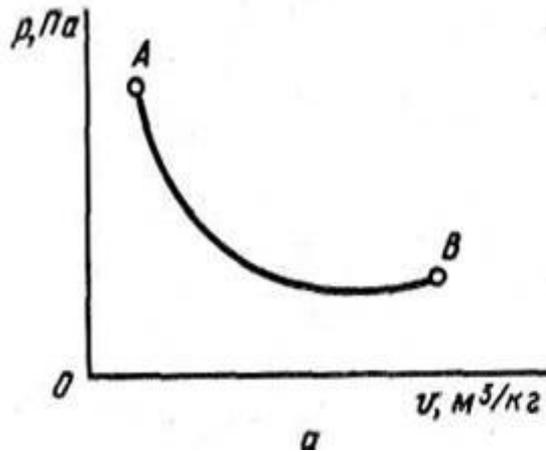
УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ

- Уравнение состояния любой массы газа:
 - $pvm=mRT$.
- Т.к. $vm=V$, мы получим $pV=mRT$.
- Уравнение состояния для массы 1 киломоля газа:
- $pV_{\mu}=\mu RT$, где μ и V_{μ} – масса и объём киломоля.
- μR – универсальная газовая постоянная:
- $R_{ун}=\mu R=8314$ Дж/(моль · К).
- Уравнение состояния для реальных газов (ур-е Ван-дер-Ваальса):
- $(p+a/v^2)(v-b)=RT$

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

- Изменение состояния термодинамической системы вследствие воздействия на нее внешней среды называется термодинамическим процессом. При этом происходит последовательное изменение параметров рабочего тела.
- Процесс, состоящий из непрерывного ряда последовательных равновесных состояний, называется равновесным процессом. Каждое из таких состояний, будучи равновесным, может быть описано уравнением состояния.
- Для того чтобы при переходе термодинамической системы из одного состояния в другое все промежуточные состояния могли рассматриваться как равновесные, такой процесс должен идти очень медленно. Процесс, не удовлетворяющий этому требованию, — неравновесный. Равновесные процессы называются обратимыми, неравновесные — необратимыми процессами.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС



- Так при перемещении поршня в цилиндре v, p, T находящегося внутри газа будут изменяться, будет совершаться процесс расширения газа или сжатия, но такой процесс совершается достаточно быстро – он является необратимым.
- Термодинамический процесс, который может протекать через одни и те же равновесные состояния как в прямом $A \rightarrow B$, так и в обратном $B \rightarrow A$ направлении, называется обратимым (рис. а). Процесс, в результате которого рабочее тело возвращается в исходное состояние, называется круговым процессом, или циклом. Обратимый цикл образуется только из обратимых процессов (рис.б).

Внутренняя энергия

- Внутренняя энергия системы включает в себя:
- 1) кинетическую энергию поступательного, вращательного и колебательного движения частиц;
- 2) потенциальную энергию взаимодействия частиц;
- 3) энергию электронных оболочек атомов;
- 4) внутриядерную энергию.
- В большинстве теплоэнергетических процессов две последние составляющие остаются неизменными. Поэтому в дальнейшем под внутренней энергией мы будем понимать энергию хаотического движения молекул и атомов, включающую энергию поступательного, вращательного и колебательного движений, как молекулярного, так внутримолекулярного, а также потенциальную энергию сил взаимодействия между молекулами. Кинетическая энергия молекул является однозначной функцией температуры, значение потенциальной энергии зависит от среднего расстояния между молекулами и, следовательно, от занимаемого газом объема V , т. е. является однозначной функцией V . Поэтому внутренняя энергия U есть некоторая однозначная функция состояния тела, любых двух независимых параметров, определяющих это состояние
- $U = f_1(p, V); U = f_2(p, T); U = f_3(V, T)$
- $u = U/m$ – удельная внутренняя энергия

Внутренняя энергия

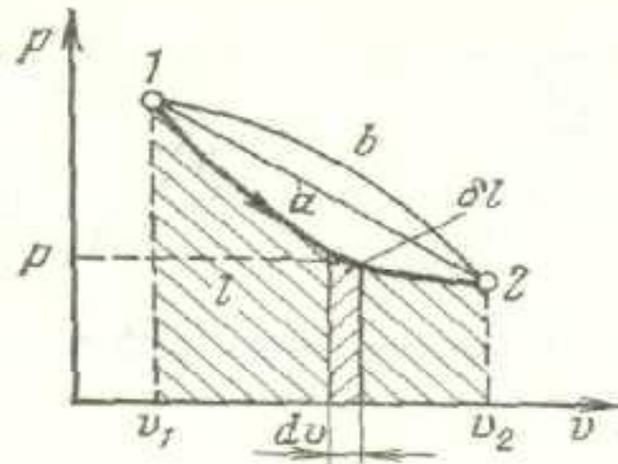
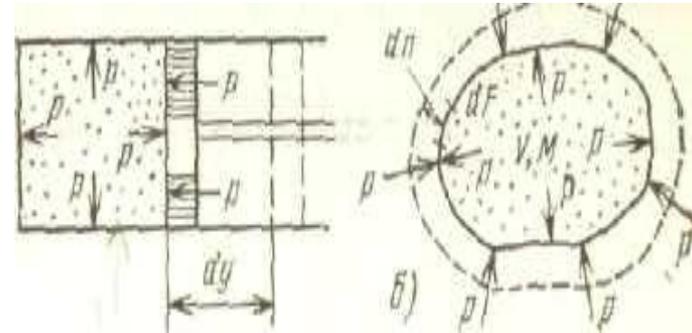
- Поскольку внутренняя энергия есть функция состояния тела, то ее изменение Δu в термодинамическом процессе не зависит от характера процесса, а определяется только начальным и конечным состояниями тела:
- $\Delta u = \int du = u_2 - u_1$,
- где u_1 - значение внутренней энергии в начальном состоянии, а u_2 - в конечном. Математически это означает, что бесконечно малое изменение внутренней энергии du есть полный дифференциал u .
- Внутренняя энергия идеального газа, в котором отсутствуют силы взаимодействия между молекулами не зависит от объема газа или давления, а определяется только его температурой.

Внутренняя энергия

- Для большинства задач технической термодинамики важно не абсолютное значение внутренней энергии, а ее изменение в различных термодинамических процессах. Поэтому начало отсчета внутренней энергии может быть выбрано произвольно. Например, внутреннюю энергию идеальных газов принято считать равной нулю при $t=0^{\circ}\text{C}$.

Работа расширения

- Работа в термодинамике, так же как и в механике, определяется произведением действующей на рабочее тело силы на путь ее действия.
- Рассмотрим газ, заключенный в цилиндре с подвижным поршнем площадью F (рис. а). Если газу сообщить некоторое количество теплоты, то он будет расширяться, совершая при этом работу против внешнего давления p , оказываемого на него поршнем. Газ действует на поршень с силой, равной pF , и совершает элементарную работу $\delta L = pFdy$, перемещая поршень на расстояние dy . Но Fdy представляет собой увеличение объема системы, следовательно, $\delta L = pdV$
- При конечном изменении объема
- $L = \int pdV$.
- Работа L против сил внешнего давления, связанная с увеличением объема системы, носит название
- работы расширения



Работа расширения

если $dV > 0$, то $L > 0$ - работа расширения положительна, т.е. рабочее тело совершает работу;

если $dV < 0$, то $L < 0$ – при сжатии работа тела отрицательна, т.е. не рабочее тело совершает работу, а на его сжатие затрачивается работа извне.

Единицей измерения работы является *Джоуль (Дж)*, а удельной работы *Дж/кг*.

- **К диаграмме p-v:** работа изменения объема эквивалентна площади под кривой процесса в диаграмме p-v.
- Каждому пути перехода системы из состояния 1 в состояние 2 (например, 1-2, 1-a-2 или 1-b-2) соответствует своя работа расширения. Следовательно, работа зависит от характера термодинамического процесса, а не является функцией состояния системы в отличие от давления, температуры и т. д.

Работа расширения

- С другой стороны, $\int p dV$ зависит от пути интегрирования, и, следовательно, элементарная работа δL не является полным дифференциалом и не может быть представлена соотношением, аналогичным изменению внутренней энергии dU .
- Работа всегда связана с перемещением макроскопических тел в пространстве, например перемещением поршня, деформацией оболочки, поэтому она характеризует упорядоченную (макрофизическую) форму передачи энергии от одного тела к другому и является мерой переданной энергии.
- Поскольку величина δL пропорциональна увеличению объема, то в качестве рабочих тел, предназначенных для преобразования тепловой энергии в механическую, целесообразно выбирать такие, которые допускают значительное увеличение объема. Этим качеством обладают газы и пары жидкостей. Поэтому, например, на тепловых электрических станциях рабочим телом служат пары воды, а в двигателях внутреннего сгорания — газообразные продукты сгорания того или иного топлива.

Теплота

- Помимо макрофизической формы передачи энергии - работы существует также и микрофизическая, т. е. осуществляемая на молекулярном уровне форма обмена энергией между системой и окружающей средой. В этом случае энергия может быть передана системе без совершения работы. Мерой количества переданной энергии служит теплота.
- Теплота может передаваться либо непосредственным контактом между телами (теплопроводностью, конвекцией), либо на расстоянии (излучением), причем во всех случаях этот процесс возможен только при наличии разности температур между телами.
- Как будет показано ниже, элементарное количество теплоты δQ , так же как и δL , не является полным дифференциалом в отличие от дифференциала внутренней энергии dU . **За этой математической символикой скрыт глубокий физический смысл различия понятий внутренней энергии, теплоты и работы:**
- Внутренняя энергия — это свойство самой системы, она характеризует состояние системы. Теплота и работа - это энергетические характеристики процессов механического и теплового взаимодействий системы с окружающей средой. Они характеризуют те количества энергии, которые переданы системе через ее границы в определенном процессе.

Теплота

- Теплота Q , как и работа, измеряется в Джоулях, удельная теплота q – в Дж/кг.
- Если теплота q к системе подводится, то она считается положительной: $q > 0$.
- Если теплота q от системы отводится, то она считается отрицательной: $q < 0$.
- Если теплообмен системы с окружающей средой отсутствует: $q = 0$.
- Процесс при отсутствии теплообмена называется адиабатным.

Аналитическое выражение первого закона термодинамики

- Первый закон термодинамики представляет собой частный случай всеобщего закона сохранения и превращения энергии применительно к тепловым явлениям.
- Закон сохранения и превращения энергии является фундаментальным законом природы, который получен на основе обобщения огромного количества экспериментальных данных и применим ко всем явлениям природы. Он утверждает, что энергия не исчезает и не возникает вновь, она лишь переходит из одной формы в другую, причем убыль энергии одного вида дает эквивалентное количество энергии другого вида.
- Пусть некоторому рабочему телу с объемом V и массой m , имеющему температуру T и давление p , сообщается извне бесконечно малое количество теплоты δQ . В результате подвода теплоты тело нагреется на dT и увеличится в объеме на dV .

Аналитическое выражение первого закона термодинамики

•Повышение температуры тела свидетельствует об увеличении кинетической энергии его частиц. Увеличение объема тела приводит к увеличению расстояния между молекулами. Так как между молекулами реального газа существуют силы взаимного притяжения, то это в свою очередь ведет к увеличению потенциальной энергии частиц. В результате внутренняя энергия тела увеличивается на dU . Поскольку рабочее тело окружено средой, которая оказывает на него давление, то при своем расширении оно производит механическую работу δL против сил внешнего давления. Так как никаких других изменений в системе не происходит, то по закону сохранения энергии

$$\delta Q = dU + \delta L$$

т. е. теплота, сообщаемая системе, идет на приращение ее внутренней энергии и на совершение внешней работы.

•Полученное уравнение является математическим выражением первого закона термодинамики. Каждый из трех членов этого соотношения может быть положительным, отрицательным и равным нулю.

Аналитическое выражение первого закона термодинамики

- Рассмотрим некоторые частные случаи.
- 1. **$\delta Q = 0$** -теплообмен системы с окружающей средой отсутствует, т. е. теплота к системе не подводится и от нее не отводится:
- **$\delta Q = dU + \delta L = 0$** , или **$\delta L = - dU$** .
- 2. **$\delta L = 0$** . **$\delta Q = dU$** . Такой процесс называется изохорным, т.е $V = \text{const}$.
- 3. **$dU = 0$** . **$\delta Q = \delta L$** . Внутренняя энергия не изменяется (**$U = \text{const}$** , **$T = \text{const}$**). Сообщаемая системе теплота переходит в эквивалентную ей внешнюю работу.

Аналитическое выражение первого закона термодинамики

- Проинтегрировав уравнение $\delta Q = dU + \delta L$ для некоторого термодинамического процесса, получим выражение первого закона термодинамики в интегральной форме: $Q = \Delta U + L,$
- где $\Delta U = U_2 - U_1.$
- Для системы, содержащей 1 кг рабочего тела:
 - $\delta q = du + \delta l;$
 - $q = \Delta u + l;$
 - $\Delta u = u_2 - u_1 .$

Теплоемкость газов

- Отношение количества теплоты, полученного телом при бесконечно малом изменении его состояния, к связанному с этим изменению температуры тела dT называется полной теплоемкостью тела в данном процессе:
- **$C = \delta Q / dT$.**
- Обычно величину теплоемкости относят к единице количества вещества и в зависимости от выбранной единицы различают массовую, объёмную и мольную теплоемкости:
- 1) **массовая** теплоёмкость c , отнесенная к 1 кг газа и измеряемая в Дж/(кг · К);
- 2) **объёмная** теплоемкость \hat{C} , отнесенная к количеству газа в 1 м³ объема при нормальных физических условиях, и измеряемая в Дж/(м³ · К);
- 3) **мольная** теплоемкость μc , отнесенная к одному киломолю и измеряемая в Дж/(кмоль · К).
- Зависимость между этими теплоемкостями устанавливается соотношениями:
- $c = \mu c / \mu$; $\hat{C} = \mu c / 22,4$; $\hat{C} = c \rho_H$.
- Здесь 22,4 м³ и ρ_H — объем одного киломоля и плотность газа при нормальных условиях.

Теплоемкость газов

- Изменение температуры тела при одном и том же количестве сообщаемой теплоты зависит от характера происходящего при этом процесса, поэтому теплоемкость является функцией процесса. Это означает, что одно и то же рабочее тело в зависимости от процесса требует для своего нагревания на один градус различного количества теплоты. Численно величина c изменяется в пределах от $-\infty$ до $+\infty$.
- В термодинамических расчетах большое значение имеют:
- теплоемкость при постоянном давлении
- $C_p = \delta q_p / dT$,
- равная отношению количества теплоты δq_p , сообщенной телу в процессе при постоянном давлении, к изменению температуры тела dT ;
- теплоемкость при постоянном объеме,
- $C_v = \delta q_v / dT$
- равная отношению количества теплоты δq_v , подведенной к телу в процессе при постоянном объеме, к изменению температуры тела dT . Соотношение между ними
- $C_p = C_v + R$; т.е. $C_p > C_v$ $C_p / C_v = k$, k — показатель адиабатного процесса

Энтальпия

- В термодинамике важную роль играет величина суммы внутренней энергии системы U и произведения давления системы p на величину объема системы V , называемая энтальпией и обозначаемая H :
- $H=U+pV$,
- Так как входящие в нее величины являются функциями состояния, то и сама энтальпия является функцией состояния и поэтому может быть представлена в виде функции двух любых параметров состояния:
- $H=f_1(p, V)$; $H=f_2(V, T)$; $H=f_3(p, T)$.

- Так же как внутренняя энергия, работа и теплота, энтальпия измеряется в Джоулях.
- Энтальпия обладает свойством аддитивности. Величина
- $h=u+pv$,
- называемая удельной энтальпией ($h=H/m$), представляет собой энтальпию системы, содержащей 1 кг вещества, и измеряется в Дж/кг.
- Поскольку энтальпия есть функция состояния, dH является полным дифференциалом, и, следовательно,

- изменение энтальпии в любом процессе
- $$\Delta H = \int_1^2 dH = H_2 - H_1.$$
- определяется только начальным и конечным состояниями тела и не зависит от характера процесса.
- Физический смысл энтальпии: энтальпия любой термодинамической системы представляет собой сумму внутренней энергии системы и потенциальной энергии источника внешнего давления, т.е. энтальпия – полный запас энергии.
- $H = U + pV$

Модуль 2. ТЕОРИЯ ТЕПЛООБМЕНА

- В теории теплообмена изучаются закономерности переноса теплоты из одной области пространства в другую. Процессы переноса теплоты представляют собой процессы обмена внутренней энергией между элементами рассматриваемой системы в форме теплоты.
- **Теплообмен** - самопроизвольный необратимый процесс переноса теплоты в пространстве с неоднородным распределением температуры.
- Теплообмен широко распространен в природе и технике. Существует три различных по своей природе элементарных вида теплообмена: теплопроводность, конвективный теплообмен и лучистый теплообмен.
- **Теплопроводность** - молекулярный перенос теплоты в сплошной среде, обусловленный наличием градиента температуры.
- Теплопроводность в чистом виде, как правило, встречается в твердых телах. Так, в диэлектриках перенос теплоты путем теплопроводности осуществляется путем распространения упругих волн колеблющихся атомов и молекул, в металлах он связан с перемещением свободных электронов и колебаниями атомов кристаллической решетки.

ТЕОРИЯ ТЕПЛООБМЕНА

- **Конвективный теплообмен** — перенос теплоты, обусловленный перемещением макроскопических элементов среды в пространстве, сопровождаемый теплопроводностью.
- Конвективный теплообмен может иметь место в движущихся средах (жидкостях и газах). При наличии разности температур в различных точках среды перемещение макрочастиц в процессе конвекции всегда сопровождается теплопроводностью.
Теплоотдача - конвективный теплообмен между движущейся средой и поверхностью ее раздела с другой средой (твердым телом, жидкостью или газом).
- Теплоотдача - наиболее распространенный случай конвективного теплообмена. Чаще всего конвективный теплообмен в процессе теплоотдачи осуществляется между движущейся средой и поверхностью обтекаемого средой твердого тела, например, процесс теплоотдачи при течении жидкости в трубах, внешнем обтекании тел газом. Процессы переноса теплоты путем теплопроводности и конвекции возможны только при наличии вещественной среды.

ТЕОРИЯ ТЕПЛООБМЕНА

- **Лучистый теплообмен** - теплообмен, обусловленный превращением внутренней энергии вещества в энергию электромагнитных волн, распространением их в пространстве и поглощением энергии этих волн веществом.
- Лучистый теплообмен между телами, в отличие от теплопроводности и конвекции, может осуществляться и при отсутствии промежуточной среды (в вакууме). Он обусловлен только температурой и оптическими свойствами тел, участвующих в теплообмене.
- В реальных условиях все три вида теплообмена, как правило, протекают одновременно, например, в процессе теплопередачи от одной жидкой или газообразной среды к другой через разделяющую их стенку. В общем случае процессы теплообмена могут сопровождаться фазовыми переходами, химическими реакциями и уносом массы,
- **Массообмен** - самопроизвольный необратимый процесс переноса массы данного компонента в пространстве с неоднородным полем концентрации (химического потенциала).

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

- **Массообмен** характерен для процессов теплообмена в многокомпонентных средах. Аналогично процессам переноса теплоты перенос вещества в смеси может быть обусловлен тепловым движением микрочастиц (диффузия) и движением макроскопических элементов среды (конвективный массообмен).
- В рабочих процессах, протекающих в тепловых двигателях, холодильных машинах, газовых турбинах, МГД-генераторах и других энергетических установках, процессы теплообмена играют определяющую роль
- **Теплопроводность**
- Аналитическая теория теплопроводности применима только к сплошной среде, поэтому при расчете процессов теплопроводности не учитывается дискретное строение тел, а принимается, что тела гомогенны и изотропны, а размеры их велики по сравнению с расстоянием между молекулами. Основной задачей теории теплопроводности является определение температурного поля в теле.
- *Температурное поле* - совокупность значений температуры во всех точках тела (или пространства) в некоторый фиксированный момент времени.
- Температурное поле может быть нестационарным и стационарным. В первом случае считается, что поле изменяется во времени, во втором - нет. В соответствии с этим и процесс теплопроводности считается стационарным или нестационарным.

- Поверхность, во всех точках которой температура одинакова, называется изотермической. Такие поверхности не пересекаются между собой. Они могут быть замкнутыми или кончатся на границах тела. Наиболее резкое изменение температуры в теле с неоднородным температурным полем наблюдается в направлении нормали к изотермической поверхности.
- *Градиент температуры* - вектор, численно равный производной от температуры по направлению нормали к изотермической поверхности:
- $|\text{grad } T| = \lim (\Delta T / \Delta n) = \partial T / \partial n. (1)$
- при $\Delta n \rightarrow 0$
- Градиент температуры направлен в сторону повышения температуры

- *Тепловой поток* - количество теплоты, переданное через произвольную поверхность в единицу времени.
- Тепловой поток, отнесенный к единице площади поверхности, называется плотностью q теплового потока.
- **Основной закон и уравнение теплопроводности**
- Опытным путем установлено, что плотность теплового потока, передаваемого теплопроводностью, прямо пропорциональна градиенту температуры:
- $$q = -\lambda \cdot \text{grad } T, (2)$$
- где λ - коэффициент теплопроводности, определяемый опытным путем и зависящий от агрегатного состояния вещества, температуры, давления, структуры, пористости и влажности. Знак минус указывает на то, что векторы q и $\text{grad } T$ имеют противоположное направление.
- Уравнение (2) является математическим выражением закона теплопроводности Фурье, а значение λ характеризует интенсивность процесса теплопроводности и численно равно плотности теплового потока при градиенте температуры, равном единице.

- **. Конвективный теплообмен. Процесс теплоотдачи**
- При неизотермическом движении среды процесс конвекции всегда сопровождается теплопроводностью, роль которой зависит от характера течения и свойств жидкости. Условимся в дальнейшем под жидкостью (средой) понимать не только капельную жидкость, но и газ. Процесс теплоотдачи может происходить при естественной (свободной) и вынужденной конвекции.
- *Естественная (свободная) конвенция* возникает под действием неоднородного поля внешних массовых сил (сил гравитационного, инерционного, магнитного или электрического полей), приложенных к частицам жидкости внутри системы.
- Естественная конвекция, например, воздуха в помещении сопровождается его нагревом от радиатора отопления.
- *Вынужденная конвекция* возникает под действием внешних поверхностных сил, приложенных на границах системы, или под действием однородного поля массовых сил, действующих в жидкости внутри системы. Вынужденная конвекция может осуществляться также за счет запаса кинетической энергии, полученной жидкостью вне рассматриваемой системы.

- **Уравнение конвективной теплоотдачи**
- **$Q = \alpha \cdot F \cdot (t_f - t_w)$,**
- α – коэффициент теплоотдачи, характеризует интенсивность теплоотдачи и численно равен количеству теплоты, передаваемой за одну секунду 1 м^2 площади поверхности теплообмена от горячего теплоносителя.
- Интенсивность теплоотдачи зависит от многих факторов и, в частности, от вида конвекции (свободная или вынужденная), т.е. скорости теплоносителя, режима течения жидкости (ламинарный или турбулентный), физических свойств среды (плотности ρ , теплопроводности λ , кинематической вязкости ν , массовой удельной теплоемкости c , а также от формы и размеров теплоотдающей или тепловоспринимающей поверхности обтекаемого средой

Лучистый теплообмен Основные понятия и определения

- Излучение представляет собой процесс распространения энергии в виде электронов, возбудителями которых являются заряженные элементарные частицы, входящие в состав вещества. Энергия излучения - это энергия фотонов или электромагнитных волн, излучаемых телом (или средой).
- Излучение обладает как волновыми, так и корпускулярными свойствами, которые не проявляются одновременно. Волновыми свойствами объясняется процесс распространения излучения в пространстве, корпускулярными - явления испускания, поглощения и отражения. Эти свойства описываются уравнениями электродинамики и квантовой механики. Излучение характеризуется длиной волны λ или частотой ν . Большая часть твердых и жидких тел (за исключением полированных металлов) излучает энергию во всем диапазоне длин волн. С энергетической точки зрения наиболее важная роль в лучистом теплообмене при умеренных температурах принадлежит инфракрасному излучению. Оно имеет одинаковую природу с другими видами излучения и соответствует диапазону длин волн $0,8 \cdot 10^{-6} < \lambda < 0,8 \cdot 10^{-3}$ м.

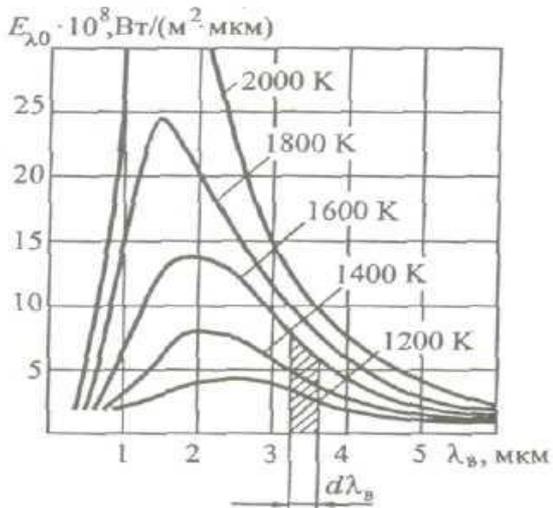
- Количество энергии, излучаемое телами, резко возрастает с повышением температуры, поэтому роль лучистого теплообмена особенно велика в процессах, протекающих при высоких температурах. Тепловое излучение определяется только температурой и оптическими свойствами излучающего тела.
- Между процессами теплопроводности и конвекции и лучистым теплообменом существует принципиальное различие. Теплообмен путем теплопроводности и конвекции связан с температурным полем в теле или среде. В процессах лучистого теплообмена наличие сплошной среды не обязательно.
- Электромагнитные волны, попадая на окружающие тела, частично поглощаются ими. При этом энергия излучения переходит во внутреннюю энергию поглощающего тела. Доля энергии A электромагнитных волн, поглощенная телом, называется поглощательной способностью тела, доля отраженной энергии R - отражательной способностью и доля энергии D , проходящая сквозь тело, - пропускательной его способностью. В соответствии с законом сохранения энергии $A + R + D = 1$. Тела, для которых $A = 1$, $R = D = 0$, называются абсолютно черными. В случае $D = 1$, $A = R = 0$ тела называются абсолютно проницаемыми или диатермичными (прозрачными). Можно считать, что для большей части твердых тел $D = 0$.

-

Излучение абсолютно черного тела

- *Плотность потока излучения* - количество энергии излучения, проходящее в единицу времени через единицу площади поверхности в пределах полусферического телесного угла.
- Плотность E потока излучения является интегральной характеристикой, относящейся ко всему диапазону длин волн.
- *Спектральная плотность потока излучения* - отношение плотности потока излучения, испускаемого в бесконечно малом интервале длин волн, к величине этого интервала.

- Закон Планка: Зависимость спектральной плотности потока излучения E_{λ_0} от длины волны λ_0 при различных температурах



- Закон смещения Вина устанавливает зависимость :

- $(\lambda_{\text{В}})_{\text{max}} \cdot T = 2,896 \cdot 10^{-3}, \text{ м} \cdot \text{К}$

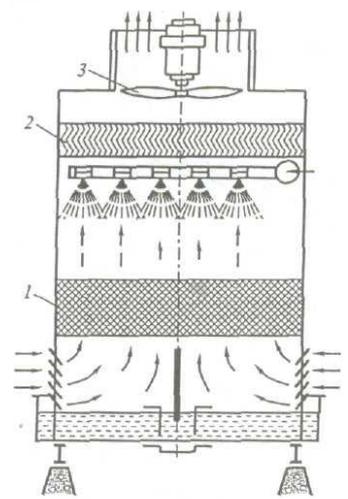
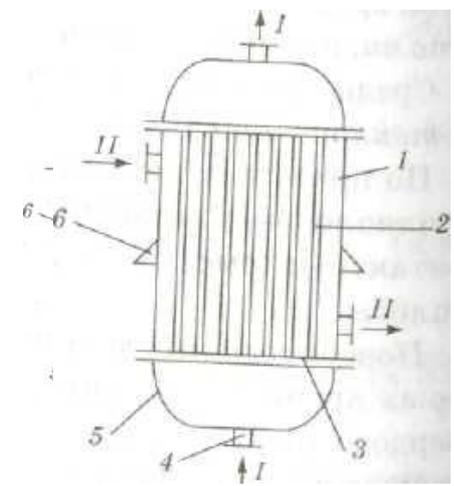
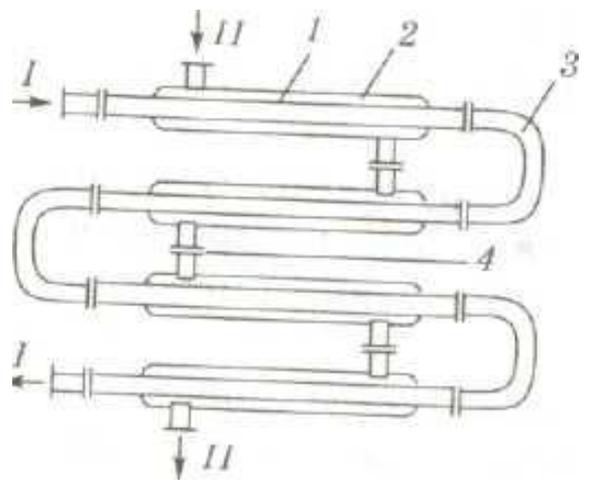
Закон Стефана-Больцмана

- *Закон Стефана-Больцмана:* плотность потока излучения абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры: $E_0 = \sigma_0 \cdot T^4$
- Реальные тела не являются абсолютно черными, однако многие из них можно приближенно считать серыми телами, спектр излучения которых непрерывен и подобен спектру излучения абсолютно черного тела. Для серых тел
- $$E = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4$$
- *Степень черноты тела* - отношение плотностей потоков излучения рассматриваемого и абсолютно черного тел при той же температуре. Степень черноты тела $\varepsilon = E/E_0$ определяется опытным путем и зависит от природы тела, его температуры и состояния поверхности ($0,01 < \varepsilon < 0,99$).

Теплообменные аппараты

- Устройства, предназначенные для передачи теплоты от одной среды к другой, называют теплообменными аппаратами (теплообменниками).
- Среда, участвующая в процессе теплообмена, называют теплоносителями.
- По принципу действия и конструктивному исполнению теплообменники подразделяются на поверхностные, контактные (смесительные) и с внутренним источником теплоты.
- Поверхностные теплообменники — устройства, в которых процесс передачи теплоты связан с поверхностью твердого тела, т. е. теплообмен от одной среды к другой происходит через разделительную стенку. Они, в свою очередь, разделяются на рекуперативные и регенеративные теплообменники.
- **Рекуперативные** теплообменники — такие устройства, где два теплоносителя с различными температурами текут в пространствах, разделенных твердой стенкой (калориферы, отопительные приборы, конденсаторы, парогенераторы).
- **Регенеративные теплообменники** — устройства, в которых одна и та же поверхность нагрева через определенные промежутки времени омывается в последовательной очередности горячей и холодной средой (воздухоподогреватели мартеновских и доменных печей). Передача теплоты осуществляется с помощью специального аккумулятора теплоты — насадки (керамических тел, металлической стружки, гофрированной ленты и т. д.).

- **Смесительные** теплообменники — устройства, в которых процесс тепломассообмена происходит при непосредственном соприкосновении и перемешивании теплоносителей (градирни, деаэраторы).
- Теплообменники с внутренними источниками теплоты — устройства с одним теплоносителем, в котором отводится теплота, выделенная в самом теплообменнике (электронагреватели, ядерные реакторы). Наиболее часто в практике встречаются **рекуперативные** теплообменники. Их простейшим представителем является теплообменник «труба в трубе», в котором один из теплоносителей проходит по внутренней трубе, второй — в кольцевом зазоре между трубами. Этот теплообменник применяют при небольших значениях передаваемого теплового потока q (местное горячее водоснабжение), так как в противном случае он становится громоздким и металлоемким.
- Другой наиболее распространенный тип рекуперативного теплообменника — кожухотрубный. Теплообменник представляет собой трубу большого диаметра (кожух 1), к торцам которого приварены диски с соосными отверстиями (трубные доски или решетки), в отверстия трубных решеток на всю длину кожуха вставлены трубы малого диаметра, приваренные или привальцованные к трубным решеткам. Каждая из трубных решеток закрыта снаружи крышкой. К кожуху и крышкам приварены штуцеры I и II для подачи и отвода теплоносителей, один из которых проходит по трубному пространству теплообменника (I), а другой — по межтрубному пространству (II).



Компактные теплообменные аппараты

- Для радиоэлектронной, вычислительной и криогенной техники, авиации и космонавтики характерно использование особого типа теплообменных аппаратов - компактных, таких как тепловые трубы, матричные, капельные (смесительные теплообменные аппараты (СМ ТОА) и струйно-капельные излучатели (СКИ)) и др.
- При их создании и расчете необходимо учитывать не только особенности, характерные для данного типа теплообменника, но и условия, в которых теплообменник работает. Так, например, особенностью расчета СМ ТОА является обязательное использование экспериментально получаемых обобщенных зависимостей, которые, однако, имеют ограниченное применение, поскольку один из главных параметров СМ ТОА - поверхность соприкосновения - не может быть точно определен.

Компактные теплообменные аппараты

- В этом отношении представляют интерес новые СМ ТООА, которые предлагается использовать в энергоустановках различного назначения.
- В качестве поверхности теплообмена в таких ТООА используются монодисперсные потоки капель, в которых капли должны иметь одинаковые размеры, скорости, интервал между каплями и они должны двигаться в одном направлении.
- Монодисперсность потока обеспечивает равномерность охлаждения потока капель и делает более простыми и предсказуемыми методы расчета капельных ТООА, но в то же время предъявляет более жесткие требования к конструкции генераторов капель таких теплообменников.

Компактные теплообменные аппараты

- В последние годы в мире достигнуты заметные успехи в исследовании и использовании диспергированного вещества в целях его получения в виде однородных по ряду параметров макрочастиц (параметры - размер, скорость, заряд и т. д.).
Монодисперсные потоки капель находят все большее применение в различных областях науки и техники: криогенная, химическая и медицинская промышленности - процессы гранулирования; струйная печать; ТОО; системы охлаждения космических летательных аппаратов и т. п.

Расчет теплообменных аппаратов

- *Прямоток, противоток и перекрестный ток* - три основные схемы движения теплоносителей в теплообменных аппаратах. Применяются также их комбинации.
- *Прямоток* - движение двух теплоносителей в теплообменном аппарате параллельно друг другу в одном и том же направлении.
- *Противоток* - движение двух теплоносителей в теплообменном аппарате параллельно друг другу в противоположных направлениях.
- *Перекрестный ток* - движение двух теплоносителей в теплообменном аппарате во взаимно перпендикулярных направлениях.
- Расчет теплообменных аппаратов обычно начинается с определения размеров необходимой поверхности теплообмена - **конструкторский расчет**.
- В том случае, когда размеры теплообменной поверхности заданы, целью расчета является определение конечной температуры теплоносителей – **поверочный расчет**.
- Оба расчета выполняются с помощью уравнений теплопередачи и теплового баланса:

- Уравнение теплопередачи $Q = k \cdot F \cdot \Delta T$,
- Уравнение теплового баланса $Q = c_{P1} \cdot G_1 \cdot (T_1' - T_1'') = c_{P2} \cdot G_2 \cdot (T_2'' - T_2')$
- Q - тепловой поток;
- k - коэффициент теплопередачи;
- F - площадь поверхности теплообмена;
- ΔT – среднелогарифмический температурный напор теплоносителей,
- c_P - изобарная массовая теплоемкость теплоносителей,
- G - массовый расход теплоносителя;
- T – температура теплоносителя,
- нижние индексы 1 и 2 относятся к значениям величин для горячего и холодного теплоносителей; верхний индекс ' и '' отмечает температуру со стороны входа (или выхода) в аппарат теплоносителя.
- Коэффициент теплопередачи равен

$$k = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2}$$

- Среднелогарифмический температурный напор

- $$\Delta T = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \Delta T_{\max} / \Delta T_{\min}},$$

- $$\ln \Delta T_{\max} / \Delta T_{\min}$$

- ΔT_{\max} – максимальный температурный напор теплоносителей

- ΔT_{\min} – минимальный температурный напор теплоносителей

- $\Delta T_{\text{прот}} > \Delta T_{\text{прям}}$

- Площадь теплообмена

- $$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta T} .$$

- $$k \cdot \Delta T$$

ТОПЛИВО И ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА

- Тепловая ценность топлива оценивается его теплотой сгорания, т.е. количеством теплоты, которое выделяется при полном сгорании 1 кг твердого или жидкого топлива или 1 куб.м газа (Q_n). Различают высшую и низшую теплоты сгорания топлива.
- 1. Твердые топлива : естественные - угли (антрацит, каменный и бурый угли), горючие сланцы, торф.
- Искусственные – кокс, полукокс, древесный уголь, отходы обогащения .
- Теплота сгорания условного эталонного топлива $Q_{\text{усл.эт.}} = 28,3$ МДж/кг или 1 усл.эт.единице.
- 2. Жидкие топлива естественное – нефть, искусственные - бензин, керосины, дизельное топливо, печное, мазут. Теплота сгорания в 1,3...1,5 раза больше $Q_{\text{усл.эт.}}$
- 3. Газообразное – природный, попутные нефтяные газы, сжатый природный, сжиженный (пропан-бутановые смеси), искусственное – генераторный, коксовый, газы сухой перегонки углей и др. $Q = 35...37$ МДж/м³ для природного и 85...95 МДж/м³ для сжиженных газов.
- Горючая часть топлив состоит из химических элементов: углерода С, водорода Н, серы S и кислорода О (в процентах).

Горение топлива

- *Горение* - химический процесс соединения топлива с окислителем, сопровождающийся интенсивным тепловыделением и резким повышением температуры продуктов сгорания.
- Различают гомогенное и гетерогенное горение. При гомогенном горении тепло и массообмен идут между веществами, находящимися в одинаковом агрегатном состоянии (газообразном).
- Гетерогенное горение свойственно жидкому и твердому топливам. Кинетика реакций горения у различных топлив разная. Скорость химической реакции зависит от концентрации реагирующих веществ, температуры и давления. Горение сопровождается смесеобразованием, диффузией, воспламенением, теплообменом и другими процессами, протекающими в условиях тесной взаимосвязи. Поэтому организация процесса горения в топочных устройствах требует изучения не только свойств топлива и кинетики реакций горения, но и особенностей всех физических процессов при горении.

Горение топлива

- $C + O_2 = CO_2 + 33900 \text{ кДж/кг}$,
- $2H_2 + O_2 = 2H_2O + 125600 \text{ кДж/кг}$,
- $S + O_2 = SO_2 + 10900 \text{ кДж/кг}$
- Количество воздуха, теоретически необходимого для сжигания 1кг топлива
- $2,67C + 8H + S - O$
- $L_T = \frac{\quad}{23}$, кг воздуха/кг топлива
- $\alpha = L_D / L_T$

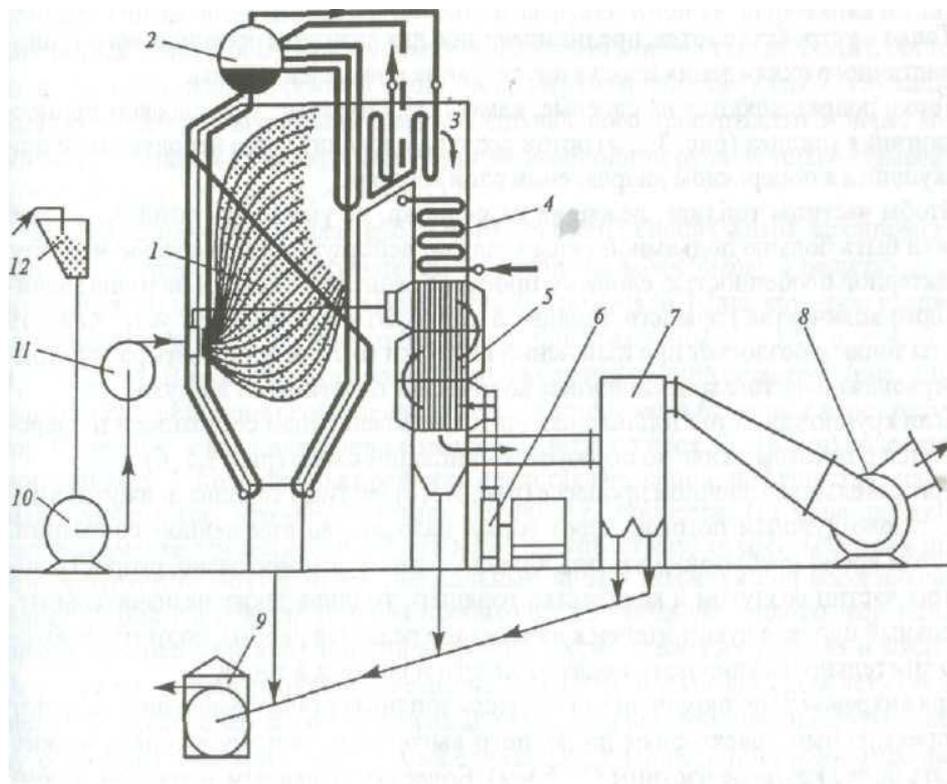
Котельные установки

- Котельная установка - совокупность котла и вспомогательного оборудования.
- Котел - конструктивно объединенный в одно целое комплекс устройств для получения пара или для нагрева воды с давлением выше атмосферного за счет теплоты сжигаемого топлива.
- Классификация котельных установок:
 - по производимому теплоносителю — *водогрейные и паровые;*
 - по роду сжигаемого топлива — *угольные, мазутные, газовые;*
 - по характеру удовлетворяемого теплоснабжения — *отопительные, производственные, производственно-отопительные, пиковые, энергетические.*
- При теплоснабжении сельского хозяйства широко используются котельные установки, вырабатывающие водяной пар, — паровые котлы, и подогревающие воду до определенной температуры — водогрейные котлы.

- Котлы подразделяют на паровые, водогрейные, пароводогрейные, котлы-утилизаторы, энерготехнологические и др.
- Основными параметрами паровых котлов являются: паропроизводительность, давление и температура пара, температура питательной воды, КПД.
- По паропроизводительности различают котельные установки:
 - малой мощности от 300 кг/ч до 12 т/ч,
 - средней до 100 т/ч,
 - высокой мощности свыше 100 т/ч.
- Котельные установки служат для покрытия расходов теплоты на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение, обеспечивают паром промышленные предприятия. Наиболее мощные стационарные котельные установки обеспечивают паром турбины электростанций.

Схема котельной установки

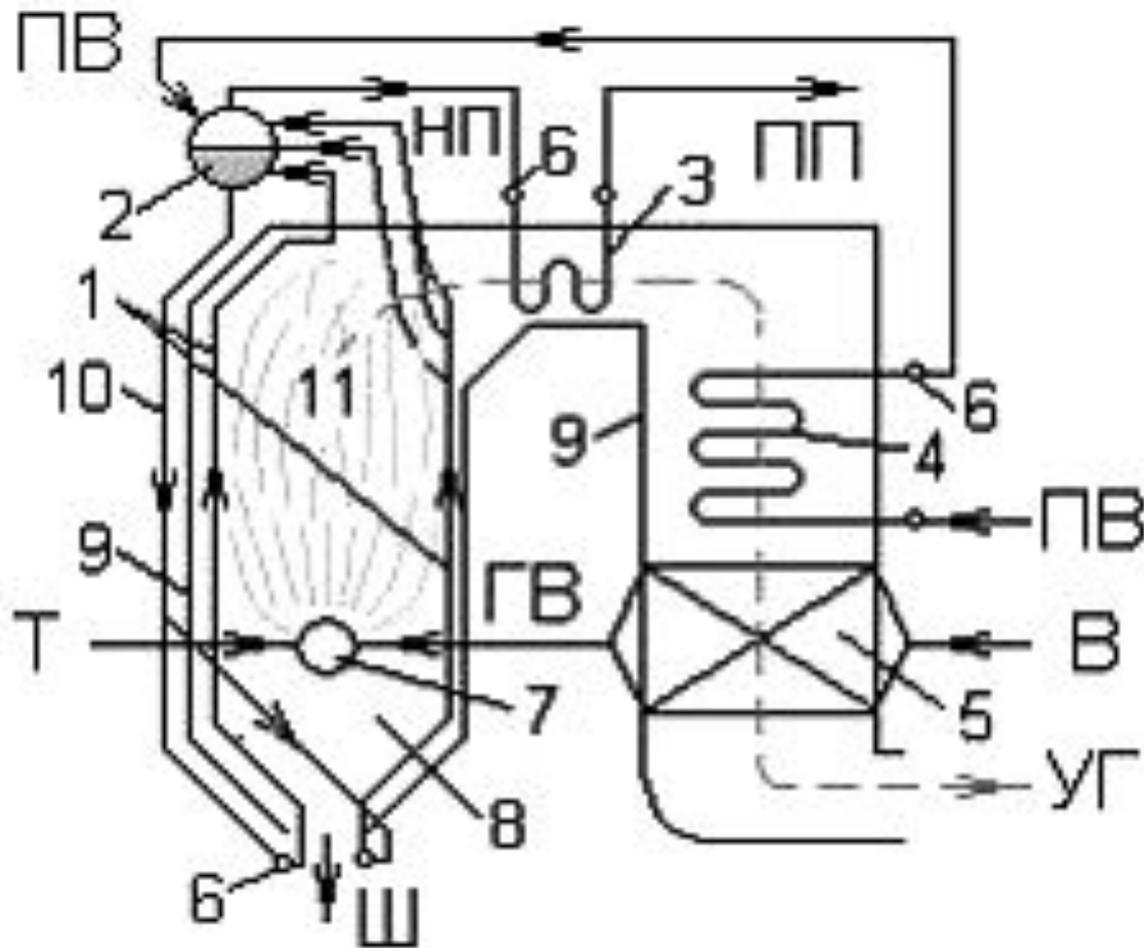
- 1 – топка котла, 2 - барабан котла, 3 – пароперегреватель,
- 4 – экономайзер, 5 – воздухоподогреватель, 6 – вентилятор, 7 – газоочистительное оборудование, 8 – дымосос, 9 – золоудаляющее устройство, 10- мельница, 11 – мельничный вентилятор, 12 – топливный бункер.



Котельная установка оборудуется насосами питательной воды, дымовой трубой, регулирующими запорными и предохранительными устройствами, системой автоматического регулирования.

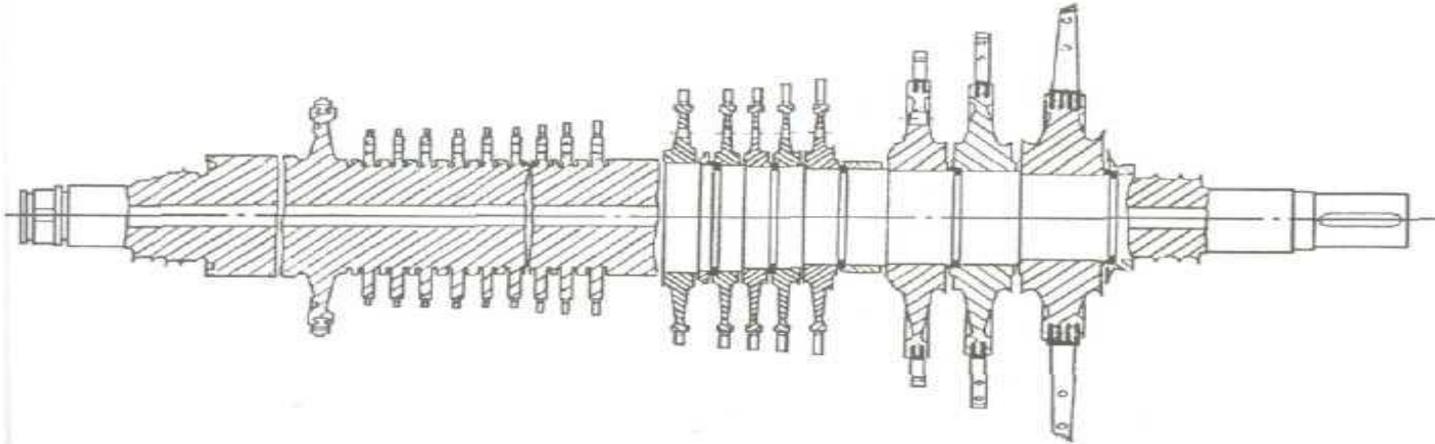
- Котельная установка, показанная на рис 3.4, предназначена для получения пара. В топке 1 котла происходит сжигание твердого топлива в факеле и образование высокотемпературных продуктов сгорания, которые отдают свою теплоту поверхностям нагрева. В воздухоподогревателе 5 нагревается воздух, подаваемый вентилятором 6 и направляемый затем в топку 1. В экономайзере 4 котла происходит подогрев питательной воды, поступающей в барабан 2. Из барабана вода подводится к парообразующим поверхностям нагрева, где преобразуется в насыщенный пар. Поверхности нагрева располагаются как по внутренним стенкам топки (экраны), так и в газоходах котла. Сухой насыщенный пар из барабана 2 поступает в пароперегреватель 3, где перегревается до температуры, превышающей температуру насыщения, соответствующую давлению в котле.

Вертикально-водотрубный барабанный паровой котёл с естественной циркуляцией



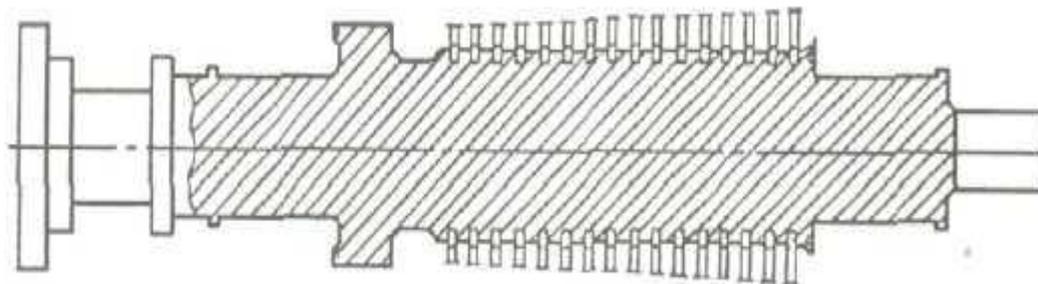
- *Паровые турбины.* На конструкцию паровой турбины влияют многие факторы:
- - назначение и тип турбины, ее мощность, параметры пара (до- и сверхкритические), наличие промежуточного перегрева пара до высокой (обычно до начальной) температуры, конечная влажность пара, режим работы (базовый, пиковый или полупиковый), требования к маневренности, к надежной и экономичной эксплуатации в резкопеременных режимах, особенности технологии изготовления.

Конструкция ротора дискового (комбинированного) типа паровой турбины



- Турбины по внутренним конструктивным признакам подразделяют на *активные* и *реактивные*. Для первых характерно наличие перегородок - диафрагм, в которых располагаются неподвижные сопловые лопатки, и наличие ротора, состоящего из скрепленных между собой дисков. Две соседние диафрагмы образуют камеру, в которой вращается диск с рабочими лопатками.

Конструкция ротора барабанного типа паровой турбины



- В реактивных паровых турбинах рабочие лопатки обычно закреплены на роторе барабанного типа, а сопловые лопатки - в корпусе (цилиндре) турбины или в обоймах, также размещаемых в корпусе.

Основные детали турбины

- **Цилиндр** имеет сложную форму, переменный по длине диаметр, горизонтальный, а иногда и вертикальный разъемы по соответствующим (горизонтальным и вертикальным) фланцам. В цилиндре закрепляют не только сопловые и направляющие аппараты, но и диафрагмы, обоймы диафрагм и другие элементы статора. Цилиндры имеют патрубки для промежуточных отборов пара, патрубки для подвода и отвода пара.
- Конденсационные турбины мощностью до 50 МВт, как правило, одноцилиндровые. Одноцилиндровыми могут быть также конденсационные турбины мощностью до 150 МВт, если они предназначены для работы в полупиковой части графика электрической нагрузки. С увеличением мощности турбины и повышением начальных параметров пара число цилиндров возрастает. Большинство паровых турбин большой мощности имеет до четырех цилиндров, а в некоторых турбинах, например К-1200-240 АО ЛМЗ (это наиболее мощная из всех турбин, выпускаемых отечественной промышленностью), число цилиндров достигает пяти.
- В зависимости от параметров пара на входе в цилиндр условно различают цилиндры высокого давления (ЦВД), цилиндры среднего давления (ЦСД) и цилиндры низкого давления (ЦНД).
- В одноцилиндровых турбинах ротор турбины подсоединяется к ротору электрогенератора обычно со стороны выхода пара из этого цилиндра. В многоцилиндровых одновальных турбинах цилиндры располагают последовательно по направлению течения пара и по мере снижения значений его параметров, т. е. сначала устанавливают ЦВД, затем ЦСД и один или несколько ЦНД, после чего располагают электрогенератор. Такая компоновка является типовой для всех отечественных паротурбинных установок.

- **Роторы** паровых турбин могут быть дисковыми или барабанными. Дисковая конструкция характерна для турбин активного типа, барабанная - реактивного. Конструктивно ротор может быть выполнен с насадными дисками, цельнокованным, сварным, сварно-кованным, а также комбинированным. Последние представляют собой сочетание частей ротора - цельнокованой и имеющей насадные диски Их применяют в турбинах, в которых в одном цилиндре температура пара изменяется в большом интервале. Барабанные роторы применяют в основном для ЦСД и для ЦВД тихоходных турбин. В ряде случаев их выполняют сварными, что позволяет уменьшить длины поковок.
- **Сопловые аппараты** регулирующих ступеней турбин имеют несколько сегментов сопел, к которым пар подается от разных регулирующих клапанов. Сегменты сопел могут прикрепляться к вставным сопловым коробкам или непосредственно к корпусу турбины. В последнем случае сопловые коробки выполняют совместно с цилиндром. Сопловые аппараты могут изготавливаться с наборными лопатками, сварными или литыми.
- **Диафрагмы** служат для разделения внутренней полости цилиндра на отсеки с различными параметрами пара. В каждой диафрагме размещают неподвижные сопловые лопатки, проходя между которыми поток ускоряется и приобретает необходимое направление для входа в каналы, образованные рабочими лопатками. Диафрагмы выполняют из двух половин, которые устанавливают соответственно в верхней и нижней частях цилиндра или в верхней и нижней частях промежуточной обоймы. На внутренней расточке диафрагмы размещают сегменты лабиринтных уплотнений для уменьшения протечек пара из одной ступени в другую вдоль ротора. Диафрагмы выполняют стальными или чугунными. Стальные диафрагмы устанавливают в зонах высоких температур пара, а чугунные - в зонах средних и низких температур.

- В паровых турбинах современных конструкций для ступеней, работающих при температурах выше 470...520 К, применяют диафрагмы сварной конструкции: сопловые лопатки, которые могут быть выполнены фрезерованием или из профильной светлокатаной полосы, приваривают к бандажам из листовой стали. Полученную решетку лопаток приваривают массивным сварным швом к телу и ободу диафрагмы.
- **Рабочие лопатки** турбинных ступеней располагают на роторе турбины. В ступенях активного типа каждую рабочую решетку составляют из рабочих лопаток, набранных на ободу ротора. В ободу диска выточен паз, в который по окружности заводят хвостовики рабочих лопаток. Профильная часть лопатки (перо) ограничена сверху ленточным бандажем, служащим для соединения по 5-10 лопаток в пакет.

Основные характеристики турбин

Параметры	Марка турбины и завод-изготовитель				
	К-200-130 АО ЛМЗ	К-300-240 АО ЛМЗ	К-500-240-2 АО ЛМЗ	К-800-240-2 АО ЛМЗ	К-1200-240 АО ЛМЗ
Номинальная мощность, МВт	210	300	500	800	1200
Число регенеративных отборов пара	7	8	9	8	9
Расход пара, кг/с	165	247	458	670	1018
Число ступеней: - ЦВД - ЦСД - ЦНД	12 11 4x2	12 12 5x3	10 11 5x4	11 9x2 6x6	8 82 5x6
КПД Установки, %	44,8	46,7	46,7	46,7	47,1
Длина последней лопатки, мм	765	960	1030	960	1200

Основные характеристики турбин

Параметры	Марка турбины и завод-изготовитель			
	Т-100-130, ПО УТМЗ	Р-100-130, ПО УТМЗ	Т-250/300-240, ПО УТМЗ	ПТ-135/165-13 0/15, ПО УТМЗ
Номинальная мощность, МВт	105	100	250	135
Тепловая нагрузка, ГДж/ч	-	-	1590	460
Число регенеративных отборов пара	7	3	8	8
Расход пара кг/с	127	251	265	208
Число ступеней:	9	13	12	13
- ЦВД	14	-	10+(6x2)	7
- ЦСД	2x2	-	3x2	5
- ЦНД				
Длина последней лопатки, мм	550	-	940	850

Основные типы электростанций

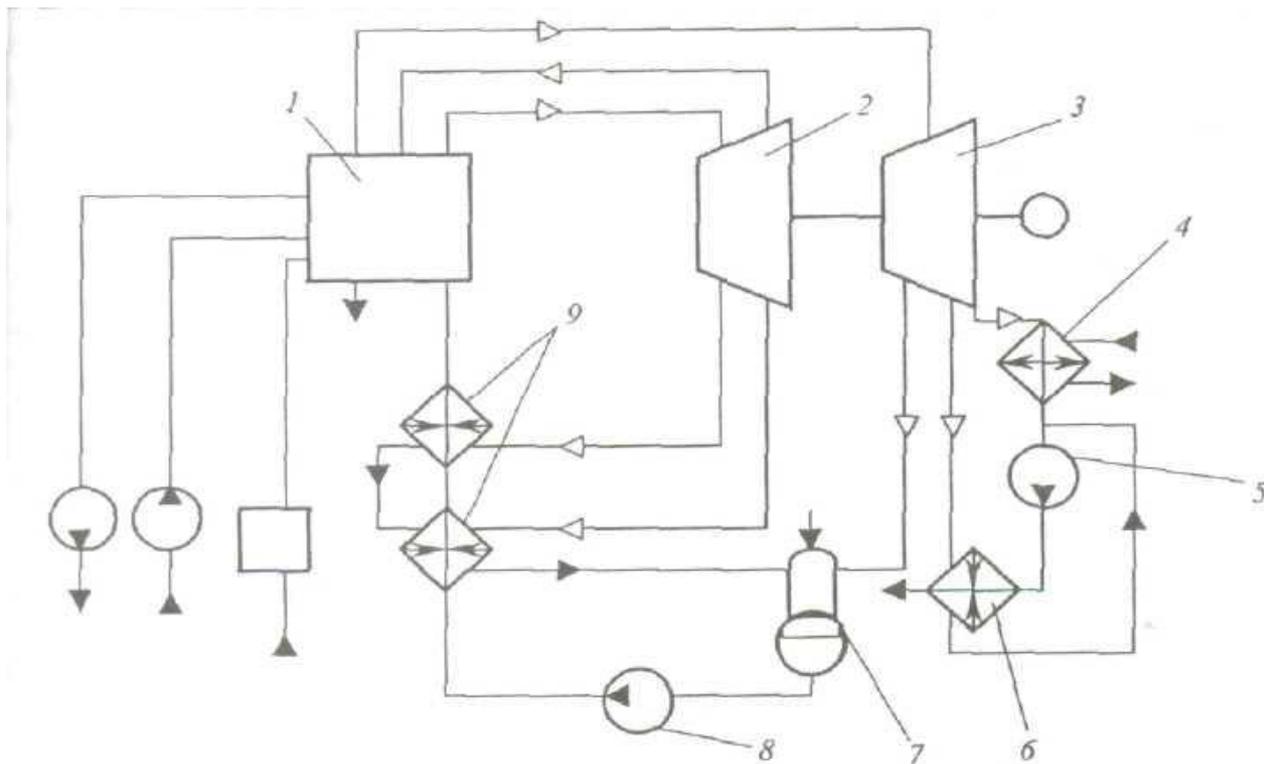
- Электрическая станция - предприятие или установка, вырабатывающая электроэнергию путем преобразования других видов энергии.
- Электрические станции вырабатывают электрическую и тепловую энергию для нужд народного хозяйства страны. В зависимости от источника энергии различают тепловые электростанции (ТЭС), гидроэлектрические станции (ГЭС), атомные электростанции (АЭС) и др. К ТЭС относятся конденсационные электростанции (КЭС) и теплоэлектроцентрали (ТЭЦ). В состав электростанций, обслуживающих крупные промышленные и жилые районы, как правило, входят КЭС, использующие органическое топливо и не вырабатывающие тепловой энергии наряду с электрической. ТЭЦ в отличие от КЭС наряду с электроэнергией производят горячую воду и пар для нужд теплофикации. АЭС преимущественно конденсационного типа используют энергию ядерного топлива.
- Одной из основных характеристик электростанций является установленная мощность, равная сумме номинальных мощностей электрогенераторов и теплофикационного оборудования. Номинальная мощность - это наибольшая мощность, при которой оборудование может работать длительное время в соответствии с техническими условиями.
- Электроэнергия, вырабатываемая электростанциями указанных типов, называемых иногда турбинными электростанциями, составляет примерно 98 % суммарной электроэнергии, производимой электростанциями страны. Остальная мощность обеспечивается электростанциями с дизельными и другими двигателями.

- ТЭС и АЭС входят в состав топливно-энергетического комплекса сложной многокомпонентной топливно-энергетической системы, состоящей из предприятий топливодобывающей, топливперерабатывающей промышленности, транспортных средств доставки топлива от места добычи потребителям, предприятий переработки топлива в удобный для использования вид, систем распределения энергии между потребителями, утилизации отходов используемого топлива.
- Топливные ресурсы страны расходуются потребителями после соответствующего преобразования в виде электроэнергии, высокопотенциальной (900...2100 К) теплоты для энергоемких процессов промышленности, горячей воды и пара для промышленной и бытовой теплофикации, а также в виде топлива для транспорта. Каждая из перечисленных форм потребления энергии требует приблизительно 1/4 добываемого первичного топлива.
- **Тепловая электростанция** преобразует химическую энергию топлива в электрическую энергию и теплоту. Технологический процесс преобразования энергии основного рабочего тела ТЭС осуществляется в теплоэнергетическом оборудовании, связанном между собой в соответствии с тепловой схемой. Все теплоэнергетическое оборудование ТЭС по отдельным стадиям технологического процесса подразделяют на котельную, паротурбинную и конденсационную установки, конденсатно-питательный и теплофикационный (для ТЭЦ) тракты. Тепловые схемы ТЭС непрерывно совершенствуются в целях повышения КПД и снижения удельного расхода топлива. Достигается это следующим образом:

- использованием высокой температуры (813...838 К) и соответствующего этой температуре оптимального давления (23,5 МПа) свежего пара. Дальнейшее повышение температуры ограничено не только условиями прочности материалов, но и началом термической диссоциации воды, приводящей к появлению в теплоносителе атомарных кислорода и водорода, вызывающих коррозию и охрупчивание сталей;
- применением оптимального по технико-экономическим показателям конечного давления пара (3...4 кПа) в паротурбинной установке. Уменьшение вакуума в конденсаторе приводит к росту термического КПД паротурбинной установки. Например, снижение давления от 4 до 3 кПа соответствует росту КПД примерно на 2 %. В то же время необходимое для снижения давления в конденсаторе увеличение кратности циркуляции приводит к росту поверхности конденсатора, мощности системы охлаждения. Поэтому оптимальное давление в конденсаторе находят в результате технико-экономического анализа. Кроме отмеченных факторов, в технико-экономическом анализе учитывают влияние давления в конденсаторе на работу последних ступеней турбины: увеличение удельного объема пара и связанную с этим необходимость в больших проходных сечениях (длинных лопатках) или возрастающие потери с выходной скоростью. Для мощных турбин ТЭС давление в конденсаторе выбирают не ниже 3,5 кПа;

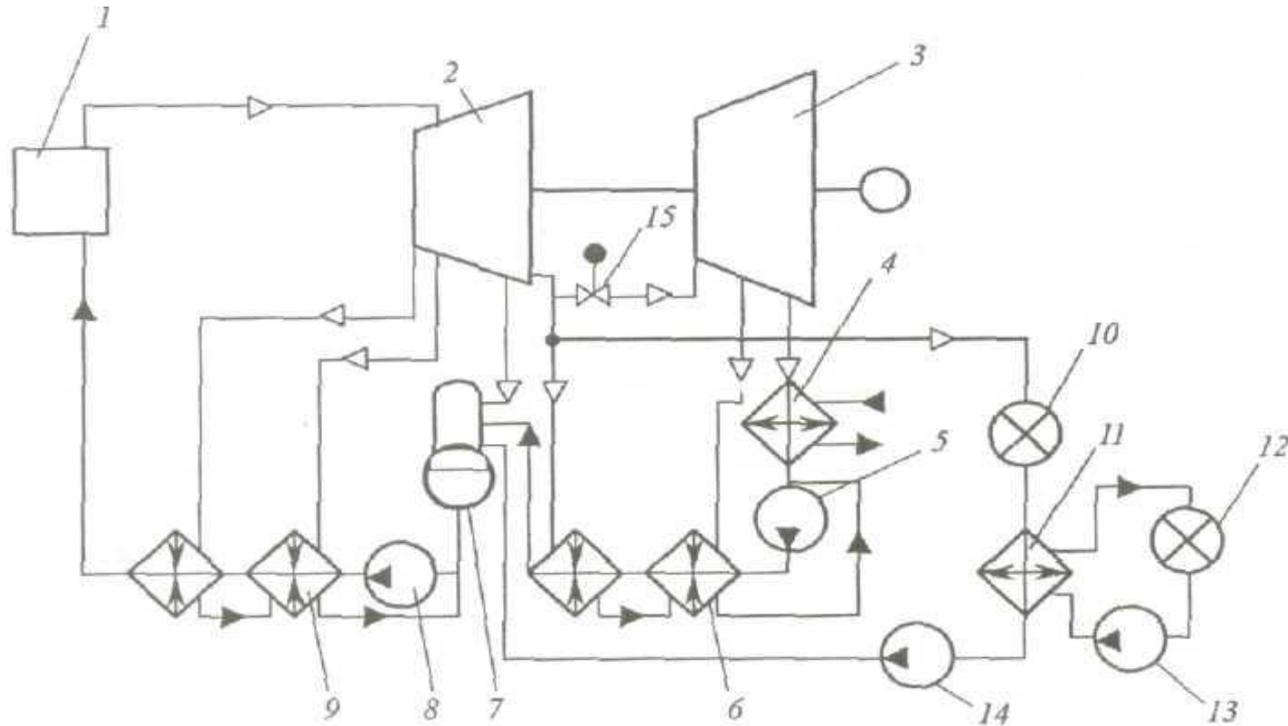
- использованием промежуточного перегрева пара оптимальных параметров повышают термическую экономичность цикла и уменьшают конечную влажность пара в последних ступенях паровой турбины. Температура промежуточного перегрева пара обычно принимается равной температуре перегрева свежего пара, а давление - 0,15...0,25 давления свежего пара;
- применением регенеративного подогрева питательной воды котла паром из отборов паротурбинной установки, что снижает расход пара и безвозвратные потери теплоты в конденсаторе;
- использованием оптимальных схем отпуска теплоты на теплофикацию.
- Принципиальная тепловая схема КЭС:
- Полученный в котле 1 свежий пар направляется в часть 2 турбины высокого давления, расширяется здесь и возвращается для перегрева в котел. Пар после промежуточного перегрева в котле 1 поступает в часть 3 турбины низкого давления, отработавший пар направляется в конденсатор 4. Из конденсатора конденсатным насосом 5 конденсат подается в регенеративный подогреватель низкого давления (ПНД) 6, а затем в деаэратор 7, который предназначен для дегазации воды и состоит из деаэратной колонки и питательного бака. Питательный насос 8 подает конденсат (питательную воду) в регенеративные подогреватели высокого давления (ПВД) 9 и котел 1. В подогреватели 6 и 9 пар для подогрева поступает из частей соответственно низкого и высокого давления турбины. Пар одного из отборов части 5 турбины низкого давления используется для термической деаэрации конденсата

Схема КЭС



- 1-парогенератор (паровой котел), 2 –ступень турбины высокого давления, 3- ступень турбины низкого давления, 4 –конденсатор,
- 5-конденсатный насос, 6-регенеративный подогреватель низкого давления, 7-деаэратор, 8- питательный насос, 9-регенеративные подогреватели высокого давления

Принципиальная схема ТЭЦ



- 1-парогенератор (паровой котел), 2 – ступень турбины высокого давления, 3- ступень турбины низкого давления, 4 – конденсатор, 5-конденсатный насос, 6-регенеративный подогреватель низкого давления, 7-деаэратор,
- 8- питательный насос, 9-регенеративные подогреватели высокого давления,
- 10- тепловой потребитель, 11- теплообменник-парообразователь,
- 12- удаленный потребитель, 13- теплофикационный насос, 14- дренажный насос, 15- регулирующий клапан

Экономичность КЭС и ТЭЦ

- КЭС $\eta_{эл} = 0,28 \dots 0,33$
- $\eta_{тепл} = \eta_{эл} = 0,28 \dots 0,33$
- ТЭЦ $\eta_{эл} = 0,26 \dots 0,3$
- $\eta_{тепл} = 0,6 \dots 0,65$

