

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)**

Кафедра электротехники и электроэнергетики

Методические указания к практическим работам
по дисциплине “Общая энергетика”.

Составитель
Д.П. Андрианов

Владимир 2014

УДК 621. 621.316

Методические указания к практическим работам студентов при изучении дисциплины «Общая энергетика» / «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ). Составитель Д.П. Андрианов. - Владимир, 2014, 52 с.

Методические указания составлены в соответствии с рабочей программой дисциплины «Общая энергетика» для подготовки бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электроснабжение».

Изложены указания к решению типовых задач по общей энергетике. Предназначены для студентов дневной и заочной форм обучения.

Илл.: 35.

Библиогр.: 5 назв.

1. Введение.

Дисциплина «Общая энергетика» занимает основное место среди дисциплин базовой части программы подготовки бакалавров направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электроснабжение», определяющих теоретический уровень профессиональной подготовки бакалавров.

Методические указания составлены для семи тем практических занятий

1. Основные определения термодинамики.
2. Термодинамические процессы.
3. Тепловые электрические станции.
4. Атомные электрические станции.
5. Анализ паросилового цикла Ренкина.
6. Термодинамические процессы в двигателях внутреннего сгорания.
7. Поршневые газовые машины. Двигатель Стирлинга.

и охватывают применение расчетных термодинамических методик применительно к энергетическим процессам. Трудоемкость практических занятий определяется требуемой степенью углубленности изучения тем и может составлять от 2 до 6 академических часов. Применение математических пакетов (Mathcad, MATLAB) к расчету термодинамических циклов и параметров процессов требует самостоятельного изучения со стороны студентов.

Практическое занятие № 1

1. Основные определения термодинамики.

Цель работы: Изучение основных параметров и состояний пара.

План проведения занятия:

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Решение примеров.
3. Ответы на контрольные вопросы.

Краткие теоретические сведения

В тепловых машинах процессы перехода теплоты в работу и работы в теплоту осуществляются посредством рабочего тела (обычно газ или водяной пар), изменяющего свое физическое состояние при сообщении теплоты или при силовом на него воздействии.

Величины, характеризующие физическое состояние тела, называются термодинамическими параметрами состояния тела, они определяются основными параметрами: удельным объемом, давлением и температурой.

Для каждого состояния тела параметры принимают вполне определенные значения, не зависящие от массы тела и обуславливаемые лишь его внутренними молекулярными особенностями — скоростью молекул и их взаимным расположением.

Удельный объем - объем единицы веса, обычно 1 кг вещества:

$$v = \frac{V}{G} \text{ м}^3 / \text{кг},$$

где V - полный объем тела;

G - вес.

Удельный вес - величина, обратная удельному объему, (вес единицы объема (1 м³):

$$\gamma = \frac{1}{v} = \frac{G}{V} \text{ кг} / \text{м}^3$$

Плотность - масса [единицы объема:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{G}{Vg} = \frac{\gamma}{g} = \frac{1}{vg}$$

Удельный объем, удельный вес и плотность взаимно определяют друг друга и каждый из них может служить одним из параметров тела.

Давление газа - результат воздействия (ударов) на окружающую оболочку молекул газа, находящихся в хаотическом непрерывном движении.

Давление газа (при его равновесном состоянии), действующее по нормали к стенкам оболочки, равно и противоположно по направлению внешнему давлению.

Термодинамическим параметром, определяющим состояние газа, является не полное давление газа на оболочку, а удельное, т. е. его давление в килограммах, приходящееся на единицу поверхности: 1 м² или 1 см².

Техническая атмосфера (ат) - давление газа, равное 1 кг/см².

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кг/см}^2 = 10\,000 \text{ кг/м}^2.$$

Физическая атмосфера - давление воздуха на уровне моря на 45° географической широты, соответствующее давлению, производимому ртутным столбом высотой 760 мм при температуре, равной 0°C.

$$1 \text{ физ. ат} = 1,0333 \text{ техн. ат} = 10333 \text{ кг/м}^2.$$

Сравнительно небольшие давления могут измеряться высотой столба жидкости. 1 физ. ат = 760 мм рт. ст. при 0° С.

$$1 \text{ техн. ат} = \frac{760}{1,0333} = 735,6 \text{ мм рт. ст. при } 0^\circ \text{С}.$$

Высота водяного столба при этих же условиях будет в 13,595 раза больше высоты ртутного столба (ртуть в 13,595 раза тяжелее воды).

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кг/см}^2 = 736 \text{ мм. рт. ст.} = 10 \text{ м вод. ст.}$$

В абсолютной системе CGS (сантиметр, грамм-масса, секунда) за единицу силы принята длина, площади - квадратный сантиметр и давления - 1 дин/см^2 .

Давление, равное 10^6 дин/см^2 , называется «бар».

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кг/см}^2 = 0,981 \text{ бар.}$$

Приборы для измерения давления — манометры (измерение давления больше атмосферного), вакуумметры (измерение давления меньше атмосферного) и барометры (измерение атмосферного давления). Манометры показывают избыток измеряемого давления (абсолютного p_a) над атмосферным (барометрическим p_b).

$$p_a = p_b + p_m$$

Абсолютное давление газа равно избыточному давлению (манометрическому), сложенному с барометрическим давлением.

Вакуумметры показывают избыток атмосферного (барометрического) давления над измеряемым абсолютным давлением.

$$p_a = p_b - p_v$$

т. е. в случае разрежения давление газа равно барометрическому давлению без вакуумметрического (p_v)

Во все термодинамические формулы вводится абсолютное давление газа.

При измерении давления в атмосферах применяются условные обозначения: *ата* — для абсолютного давления и *ати* — для избыточного. Например, манометр показывает 5 *ати*, полное давление газа будет 6 *ата*.

Влияние на высоту столба ртути температуры. При возрастании температуры увеличиваются объем, а следовательно, и высота столба ртути, соответствующая данному давлению. При вычислении по показанию барометра атмосферного давления высоту столба ртути барометра h приводят к высоте h_0 при 0°C :

$$h_0 = h (1 - 0,000172t).$$

Тогда атмосферное давление (ат) при $t^\circ\text{C}$ будет равно:

$$p = \frac{h_0}{735,6} = \frac{h(1 - 0,000172t)}{735,6}$$

Приведение высоты столба ртути барометра к 0°C можно проводить графическим методом по диаграммам.

Температура является мерой нагретости тел. Тела имеют одинаковую температуру, если между ними не существует теплообмена, т. е. если они находятся между собой в тепловом равновесии, при котором будут равны средние значения кинетической энергии поступательного движения их молекул. Если же тела не находятся в тепловом равновесии и между ними имеется теплообмен, то тело, отдающее теплоту другому телу, обладает большей температурой, большей кинетической энергией молекул. Таким образом, температура определяет направление теплового потока. Разность температур тел определяет меру их отклонения от теплового равновесия.

Эмпирическая температура - мера отклонения тела от состояния теплового равновесия с тающим льдом, находящимся под давлением в одну физическую атмосферу. За единицу температуры принят один градус, из условия, что температуре тающего под атмосферным давлением льда приписывается 0° , а температуре кипящей под атмосферным давлением воды — 100° .

Числовая величина температуры тела измеряется посредством термометров: ртутных, спиртовых и др. Для точных измерений температуры применяют газовые термометры. В технике пользуются также термометрами, действие которых основано не на свойстве расширения тел при нагревании (термоэлементы, термометры сопротивления и пр.).

Абсолютная температура - температура, пропорциональная средней кинетической энергии поступательного движения молекул тела. Абсолютная температура должна принимать значение, равное нулю при состоянии тела, при котором прекратилось бы тепловое движение его молекул. Эта предельная минимальная температура называется абсолютным нулем и является началом для отсчета температур.

Абсолютная температура отсчитывается от предельно низкой температуры — от абсолютного нуля и является всегда положительной величиной. Эмпирическая температура отсчитывается от некоторой произвольно выбранной начальной температуры — температуры таяния льда под атмосферным давлением — и поэтому может быть как положительной, так и отрицательной величиной. Введение абсолютной шкалы устраняет условность при оценке значения температуры и начала ее отсчета, неизбежные при измерении температуры по шкалам, построенным с использованием физических свойств тех или иных веществ.

Абсолютная температура тела может быть измерена посредством газового термометра. На основании закона Гей-Люссака можно показать, что постоянная точка идеального газового термометра, являющаяся началом отсчета температур, лежит на 273,16 °С ниже нуля стогоградусной шкалы. Шкала водородного термометра дает незначительное отклонение от шкалы идеального газа. Между абсолютной температурой тела ($T^{\circ}\text{К}$ или $T^{\circ}\text{абс}$) и температурой эмпирической ($t^{\circ}\text{С}$) имеется зависимость:

$$T = t + 273,16.$$

На основании второго закона термодинамики вводится так называемая *термодинамическая температура*, тождественная с абсолютной температурой

Пар - реальный газ со сравнительно высокой критической температурой, а также близкий к состоянию насыщения. За реальными газами с низкими критическими температурами сохраняется название газов вплоть до состояния насыщения.

Парообразование - процесс перехода жидкости в пар.

Испарение - парообразование, происходящее только с поверхности жидкости и при любой температуре. Интенсивность испарения зависит от природы жидкости и температуры. При испарении понижается температура жидкости, из нее вылетают молекулы, обладающие сравнительно большими скоростями, вследствие чего и уменьшается средняя скорость движения оставшихся в ней молекул. Испарение жидкости может быть полным, если над жидкостью находится неограниченное пространство.

Кипение – образование пузырьков пара у стенок сосуда и внутри жидкости. При сообщении жидкости теплоты увеличиваются ее температура и интенсивность испарения. При некоторой вполне определенной температуре, зависящей от природы жидкости и давления, под которым она находится, наступает парообразование во всей ее массе.

Конденсация - процесс превращения пара в жидкость, осуществляющийся при отнятии от него тепла и являющийся процессом, обратным парообразованию. **Конденсат** - жидкость, образующаяся при конденсации пара в паросиловых установках.

Возгонка, или сублимация - процесс перехода вещества из твердого состояния непосредственно в пар. **Десублимация** - процесс, обратный процессу сублимации, т. е. процесс перехода пара непосредственно в твердое состояние.

Насыщенный пар - пар, находящийся в равновесном состоянии с жидкостью, из которой он образуется. Насыщенный пар имеет температуру, являющуюся функцией его давления, равного давлению среды, в которой происходит процесс кипения. При увеличении объема насыщенного пара при постоянной температуре происходит переход некоторого количества жидкости в пар, при уменьшении же объема при постоянной температуре — переход пара в жидкость, но как в первом, так и во втором случаях давление пара остается постоянным.

Сухой насыщенный пар получается при испарении всей жидкости. Объем и температура сухого пара являются функциями давления. Состояние сухого пара определяется одним параметром (давлением или температурой).

Влажный насыщенный пар получается при неполном испарении жидкости, является смесью пара с мельчайшими капельками жидкости, распространенными равномерно во всей его массе и находящимися в нем во взвешенном состоянии.

Степень сухости - весовая доля пара во влажном паре (обозначается x).

Степень влажности - весовая доля жидкости (обозначается y). $y = 1 - x$

Для сухого пара $x=1$, а для воды $x=0$. В процессе парообразования степень сухости пара постепенно увеличивается от нуля до единицы. Состояние влажного пара определяется двумя параметрами, (давлением или температурой и степенью сухости).

Перегретый пар - пар, температура которого выше температуры насыщенного пара того же давления. Температура перегретого пара зависит от давления и объема.

Степень перегрева - разность между температурой перегретого пара и температурой насыщенного пара того же давления.

Так как удельный объем перегретого пара больше удельного объема насыщенного пара того же давления, то в единице объема перегретого пара содержится меньшее число молекул, чем в единице объема насыщенного пара. Вследствие этого перегретый пар является не насыщенным и обладает меньшей плотностью, чем соответствующий насыщенный пар.

Перегретые пары по своим физическим свойствам близки к газам и тем в большей мере, чем выше степень их перегрева. Состояние перегретого пара, так же как и газа, определяется двумя любыми независимыми параметрами (давлением и температурой).

На рис. 1.1 представлены кривые, которые устанавливают для некоторых веществ зависимость между давлением и температурой кипения. Приведенная диаграмма, построенная по экспериментальным данным, показывает, что температуры кипения различных веществ при одном и том же давлении значительно отличаются друг от друга.

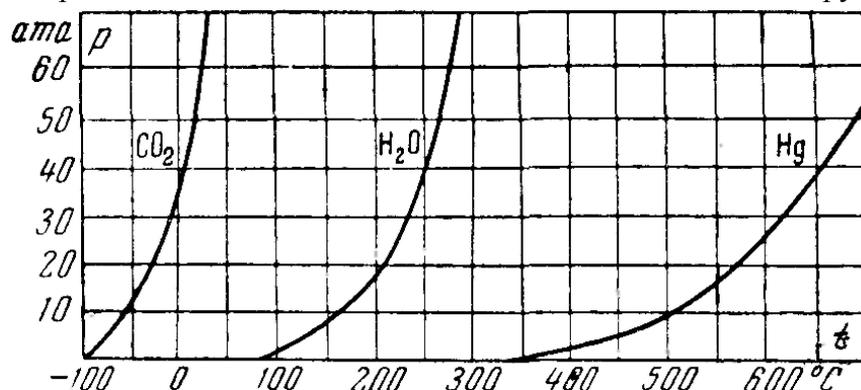


Рис. 1.1 Кривые зависимости между давлением и температурой кипения

Энтальпия (теплосодержание) - функция состояния тела, определяемого независимыми параметрами p и T - равна внутренней энергии тела, сложенной с работой, необходимой для ввода рассматриваемого тела с объемом v в окружающую его внешнюю среду, имеющую давление p и находящуюся с телом в равновесном состоянии

$$I = u + A p v$$

Потенциальная энергия давления среды - работа, отдаваемая среде. Энтальпия является суммой внутренней энергии тела и потенциальной энергии давления среды.

Энтропия - функция состояния тела, принимающая для каждого его состояния определенное значение. Для обратимых циклов справедливо:

$$\oint \frac{dq}{T} = 0,$$

т.е. подинтегральное выражение представляет собой функцию состояния тела.

Энтропия для 1 кг газа - s , измеряется в ккал/кг-град. Для произвольного количества газа энтропия - $S = Gs$, где G — вес газа, кг.

$$ds = \frac{dq}{T} \quad \text{и} \quad dS = \frac{dQ}{T} .$$

$$s = \varphi(p, v); \quad s = \varphi_1(v, T); \quad s = \varphi_2(p, T),$$

где p, v, T — независимые параметры, определяющие состояние тела.

Свойство энтропии состоит в том, что изменения величин состояния тела в процессе не зависят от его характера и полностью определяются крайними состояниями тела в процессе и изменения этих величин в циклах равны нулю.

Решение примеров.

Задача. Определить давление при заданной температуре кипения для различных веществ, согласно табл. 1.1, и рис. 1.1. (Необходимо определить давление в мм. рт. ст., избыточное давление в *ати*, и давление в $\text{кг}/\text{см}^2$, если $1 \text{ физ. ат} = 1,0333 \text{ кг}/\text{см}^2 = 760 \text{ мм. рт. ст.}$)

Таблица 1.1

Данные для определения давления

№ варианта	$t_{\text{кип}} \text{ } ^\circ\text{C}$	Вещество	№ варианта	$t_{\text{кип}} \text{ } ^\circ\text{C}$	Вещество
1	-90	CO ₂	16	210	H ₂ O
2	-80	CO ₂	17	230	H ₂ O
3	-70	CO ₂	18	250	H ₂ O
4	-50	CO ₂	19	270	H ₂ O
5	-30	CO ₂	20	280	H ₂ O
6	-10	CO ₂	21	370	Hg
7	0	CO ₂	22	390	Hg
8	10	CO ₂	23	410	Hg
9	20	CO ₂	24	430	Hg
10	30	CO ₂	25	450	Hg
11	110	H ₂ O	26	470	Hg
12	130	H ₂ O	27	490	Hg
13	150	H ₂ O	28	510	Hg
14	170	H ₂ O	29	530	Hg
15	190	H ₂ O	30	550	Hg

Контрольные вопросы

1. Что такое удельный объем, удельный вес, плотность?
2. Чему равна температура в $^\circ\text{K}$ 0°C ?
3. Дайте определения энтропии, энтальпии.
4. Дайте определения или опишите процесс: пара, парообразования, испарения, кипения, конденсации, возгонки, десублимации, насыщенного пара, сухого насыщенного пара, влажного насыщенного пара, перегретого пара.
5. В чем состоит различие между эмпирической и абсолютной температурами?
6. Какими приборами измеряются температура и давление?
7. В чем состоит различие между физической и технической атмосферами?
8. Как связаны между собой степень влажности и степень сухости пара?

Практическое занятие № 2

2. Термодинамические процессы.

Цель работы: Освоение методики расчетов параметров термодинамических процессов.

План проведения занятия:

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Решение примеров.
3. Ответы на контрольные вопросы.

Краткие теоретические сведения

Удельная теплоемкость c – количество теплоты q , которое требуется для изменения температуры единицы количества вещества на один градус:

$$c := \frac{q}{\Delta T} \quad c := \frac{dq}{dT}$$

В зависимости от способа измерения единицы количества вещества, характера термодинамического процесса и величины интервала температур различают несколько видов теплоемкостей.

1. В зависимости от единицы количества вещества – 1 кг, 1 м³, 1 кмоль теплоемкость бывает

массовой c [Дж/(кг К)]

объемной c' [Дж/(м³ К)]

молярной μc [Дж/(кмоль К)]

$$c = \frac{c'}{\rho_H} = \frac{\mu c}{\mu}$$

Количество теплоты

$$Q := m \cdot (T_2 - T_1) = c' V_H \cdot (T_2 - T_1) = \mu c \mu \cdot (T_2 - T_1)$$

где m – масса газа, V_H – объем газа, приведенный к нормальным физическим условиям, μ – число молей газа.

2. В зависимости от способа подвода теплоты теплоемкость бывает:

теплоемкость при постоянном давлении (изобарная) c_p ,

теплоемкость при постоянном объеме (изохорная) c_v .

$$\mu c_p - \mu c_v = \mu R = 8.3 \quad \text{кДж/кмоль К}$$

или

$$c_p - c_v = R$$

где R – газовая постоянная. Показатель адиабаты

$$k := \frac{c_p}{c_v}$$

3. В зависимости от интервала температур теплоемкость бывает:

истинная c – теплоемкость, соответствующая бесконечно малому интервалу температур, средняя c_m – теплоемкость, соответствующая конечному интервалу температур.

При практических расчетах пользуются табличными данными средних теплоемкостей в интервале температур от 0 до t °С. Количество теплоты, требующееся для нагрева 1 кг рабочего тела от 0 до t_1 или до t_2 :

$$q_1 = c_{m_0}^{t_1} (t_1 - 0) = c_{m_0}^{t_1} t_1;$$

$$q_2 = c_{m_0}^{t_2} (t_2 - 0) = c_{m_0}^{t_2} t_2,$$

где $c_{m_0}^{t_1}$ и $c_{m_0}^{t_2}$ - табличные значения теплоемкостей в интервалах температур (0.. t_1) и (0.. t_2).

4. Термодинамический процесс – последовательное изменение состояния рабочего тела в результате его энергетического взаимодействия с окружающей средой.

Равновесный процесс – тело последовательно проходит непрерывный ряд состояний равновесия.

Обратимый процесс – в окружающей среде не остается никаких изменений, а тело проходит через одни и те же равновесные состояния, как в прямом, так и в обратном направлении.

Виды процессов в технической термодинамике:

Изохорный – протекает при постоянном объеме,

Изобарный – протекает при постоянном давлении,

Изотермический – протекает при постоянной температуре,

Адиабатный – отсутствует теплообмен с окружающей средой,

Политропный – удовлетворяет уравнению $pV^n = \text{const}$.

При исследовании этих процессов определяют уравнение процесса в координатах p - V и T - s , связь между параметрами состояния газа, изменение внутренней энергии, величину внешней работы и количество подведенной теплоты на осуществление процесса или количество отведенной теплоты.

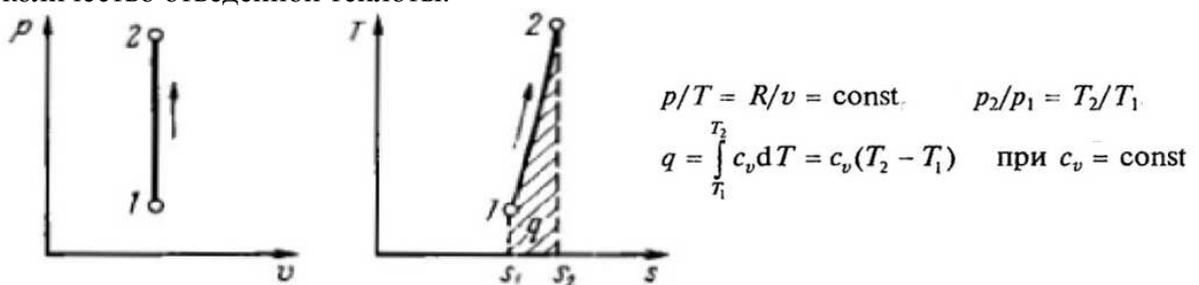


Рис.2.1 Изохорный процесс в p - V и T - s координатах

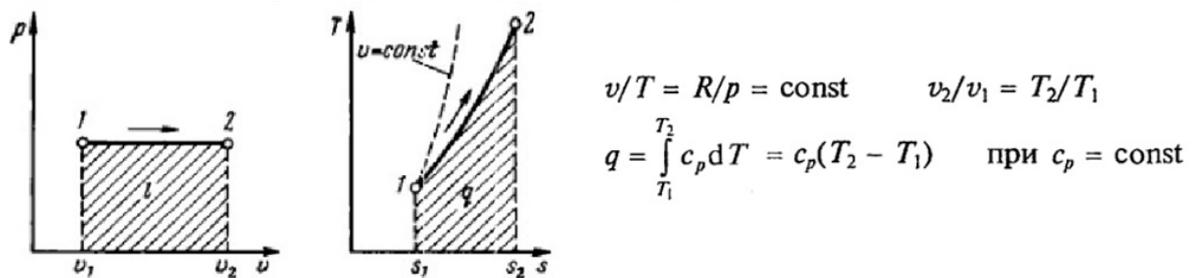


Рис. 2.2 Изобарный процесс в p - V и T - s координатах

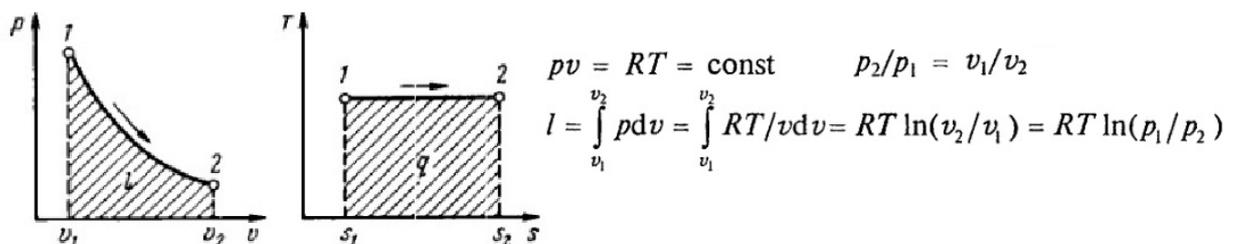


Рис. 2.3 Изотермический процесс в p - V и T - s координатах

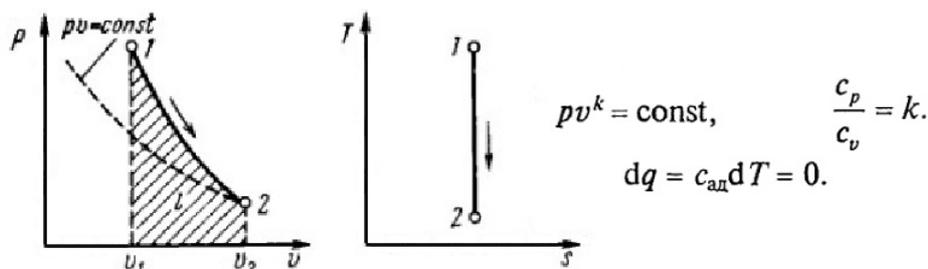


Рис. 2.4 Адиабатный процесс в p-V и T-s координатах

Политропный процесс имеет обобщающее значение – охватывает всю совокупность основных термодинамических процессов.

$$pV^n = \text{const}$$

Показатель политропы **n** может принимать любое численное значение в пределах от $-\infty$ до $+\infty$, но для данного процесса величина постоянная.

$$p_2/p_1 = (v_1/v_2)^n; \quad T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{n-1}; \quad T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{\frac{n-1}{n}}.$$

Термический КПД тепловой машины

$$\kappa = (Q_1 - Q_2)/Q_1$$

где **Q1** - теплота, переданная рабочему телу от теплоотдачика;

Q2 - теплота, отведенная от рабочего тела в теплоприемник.

В течение всего цикла рабочее тело совершает работу **A = Q1 - Q2**.

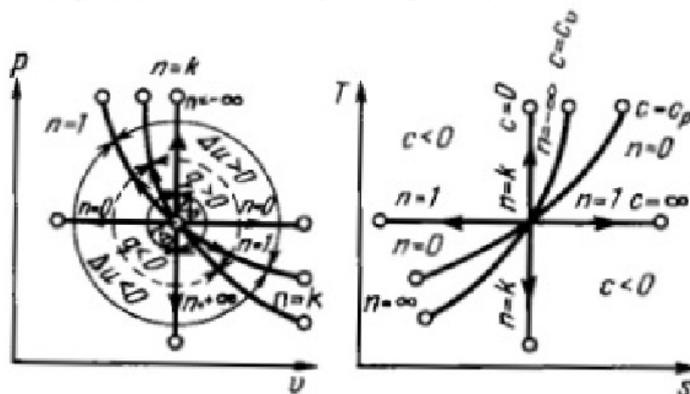


Рис. 2.5 Изображение основных термодинамических процессов идеального газа в p-V и T-s координатах.

Решение примеров.

1. Считая теплоёмкость идеального газа зависящей от температуры, определить: параметры газа в начальном и конечном состояниях, изменение внутренней энергии, теплоту, участвующую в процессе, работу расширения.

Вариант	Процесс	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	Газ	$p_1, \text{МПа}$	$m, \text{кг}$
0	Изохорный	2400	400	O ₂	1	2
1	Изобарный	2200	300	N ₂	4	5
2	Адиабатный	2000	300	H ₂	2	10
3	Изохорный	1800	500	N ₂	3	4
4	Изобарный	1600	400	CO	5	6
5	Адиабатный	1700	100	CO ₂	6	8
6	Изохорный	1900	200	N ₂	8	3
7	Изобарный	2100	500	H ₂	10	12
8	Адиабатный	2300	300	O ₂	12	7
9	Изобарный	1500	100	CO	7	9

2. Сжатие воздуха в компрессоре происходит: а) по изотерме, б) по адиабате. Известны расход G , начальное давление $P_1 = 100$ кПа, начальная температура t_1 °С, степень сжатия ϵ . (Таблица 2.1)

Определить для обоих вариантов величину теоретической работы сжатия, мощности компрессора, а также изменения внутренней энергии и энтропии при сжатии. Теплоемкость воздуха $C_v = f(t)$ считать постоянной.

Таблица 2.1

Последняя цифра шифра	ϵ	t_1 °С	Предпоследняя цифра шифра	G , кг/мин
0	4	5	0	20
1	4.5	10	1	23
2	4.8	15	2	25
3	5.0	20	3	27
4	5.5	25	4	30
5	6.0	10	5	32
6	6.5	30	6	35
7	7.0	18	7	38
8	7.5	23	8	40
9	8.0	27	9	45
10	7.5	5	0	20
11	7.0	10	1	23
12	6.5	15	2	25
13	6.0	20	3	27
14	5.5	25	4	30
15	5.0	10	5	32
16	4.8	30	6	35
17	4.5	18	7	38
18	4	23	8	40
19	3.5	27	9	45

Контрольные вопросы

1. В чем заключаются особенности адиабатного процесса?
2. В чем заключаются особенности политропного процесса?
3. В чем заключаются особенности изобарного процесса?
4. В чем заключаются особенности изотермного процесса?
5. В чем заключаются особенности изохорного процесса?
6. Какие виды теплоемкости применяются при расчетах теплопередачи?
7. Что учитывает средняя теплоемкость?
8. В чем заключаются особенности равновесного термодинамического процесса?
9. Как связаны между собой молярная и массовая теплоемкости?
10. Как определить газовую постоянную через теплоемкости?

Практическое занятие № 3

3. Тепловые электрические станции

Цель работы: Ознакомиться с принципом работы тепловых электрических станций.

План проведения занятия:

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Решение примеров.
3. Ответы на контрольные вопросы.

Краткие теоретические сведения

Электрическая станция — совокупность установок и оборудования, используемых для производства электрической энергии и теплоты, а также необходимые для этого сооружения и здания, расположенные на определенной территории. Наиболее распространены паротурбинные тепловые электрические станции (ТЭС), использующие теплоту, выделяемую при сжигании органического топлива. Электрическая энергия на таких станциях вырабатывается генератором с приводом от паротурбинной установки.

В зависимости от вида вырабатываемой энергии различают:

- конденсационные электрические станции (КЭС), предназначенные для производства только электрической энергии,
- теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), которые производят электрическую энергию и теплоту. На КЭС устанавливаются турбины с низким давлением в конце процесса расширения пара. При этом отработавший поток пара поступает в конденсатор, где охлаждается с потерей теплоты в окружающую среду. На ТЭЦ отработавший пар используют частично или полностью. В этом случае потери теплоты в окружающую среду сокращаются. В настоящее время мощность ТЭЦ составляет около 40% общей мощности ТЭС, а их доля в суммарной выработке электроэнергии достигает 35%.

По виду используемого топлива различают угольные, мазутные, газовые и газомазутные ТЭС. Все виды органического топлива являются невозобновляемыми источниками энергии, и поэтому по мере исчерпания их запасов и удорожания добычи и транспортировки топлива стоимость производимой на ТЭС электрической энергии и теплоты будет возрастать.

Оборудование электростанций, на которых сжигают органическое топливо, может быть приспособлено для сжигания твердого, жидкого или газообразного топлива. Обычно один вид топлива для данной электростанции является основным, а другой — резервным.

В соответствии с начальными параметрами пара различают ТЭС с давлением пара

- докритическим - для турбоагрегатов мощностью до 200 МВт (около 13 МПа),
- сверхкритическим - при мощности 250...300 МВт и выше (обычно 24 МПа).

По типу применяемого котельного агрегата различают

- барабанные котлы с естественной циркуляцией (докритическое давление пара)
- прямоточные котлы (с критическим и сверхкритическим давлением пара).

В соответствии с технологической структурой различают ТЭС

- блочные - каждая турбина снабжается паром только от «своего» котла.
- неблочные. - общие для всех котлов магистрали перегретого пара и питательной воды.

Технологическая схема производства электроэнергии на угольной ТЭС с паротурбинными установками (рис. 3.1). Уголь поступает со склада 4 в систему пылеприготовления 3, где он дробится, подсушивается и размалывается до пылевидного

состояния. Размолотое топливо поступает в горелки 5, в которых смешивается с воздухом и далее сгорает в топочной камере парового котла 6. Теплота, выделившаяся в топке, передается в поверхностях нагрева воде, которая превращается сначала в насыщенный, а затем в перегретый пар, энергией которого приводится во вращение ротор паровой турбины 13. В электрическом генераторе 14, соединенном с турбиной, вырабатывается электрическая энергия, которая после повышения напряжения в трансформаторе 15 направляется по линиям электропередачи 16 к потребителю.

Воздух, необходимый для процесса горения в топке, нагнетается дутьевым вентилятором 8 и подогревается теплотой дымовых газов в воздухоподогревателе 7. Продукты сгорания топлива, пройдя газовый тракт котла и отдав свою теплоту поверхностям нагрева, поступают в систему очистки дымовых газов 9, а затем дымососом 10 выбрасываются в дымовую трубу //и рассеиваются в атмосфере. Уловленная в системе очистки зола вместе со шлаком, выпадающим в топочной камере, направляется на золоотвал 12. Современные ТЭС проектируются с шлакоблочными заводами.

Пар, отработавший в турбине 13, конденсируется в конденсаторе 17 за счет отвода теплоты охлаждающей водой, перекачиваемой циркуляционным насосом 18 из охладителей /9, в качестве которых служат градирни, пруды-охладители или естественные водоемы (реки, озера, водохранилища). Конденсат откачивается из конденсатора насосом 21 и пропускается через систему подогревателей низкого давления 22, где нагревается паром, отбираемым из промежуточных ступеней турбины. Далее конденсат поступает в деаэрактор 23, в котором он освобождается от кислорода и углекислоты. Деаэрированная вода питательным насосом / через систему подогревателей высокого давления 2 подается в котел 6, в результате чего обеспечивается замкнутый цикл движения рабочего тела. Потери рабочего тела в цикле компенсируются очищенной в системе 20 подготовки добавочной водой.

Потребление электрической энергии.

Характерной особенностью электрических станций является строгое соответствие производства электрической энергии и теплоты ее потреблению. Поэтому для обеспечения надежной работы электростанции необходимо знать потребление энергии во времени, графическое изображение которого в плоской системе координат (рис. 3.2) называют *графиком нагрузки*. Различают суточные, месячные и годовые графики нагрузок.

Форму графика нагрузки в значительной степени определяет вид энергопотребления. Промышленное энергопотребление за счет одно- и двухсменных предприятий снижается ночью и частично в вечернее время. Коммунально-бытовое потребление энергии значительно утром и вечером, причем в вечернее время пик нагрузки более продолжителен. Интенсивность транспортных перевозок по городским электрическим магистралям имеет явно выраженный пиковый характер в утренние и предвечерние часы. Уличное освещение имеет максимум ночью, когда другие нагрузки незначительны по сравнению с дневными. Суточные графики сельскохозяйственного потребления энергии характеризуются относительно равной нагрузкой при сезонном изменении ее абсолютной величины. *График суточных* нагрузок получается почасовым сложением всех потребителей обслуживаемого района за типично летние (июнь) и зимние (декабрь) сутки. Зимний график (рис. 3.2, а) имеет два пика, летний (рис. 3.2, б) - три. Летние нагрузки меньше по абсолютной величине.

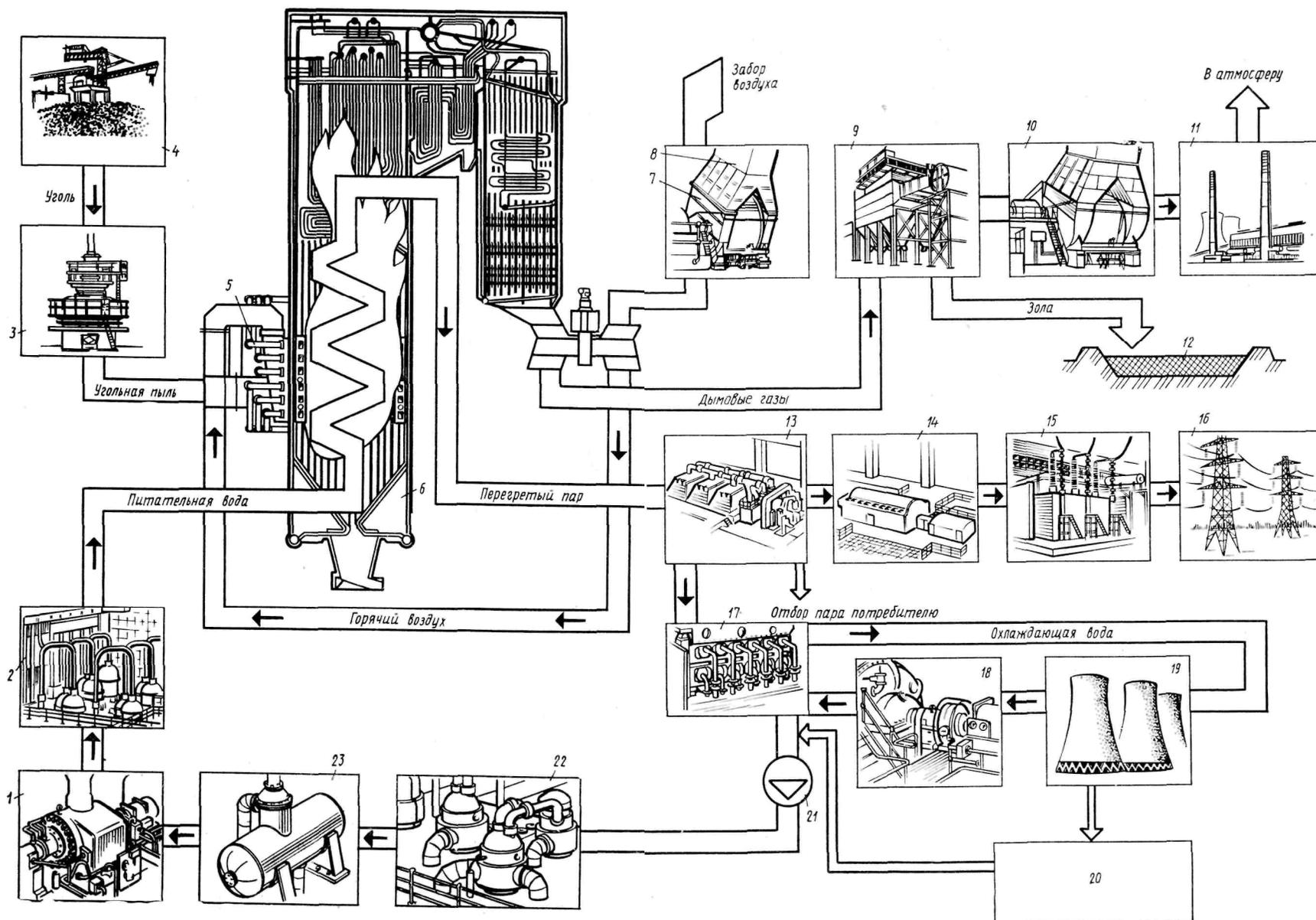


Рис. 3.1 Технологическая схема производства энергии на ТЭС

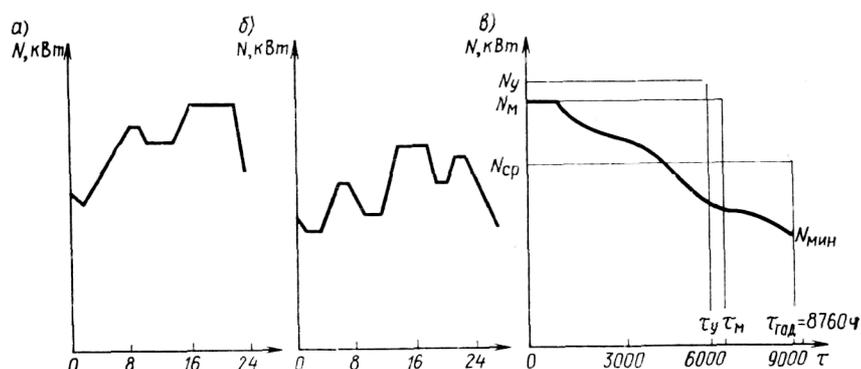


Рис. 3.2. Графики нагрузок электростанции в течение зимних (а) и летних (б) суток и года (в)

В *годовом графике* нагрузок (рис. 3.2, в) по оси абсцисс откладывается продолжительность нагрузки t в часах за год ($\tau_{\text{год}} = 8760$ ч), а по оси ординат — нагрузка N , кВт. Продолжительность в течение года какой-либо нагрузки определяют суммированием ее длительности за 210 зимних суток и 155 летних суток (для широты Москвы). Площадь под кривой графика годовой продолжительности определяет суммарную годовую потребность в электроэнергии $W_{\text{э}}$. Если эту площадь представить прямоугольником со стороной $\tau_{\text{год}} = 8760$ ч, то другая сторона даст *среднюю годовую нагрузку* $N_{\text{ср}}$, кВт. Если при таком представлении за сторону прямоугольника взять максимально требуемую мощность $N_{\text{м}}$, то его другая сторона будет эквивалентна числу часов $\tau_{\text{м}}$ использования в год максимальной мощности. С учетом изложенного потребность в электроэнергии определяется выражением:

$$W_{\text{э}} = \int_{\tau=0}^{\tau_{\text{год}}} N d\tau = N_{\text{ср}} 8760 = N_{\text{м}} \tau_{\text{м}}.$$

Годовой график месячных максимумов (рис. 3.3) имеет седлообразный характер со значительным снижением абсолютных величин нагрузок в летние месяцы. Образующаяся разность между установленной мощностью $N_{\text{у}}$ электростанции и требуемой текущей величиной нагрузки используется для вывода части оборудования в ремонт.

Отношение количества выработанной электроэнергии за год $W_{\text{э}}$ к установленной мощности электростанции $N_{\text{у}}$ называют *числом часов использования установленной мощности* $\tau_{\text{у}}$ (рис. 3.2, в), а отношение $\tau_{\text{у}}/\tau_{\text{год}}$ — *коэффициентом использования установленной мощности* $k_{\text{и}}$.

$$\tau_{\text{у}} = W_{\text{э}}/N_{\text{у}}; \quad k_{\text{и}} = \tau_{\text{у}}/8760 = N_{\text{ср}}/N_{\text{у}}.$$

Для обеспечения необходимой надежности в энергоснабжении установленная мощность электростанции $N_{\text{у}}$ должна превышать максимальную мощность $N_{\text{м}}$, требуемую потребителем, на величину резерва. Отношение $k_{\text{р}} = N_{\text{у}}/N_{\text{м}}$ называют коэффициентом резерва. Он характеризует установленную на электростанции избыточную мощность и играет важную роль при экономическом анализе энергопроизводства.

Различают горячий (вращающийся), холодный и ремонтный резервы. Под *горячим* резервом понимают запас мощности, который можно реализовать, подгрузив или перегрузив в разрешенных пределах работающее оборудование. *Холодный* резерв составляет мощность имеющихся на электростанции и готовых к работе агрегатов, для запуска которых требуется определенное время. Ремонтный резерв составляют агрегаты, работающие вместо выведенного в плановый ремонт оборудования.

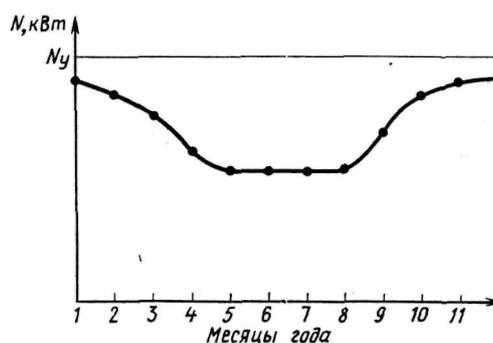


Рис. 3.3. Годовой график месячных максимумов

Невозможность хранения электрической энергии определяет непрерывное равенство ее выработки и потребления. Для покрытия плановой нагрузки потребителей составляются графики работы электростанций. Если электростанция работает в энергетической системе, то ее электрическая нагрузка определяется графиком, задаваемым этой системой. Большинство энергосистем состоит из разнотипных агрегатов. Для каждого значения суммарной мощности, потребляемой в энергосистеме, существует оптимальное распределение нагрузки между агрегатами, обеспечивающее наивысшую экономичность выработки электроэнергии. Возникающие неплановые отклонения нагрузок распределяются между электростанциями и отдельными агрегатами. Таким образом, плановые и неплановые изменения нагрузки потребителей вызывают работу значительной части энергетического оборудования в переменных режимах, включающих работу на пониженных нагрузках, полный останов в ночные часы, перегрузку в периоды максимального потребления и др. Одним из путей повышения экономичности выработки электроэнергии при переменных нагрузках является использование высокоманевренного оборудования.

Под *маневренностью ТЭС* понимают способность поддерживать и выполнять график электрической нагрузки. Маневренность включает в себя следующую совокупность технико-экономических характеристик оборудования: скорость изменения нагрузки, диапазон изменения мощности, способность быстрого пуска и останова, приемлемую экономичность работы при частичных нагрузках.

Допустимые скорости изменения нагрузки зависят от изменения температурного режима отдельных элементов и деталей оборудования и возникающих в связи с этим температурных напряжений, которые, действуя совместно со статическими напряжениями, не должны превышать допустимых значений. Скорость нагружения энергоблока определяется как турбиной, так и котлом, а турбины — в основном способом регулирования ее мощности. Допустимая скорость изменения нагрузки котла зависит от его типа.

Диапазон изменения нагрузки характеризуется минимальной нагрузкой энергоблока, которая определяется в основном котлом и зависит от его типа, конструкции топки, вида сжигаемого топлива. Барабанные котлы на газе или мазуте допускают снижение нагрузки до 20% от номинальной, а прямоточные — до 40...50%.

При частичных нагрузках в диапазоне 50...100% от номинальной экономичность энергоблока снижается в основном из-за уменьшения КПД турбоустановки. При снижении нагрузки менее 50% от номинальной существенно уменьшается КПД котла и относительно возрастает расход электроэнергии на собственные нужды.

Основными пусковыми характеристиками оборудования являются продолжительность пуска и расход топлива на пуск. Они зависят от пусковой схемы, исходного теплового состояния оборудования и его конструкции, параметров пара, способов пуска и останова. Расход топлива на пуск, например блока 300 МВт, может достигнуть 120...150 т.

В каждом графике нагрузки различают базовую, полупиковую (слабопеременную) и пиковую (резкопеременную) части. В *базовой части графика* нагрузки работают наиболее экономичные ТЭС, АЭС и ГЭС в период сброса паводковых вод. Для этих электростанций использование максимума нагрузки составляет 6000... 7500 ч в год. Для агрегатов, покрывающих слабопеременную и пиковую части нагрузки, это число составляет соответственно 2000 ... 6000 и 500 ... 2000 ч в год. Причем слабопеременная и пиковая части нагрузки с развитием электроснабжения увеличивают свой удельный вес, а отношение минимальной нагрузки N_{min} к максимальной N_m (рис. 3.2, в) имеет тенденцию к снижению. В связи с этим возникла необходимость перевода в полупиковый режим существующих КЭС и ТЭЦ, ранее работавших в базовой части. Но эти станки не в состоянии обеспечить полностью покрытие переменного графика электрической нагрузки, и поэтому разработаны и вводятся в эксплуатацию специальные *полупиковые* и *пиковые* агрегаты, обладающие высокими маневренными характеристиками и способные поддерживать и выполнять любые графики нагрузок. Кроме того, используются другие способы покрытия пиков электрических нагрузок: использование резерва мощности и временных перегрузок паротурбинных блоков, работающих в режимах частых пусков и остановов; использование ГЭС; применения гидроаккумулирующих станций и др.

Тепловая схема ТЭС на органическом топливе.

Различают полную и принципиальную тепловую схему ТЭС. Полная тепловая схема включает все имеющееся оборудование, соединяющее его линии и арматуру. Принципиальной тепловой схемой ТЭС называют схематическое изображение совокупности основного теплового оборудования (паровые котлы, турбины, конденсаторы, теплообменники и др.), соединенного трубопроводами, транспортирующие основные потоки теплоносителей (пара и воды). В этой схеме не изображается резервное и однотипное оборудование, дублирующие линии, вспомогательное оборудование, трубопроводы, арматуру.

В качестве примера рассмотрим принципиальную тепловую схему конденсационной электростанции с мощным энергетическим блоком, состоящим из прямоточного парового котла 1 (рис. 3.4) и пятицилиндровой турбины 3 + 4 + 5 + 6, механически связанной с генератором 7. После пароперегревателя котла 2 свежий пар поступает во внутренний корпус 3 цилиндра высокого давления (ЦВД), где срабатывается часть теплоперепада, а затем переходит во внешний корпус ЦВД 4, в котором происходит его дальнейшее расширение. После подогрева в промежуточном подогревателе 3 пар направляется в двухпоточный цилиндр среднего давления

(ЦСД) 5, затем — в три двухпоточных цилиндра низкого давления (ЦНД) 6. После расширения в проточной части турбины пар поступает в конденсатор 8, где за счет охлаждения циркуляционной (охлаждающей) водой 9, превращается в жидкость-конденсат, который насосами 10 прокачивается через обессоливающую установку 11 и далее насосом 12 через теплообменники 13...15 и 17... 19 подается в деаэратор 20. Жидкость, протекающую на участке от конденсатора до деаэратора, принято называть конденсатом, а после удаления из нее агрессивных газов на участке от деаэратора до котла — питательной водой.

Питательная вода насосом 21 через регенеративные подогреватели высокого давления 25...27 подается в котел 1. Питательный насос 21 приводится в действие вспомогательной турбиной 22 со сбросом отработавшего пара в собственный конденсатор 23. Конденсат специальным насосом 24 подается во всасывающую линию конденсатного насоса 10.

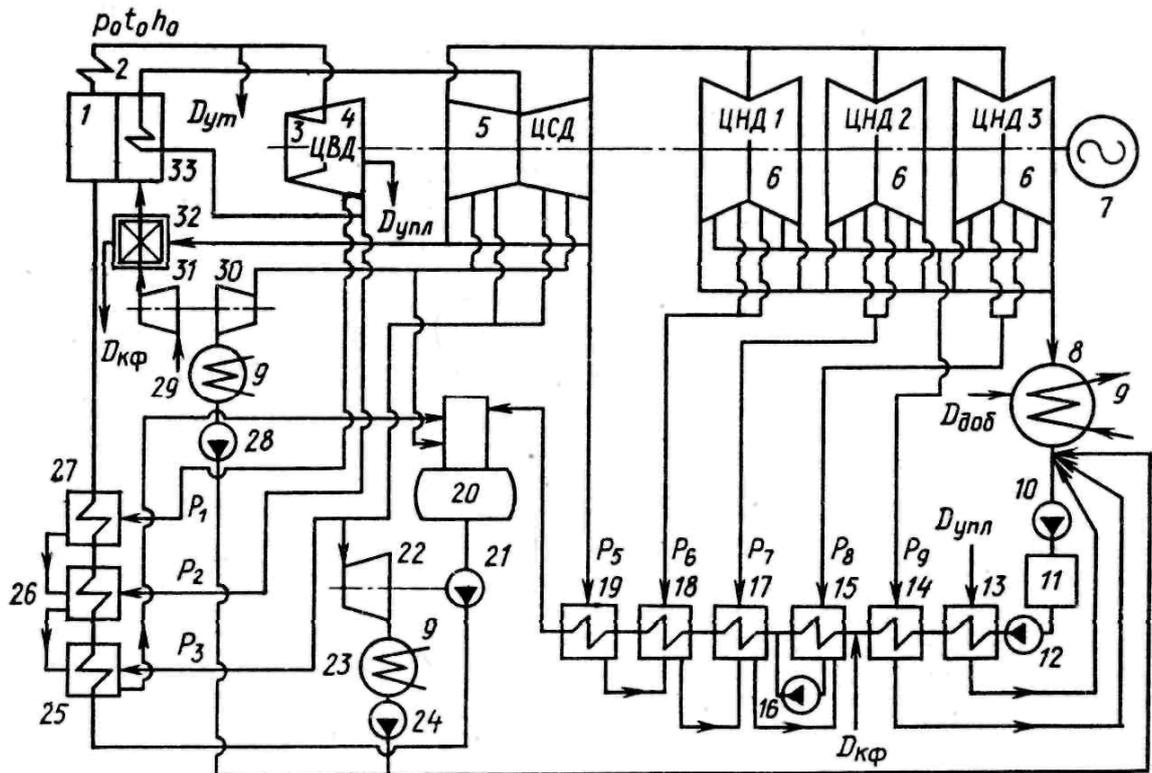


Рис. 3.4. Принципиальная тепловая схема КЭС:

$D_{ут}$ — утечки пара; $D_{кф}$ — конденсат греющего пара калорифера; $D_{упл}$ — утечки пара через уплотнения турбины; $D_{доб}$ — добавочная вода

Система регенеративного подогрева питательной воды имеет восемь ступеней подогрева. В подогреватели высокого давления 25...27 пар поступает из ЦВД и ЦСД турбины, а в подогреватели низкого давления — в основном из отборов ЦНД. Конденсат этого пара в системе регенерации высокого давления каскадно (последовательно) сливается из одного подогревателя в другой, а затем в деаэратор. В системе регенерации низкого давления каскадный слив осуществляется до второго по ходу конденсата подогревателя 15. После него специальный (сливной) насос 16 возвращает конденсат в линию основного конденсата, поступающего в подогреватель 17. Из подогревателя 14 конденсат греющего пара сливается во всасывающую линию конденсатного насоса 10. Перед поступлением в систему регенерации конденсат нагревают подогревателем 13, куда направляются протечки пара через лабиринтные уплотнения турбины, условно показанные из ЦВД.

Воздух, необходимый для горения, воздухоподувкой 31 через калориферы 32 подается в воздухоподогреватель котла. На калорифер пар поступает из регенеративного отбора, а его конденсат подается в линию основного конденсата между подогревателями 14 и 15. Привод воздухоподувки осуществляется вспомогательной турбиной 30, имеющей собственный конденсатор 29. Пар на эту турбину поступает из отбора ЦСД, а конденсат насосом 28 подается во всасывающую линию насоса 10.

Принципиальная тепловая схема ТЭЦ с турбиной, имеющей два регулируемых отбора, приведена на рис. 3.5. Пар из котла 1 через пароперегреватель 2 поступает в турбину, имеющую часть высокого давления 3, среднего 4 и низкого 5. После расширения в проточной части турбины пар поступает в конденсатор 6, охлаждаемый циркуляционной водой 7. Образующийся конденсат конденсатным насосом 8 прокачивается через тракт системы регенерации низкого давления в деаэратор 24, обогреваемый паром из ЦВД турбины. Смешивающиеся в деаэраторе потоки образуют питательную воду, которая питательным насосом 25 через подогреватели 28...30 тракта системы регенерации высокого давления подается в котел.

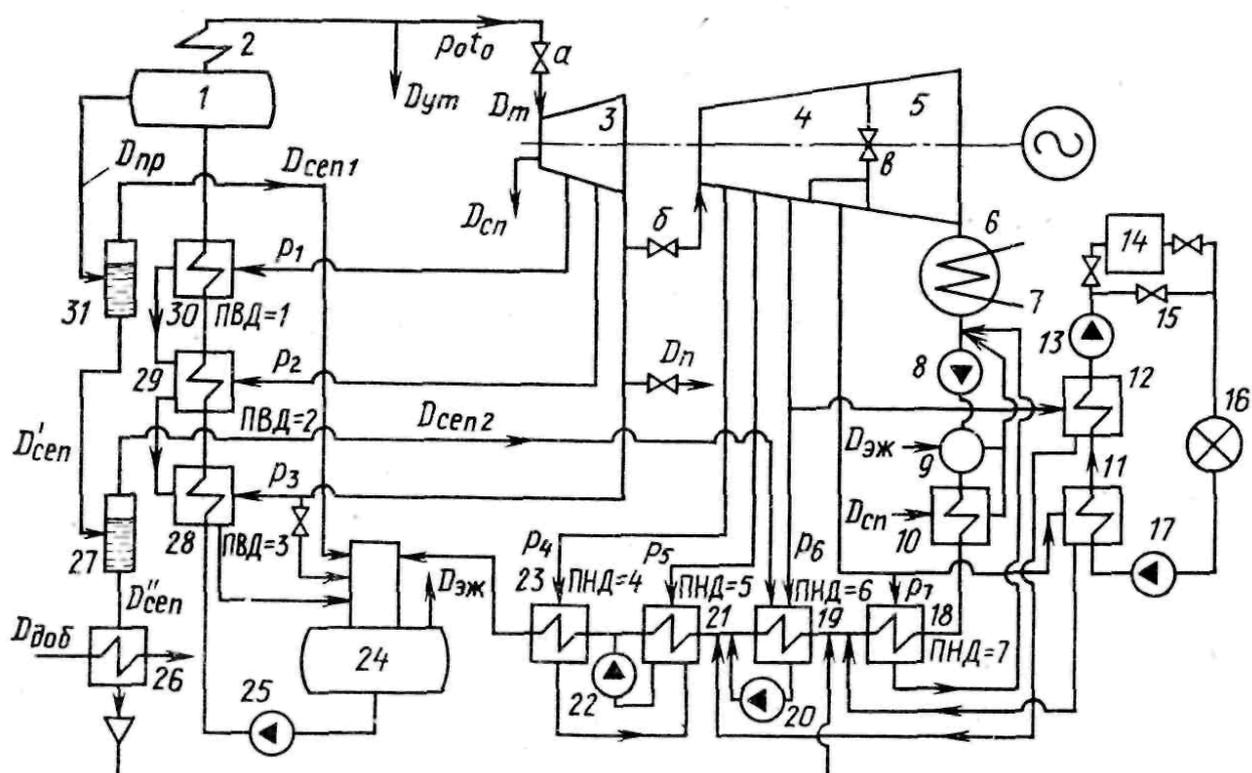


Рис. 3.5. Принципиальная тепловая схема ТЭЦ:

$D_{ут}$ — утечки пара; $D_{пр}$ — продувка котла; $D_{сеп1}$, $D_{сеп2}$ — пар из сепаратора; $D'_{сеп}$ — продувка сепаратора; $D''_{сеп}$ — утечка воды из сепаратора; $D_{доб}$ — добавочная вода; $D_{п}$ — пар потребителю; $D_{сп}$ — утечки пара через уплотнения турбины; $D_{эж}$ — пар на эжектор

Система регенерации состоит из 7 подогревателей. Из подогревателей высокого давления 28...30 конденсат греющего пара каскадно сливается в деаэратор 24. В тракте до деаэратора каскадный слив выполнен только из подогревателя 23 в подогреватель 21, после которого сливной насос 22 подает конденсат в линию между этими подогревателями. В эту же линию сливным насосом 20 подается конденсат греющего пара из подогревателя 19. Из подогревателя 18 конденсат подается во всасывающую линию конденсатного насоса 8.

Тракт системы регенерации низкого давления содержит сальниковый подогреватель 10 и охладитель эжекторного пара 9, утилизирующие низкпотенциальные протечки пара $D_{сп}$ через лабиринтовые уплотнения турбины и паровоздушной смеси $D_{эж}$ из эжектора. Конденсат из этих подогревателей поступает к конденсатному насосу 8.

В рассматриваемой тепловой схеме предусмотрена двухступенчатая утилизация теплоты продувочной воды в расширителях непрерывной продувки 31, 27, которые по пару соединены с соответствующими по давлению точками тепловой схемы, а засоленная вода через теплообменник 26, подогревающий добавочную воду, сбрасывается в канализацию.

Предусмотрено регулирование расхода пара в турбину. Регулирующими органами б и в можно изменять расход пара в регулируемые отборы ЦВД 3 и ЦВД 4. Пар из отбора ЦВД 3 поступает на производство $D_{п}$, на деаэратор и в подогреватель 28. Пар из отбора ЦВД 4 поступает в систему регенерации и на сетевую установку 11, 12.

Сетевая установка предназначена для отпуска потребителю 16 теплоты на нужды отопления и горячего водоснабжения. Сетевая вода прокачивается через подогреватели 11, 12 сетевыми насосами первого 17 и второго 13 подъема и через перемычку 15 поступает к потребителю 16. В сетевой установке ступенчатый подогрев воды вызван необходимостью качественного (ступенчатого) регулирования температуры и, следовательно, количества теплоты, отпускаемой потребителю, при неизменном расходе

воды. При низких наружных температурах воздуха имеется возможность догреть воду в пиковом водогрейном котле 14. Конденсат греющего пара из сетевых подогревателей 11, 12 сливается в соответствующие по температуре точки тепловой схемы.

Оборудование ТЭС

Оборудование на паротурбинных ТЭС разделяют на основное и вспомогательное. К *основному оборудованию* относят паровые котлы, турбины, конденсаторы, теплообменники, электрические генераторы. *Вспомогательное оборудование* включает систему технического водоснабжения, насосы, тягодутьевые установки, механизированные склады твердого топлива, системы пылеприготовления, золоулавливания и золоудаления, для подготовки добавочной воды и очистки конденсатора и др.

Насосное оборудование. В тепловую систему ТЭС входят конденсаторные, сливные, питательные, бустерные и циркуляционные насосы.

Через *циркуляционные насосы* КЭС (рис. 3.4) проходят большие потоки охлаждающей воды для создания кратности охлаждения в конденсаторе 40...60 кг/кг. Большой напор не требуется, так как сброс воды после конденсатора проходит по самотечным каналам. Пропеллерные вертикальные насосы, в которых регулирование производительности за счет поворота лопастей.

На ТЭС потоки пара в конденсатор малы, количество охлаждающей воды незначительно и в качестве циркуляционных насосов применяют центробежные (радиальные) насосы.

Конденсатные насосы 10 (рис. 3.4), 8 (рис. 3.5) обеспечивают напор для преодоления сопротивления тракта системы регенерации низкого давления и предназначены для подачи конденсата в основную линию.

Сетевые насосы, перекачивающие воду к потребителю теплоты, выполняются, как правило, в виде двух групп 13 и 17 (рис. 3.4, рис. 3.5). Вторая группа насосов работает на обратной сетевой воде и имеет напор, необходимый для преодоления сопротивления сетевой установки. Напор сетевых насосов первой группы зависит от длины трубопроводов, рельефа местности. По абсолютной величине он значительно больше, чем у насосов второй группы.

Все перечисленные насосы ГЭС имеют электропривод и, как правило, выполняются без регулирования частоты вращения.

Наиболее сложны в исполнении и эксплуатации *питательные насосы*, предназначенные для подачи воды в котел. Значительное давление воды на выходе обеспечивается многоступенчатой конструкцией проточной части насоса, а большая производительность и компактность — выполнением насоса быстроходным. Кроме того, питательный насос должен быть регулируемым для обеспечения работы котла во всем диапазоне нагрузок. Приводом питательных насосов может быть электродвигатель или паровая турбина. Мощности современных энергетических блоков таковы, что на привод питательных насосов требуется тратить 9...30 МВт. На такие мощности нет электродвигателей и поэтому в качестве приводного агрегата применяются паровые турбины 22 (рис. 3.4).

Вода поступает в питательный насос из деаэратора, где подогревается до температуры насыщения при его рабочем давлении. Перекачка такой воды может сопровождаться нежелательными явлениями: кавитацией и запариванием. *Кавитация* возникает при понижении давления на входе в насос, когда перекачиваемая вода оказывается перегретой. Это состояние нестабильно и при любом динамическом воздействии вода частично вскипает, образуя паровую и жидкую фазу. При последующем повышении давления паровые пузырьки конденсируются и в результате образуются ударные волны, которые являются причиной вибрации, шума, снижения КПД насоса. При длительной работе насоса в таком режиме рабочий орган может разрушиться. С

появлением в перекачиваемой жидкости полостей, заполненных паром, связано явление *запаривания* насоса, когда пузырьки пара объединяются в большой пузырь, который полностью или частично перекрывает живое сечение канала, и подача рабочей среды прекращается.

Современные насосы для перекачивания нагретых жидкостей проектируются с учетом этих явлений и возникновение запаривания в нем маловероятно. Появление кавитации все же возможно из-за наличия в рабочем канале местных понижений давления за острыми кромками, при плохом обтекании, дефектах обработки деталей. Для предотвращения кавитационных явлений повышают давление питательной воды на входе в насос до значений, исключающих кавитацию. Раньше это достигалось установкой деаэраторов на отметках, более высоких по отношению к питательным насосам. Теперь таким путем обеспечить противокавитационный запас давления не удастся, так как питательные насосы размещают на отметке 4...6 м по высоте, а расположение деаэраторов ограничивают отметками 14...20 м. В этих условиях создание противокавитационных запасов давления обеспечивается подкачивающим (*бустерным*) насосом, располагаемым между деаэратором и питательными насосами. Эти насосы имеют отдельный электропривод, либо привод от турбины питательного насоса через редуктор. В последнем случае бустерные насосы составляют неотъемлемую часть питательных насосов.

Подогреватели. В тепловой схеме ТЭС используются регенеративные подогреватели высокого и низкого давлений и сетевые подогреватели 11, 12 (рис. 3.5).

Подогреватели низкого давления (ПНД) чаще всего выполняются поверхностными. Они могут быть также горизонтальными. Обычно так выполняются сетевые подогреватели для отпуска большого количества теплоты, нуждающиеся в развитой поверхности нагрева.

Подогреватели высокого давления (ПВД) пропускают через себя все количество питательной воды. Параметры греющей и нагреваемой сред различаются. ПВД с коллекторной системой (рис. 3.6, а). В корпусе расположена трубная система нагревателя, состоящая из четырех вертикальных стояков-коллекторов, между которыми расположены нагревательные спирали, и вертикальной центральной отводящей трубы. Внутри стояков установлены перегородки и дроссельные шайбы, обеспечивающие движение питательной воды (рис. 3.6, б).

Греющий пар поступает в подогреватель по трубопроводу сверху и движется навстречу нагреваемой питательной воде. Паровое пространство подогревателя, занятое греющим паром, конструктивно разделено на три зоны: верхняя зона, куда поступает наиболее горячий пар (охладитель пара), средняя — собственно подогревателем, где происходит конденсация пара, и нижняя — охладитель конденсата.

В охладителе пара питательная вода отбирает от поступающего пара теплоту перегрева. Для этого в паровом пространстве охладителя расположено множество перегородок, которые обеспечивают длительный контакт перегретого пара и питательной воды.

Пройдя охладитель, пар поступает в собственно подогреватель, где происходит конденсация пара и передача теплоты конденсации питательной воде. Образующийся конденсат имеет температуру насыщения, которая значительно выше температуры поступающей питательной воды. Поэтому для более полного использования теплоты конденсата он направляется в охладитель конденсата. Охлажденный конденсат направляется либо в подогреватель с более низким давлением, либо в деаэратор.

Регенеративные подогреватели обязательно снабжают указателями уровня конденсата греющего пара, системами сигнализации и защиты от превышения его уровня. Заполнение подогревателя водой может привести к ее попаданию в турбину, что неизбежно вызовет тяжелую аварию. Особенно опасно переполнение подогревателя высокого давления, которое может быть следствием разрыва трубок питательной воды.

Водоснабжение. Основными потребителями воды на ТЭС являются конденсаторы

паровых турбин (для этой цели расходуется 92...96% общего количества воды), газоохладители электрических генераторов (2...4%), маслоохладители (1...2%), система охлаждения подшипников вращающихся механизмов (0,3...0,8%), гидротранспорт воды и шлака (0,1 ... 0,4%), водоподготовка (0,05 ... 0,8%). Применяются прямоточная, обратная и смешанная система водоснабжения. Наиболее простой является прямоточная система водоснабжения. Она предполагает наличие в районе электростанции естественного источника воды (реки, озера, моря) с дебитом, в три-четыре раза превышающем потребность в охлаждающей воде. Вода поступает на электростанцию по водопроводам или специальному каналу, а затем циркуляционными насосами подается к конденсаторам турбин и другим потребителям. Сброс воды происходит под остаточным давлением теми же насосами ниже по течению (если водоисточником является река) или в удаленное от водозабора место (если озеро или море).

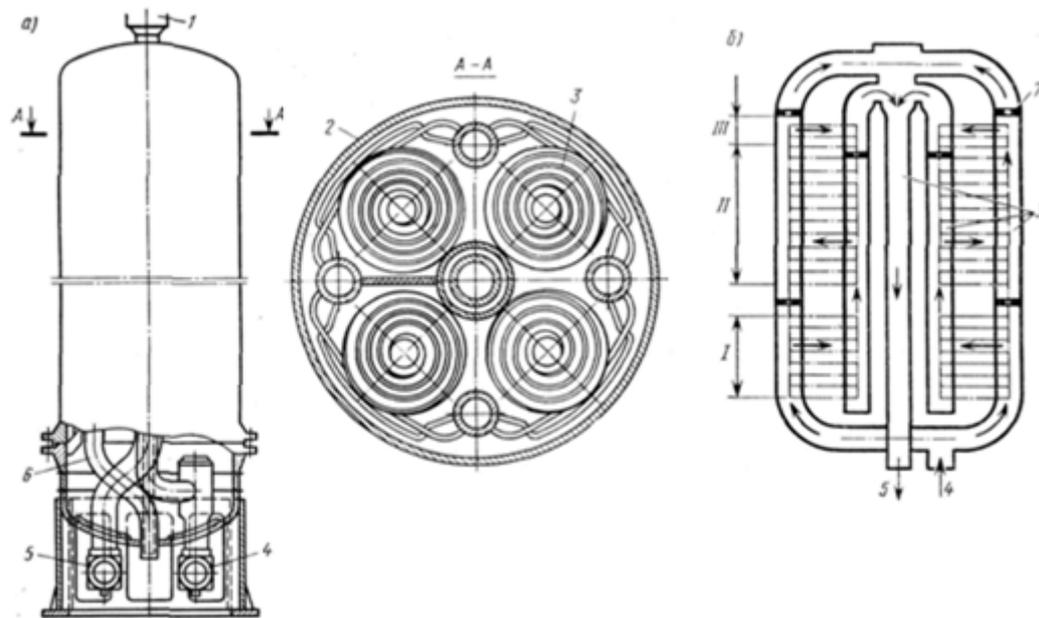


Рис. 3.6. Регенеративный подогреватель (а) высокого давления и схема движения питательной воды (б):

1 — подвод греющего пара; 2 — корпус; 3 — коллекторы питательной воды; 4, 5 — подвод и отвод питательной воды; 6 — отвод конденсата греющего пара. 7 — дроссельная шайба;

I, II, III — первый, второй и третий ходы питательной воды.

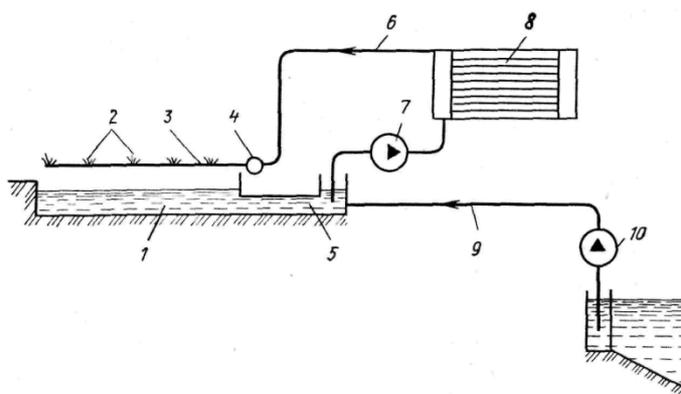


Рис. 3.7. Система обратного водоснабжения с брызгальной установкой: 1 - водосборный бассейн; 2 - разбрызгивающие сопла; 3 - распределительный трубопровод; 4 — коллектор; 5 — подводный канал; 6 — напорный трубопровод нагретой воды; 7 — циркуляционный насос; 8 — конденсатор турбины; 9 — трубопровод добавочной воды; 10 — насос добавочной воды

Оборотная система водоснабжения использует один и тот же запас воды многократно. В нее входят охладитель воды, подводящие и сбросные водопроводы и циркуляционные насосы. В качестве охладителей используются водохранилища-охладители, брызгальные бассейны и градирни.

Охлаждение воды в водохранилищах происходит за счет частичного ее испарения и конвективного теплообмена. Забор и сброс воды для нужд электростанции производится в удаленных друг от друга местах водоема. Достоинствами *водохранилищ-охладителей* являются малый расход воды на возмещение ее потерь, низкая температура воды зимой, хорошие условия водозабора. Недостатком таких схем являются большие площади, требующиеся для охлаждения воды (ориентировочно 8...10 м² на 1 кВт установленной мощности), необходимость сооружения плотины.

Искусственный охладитель выполняется в виде *брызгальных устройств* (рис.3.7). Разбрызгивание воды в них происходит посредством сопел за счет напора насосов. На 1 кВт установленной мощности нужно 0,1...0,2 м² площади бассейна. Достоинством брызгальных бассейнов является простота конструкции и небольшая стоимость, а недостатками — меньший по сравнению с водохранилищами-охладителями эффект охлаждения, больший унос воды, что приводит к увлажнению, а в зимнее время — к обледенению местности в радиусе до 200 м.

Часто в качестве охладителей в системе оборотного водоснабжения используют *градирни* (рис. 8), что позволяет повысить компактность сооружений электростанции. Бывают градирни с искусственной тягой от вентилятора. Охлажденная вода бассейна 4, расположенного в основании градирни поступает к циркуляционным насосам, которыми прокачивается через конденсаторы и возвращается в оросительное устройство.

Основным достоинством градирен по сравнению с водохранилищами - охладителями является компактность при хорошем эффекте охлаждения. Удельная площадь градирен составляет 0,01 ... 0,02 м²/кВт.

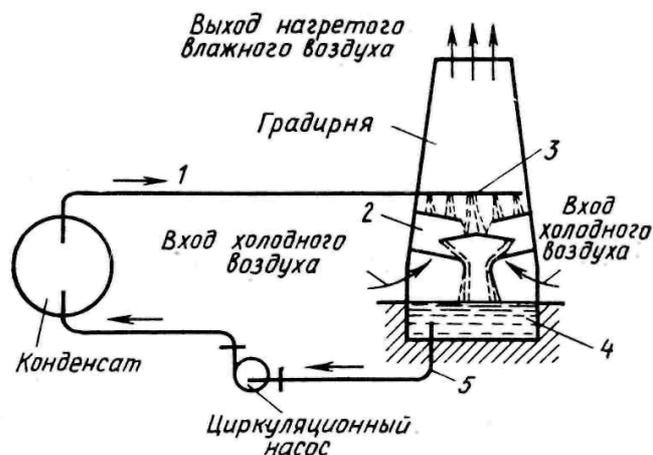


Рис. 3.8. Система оборотного водоснабжения с градирней:

1,5 — подвод и отвод охлаждающей воды; 2 — оросительное устройство, 3 — распределительный желоб; 4 — сбросной бассейн охлаждающей воды.

Топливное хозяйство. Топливное хозяйство ТЭС служит для разгрузки, хранения, транспортировки и приготовления к сжиганию поступающего на электростанцию топлива. На современных электростанциях обслуживают топливное хозяйство до 20% всего персонала ТЭС.

Структура топливного хозяйства и применяемое оборудование зависят от вида топлива. Наиболее сложным и дорогим является хозяйство для сжигания твердого топлива (рис. 3.9).

Уголь на ТЭС обычно доставляется железнодорожным транспортом. Вагоны с топливом разгружаются в разгрузочном устройстве 1. Для обеспечения нагрузки топлива имеются размораживающие устройства, вагоноопрокидыватели, механические рыхлители,

вибраторы. Уголь попадает в приемные бункера, закрытые сверху решетками. Задержанные решеткой крупные куски измельчаются специальными устройствами. Из бункеров ленточными питателями уголь подается на конвейер 2, которым доставляется в узел пересыпки 3 и далее с помощью конвейера 14 — в дробильный корпус 12. После измельчения в молотковых или волновых дробилках уголь поступает через конвейер 11 в узел пересыпки 10 главного корпуса электростанции, а оттуда перегружается на конвейеры бункерной галереи 9, с которых сбрасывается по бункерам мельниц котельных агрегатов.

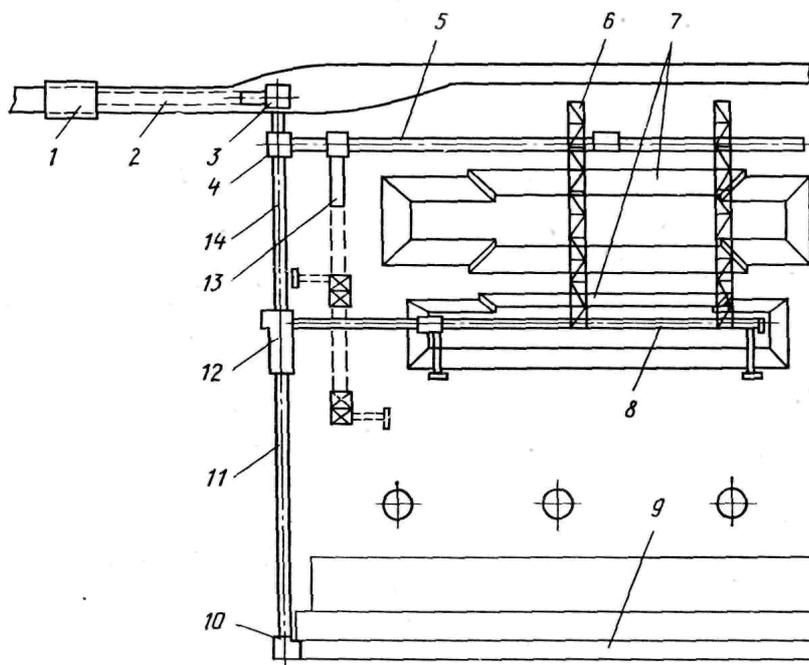


Рис. 3.9. Технологическая схема топливоподачи на электростанции большой мощности.

Из дробильного корпуса уголь, минуя мельницы, может также поступать через конвейер 8 на склад, где он грейферным краном-перегрузателем 6 укладывается в штабеля 7. Емкость складов угля равна 30-суточному расходу его котлами электростанции. Если электростанция размещена на расстоянии до 100 км от места добычи угля, емкость склада уменьшается вдвое. Срок хранения бурых и каменных углей с выходом летучих веществ более 13% не превышает полугодия, тощих углей — до 1 года, антрацита — до 2 лет. Со склада уголь по конвейерам 13 или 5 поступает в узел пересыпки 4 и далее в дробильное помещение 12.

Газовоздушный тракт - совокупность газовоздухопроводов и теплообменных поверхностей нагрева, тягодутьевых машин и золоуловителей, дымовой трубы и внешних газоходов. Особенности: сложность конфигурации и большие сечения газовоздухопроводов, возможность возникновения аэродинамических пульсаций и шума при неудачном конструктивном выполнении.

Простейшая принципиальная схема газовоздушного тракта ТЭС (рис. 3.10). Воздух к котлу 2 подается дутьевым вентилятором 3. После воздухоподогревателя 7 поток воздуха разделяется на две части: первичный — поступает в систему пылеприготовления 1 в качестве сушильного агента и через дроссель 9 для транспортировки топлива в топку, и вторичный — поступает через дроссель 8 к устройствам для сжигания топлива. Продукты сгорания топлива охлаждаются в воздухоподогревателе 7, очищаются от золы в золоуловителях 4 и дымососом 5 выбрасываются через дымовую трубу 6 в атмосферу. Удаление продуктов сгорания может в отдельных случаях производиться за счет естественной тяги дымовой трубы.

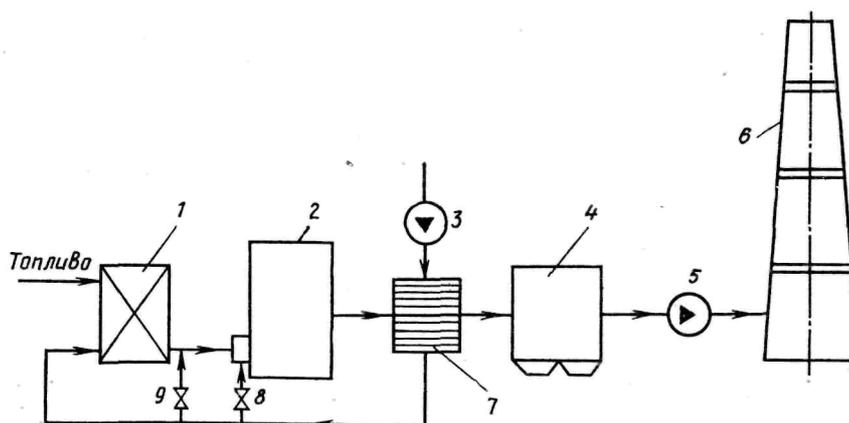


Рис. 3.10. Принципиальная схема газоздушного тракта.

Сопrotивление воздушного тракта складывается из сопротивления воздухопроводов, воздухоподогревателя и устройств для сжигания топлива. Сопrotивление газового тракта включает в себя сопротивление всех его участков, начиная с верхней части топки и кончая дымовой трубой.

Расчетная производительность дутьевого вентилятора (подача) определяется количеством воздуха, необходимого для горения, с учетом коэффициента избытка воздуха в топке, присосов воздуха и утечек в тракте. Расчетная производительность дымососа определяется количеством продуктов сгорания с учетом присосов воздуха.

Выбор тягодутьевых машин производится с запасом 10% по производительности и 15...20% — по напору по отношению к значениям, определяемых при расчете котла.

Трубопроводы и арматура. Трубопроводы электростанций служат для перемещения рабочего тела между отдельными агрегатами технологической схемы. Трубопроводы состоят из труб и средств соединения их между собой, фасонных частей, защитных устройств и встроенных элементов контрольно-измерительных приборов, опор, подвесок и опорных конструкций.

Решение примеров.

Задание. Дана технологическая схема ТЭС, работающая на газе (Рис. 3.11).

Привести название и назначение оборудования, выделенного на схеме позициями 1-34.

Контрольные вопросы:

1. Как классифицируются тепловые электрические станции? Расскажите технологическую схему производства электроэнергии и теплоты на тепловой электрической станции.

2. Каковы вид и значение графиков электрических и тепловых нагрузок ТЭС?

3. Какими показателями оценивается экономичность КЭС и ТЭЦ?

4. Расскажите о принципиальных тепловых схемах КЭС и ТЭЦ. Как покрываются пиковые нагрузки при отпуске теплоты от ТЭЦ?

5. Что включает в себя вспомогательное оборудование ТЭС? Его назначение и особенности работы.

6. Какие подогревательные установки используются в тепловой схеме ТЭС? Их назначение и устройство.

7. Дайте характеристику используемым на ТЭС схемам их технического водоснабжения, каково назначение и особенности топливного хозяйства ТЭС?

8. Каково влияние ТЭС на окружающую среду?

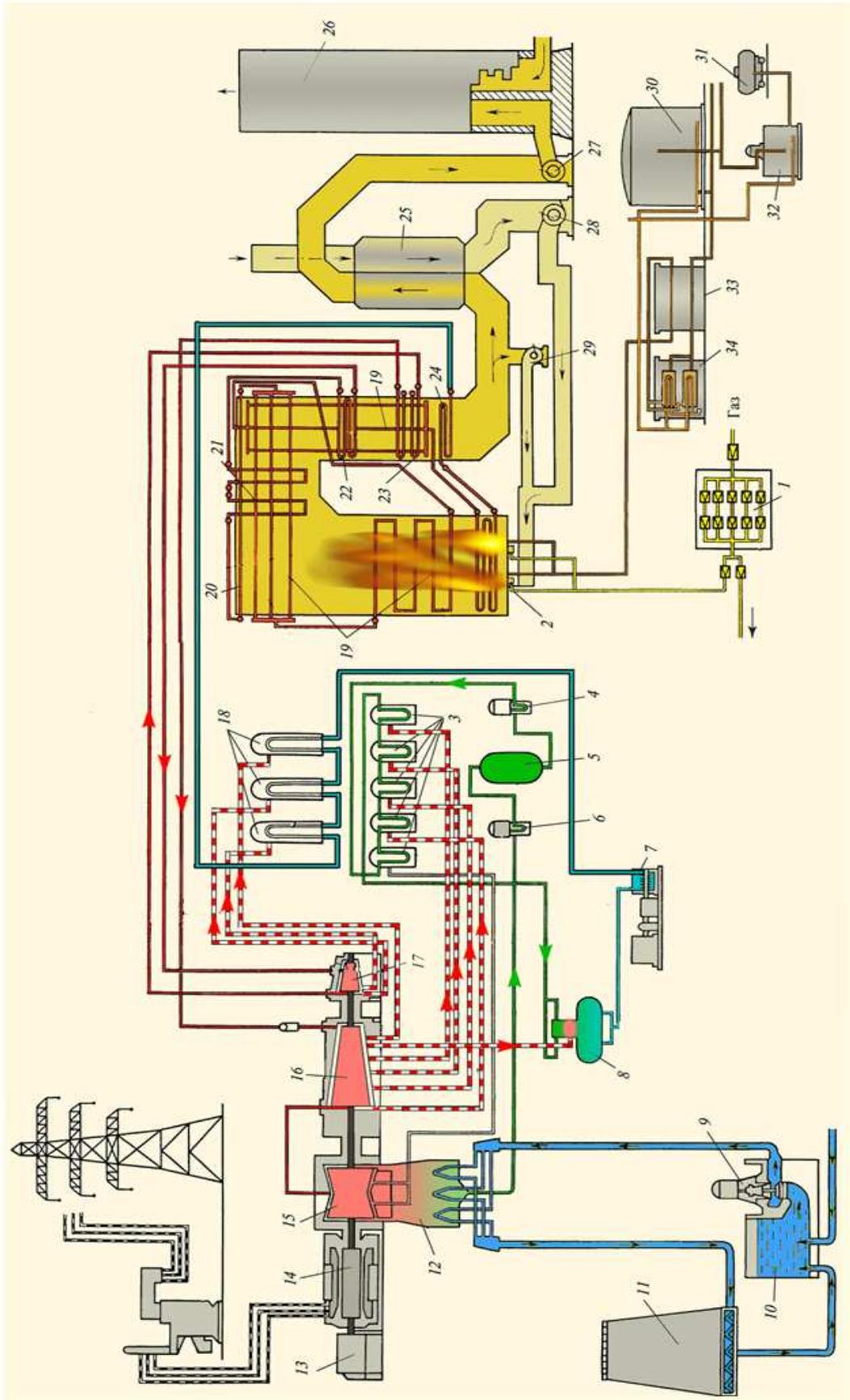


Рис. 3.11 Технологическая схема ГЭС, работающая на газе

Практическое занятие № 4

4. Атомные электрические станции

Цель работы: Ознакомиться с принципом работы атомных электрических станций.

План проведения занятия:

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Ответы на контрольные вопросы.

Краткие теоретические сведения:

АЭС — это по существу тепловые электростанции, которые используют тепловую энергию ядерных реакций. В настоящее время наибольшее распространение получили двухконтурные АЭС с водяным теплоносителем и одноконтурные с реактором кипящего типа.

Первая отечественная АЭС была построена и пущена в эксплуатацию в июне 1954 г. Параметры установки были низкими, тепловая схема сильно упрощена, а электрическая мощность составляла всего 5000 кВт. Электростанция была спроектирована для работы по двухконтурной схеме. Опыт ее эксплуатации показал надежность двухконтурных АЭС и отсутствие вредного влияния на окружающую среду и здоровье обслуживающего персонала. В последующие годы были созданы серии крупных энергетических блоков электрической мощностью 210, 365 и 440 МВт (Нововоронежская АЭС), эксплуатируемых сейчас на ряде отечественных электростанций. Одновременно были разработаны и построены блоки одноконтурных конденсационных АЭС большой мощности.

Атомные электростанции могут быть конденсационными (АКЭС) и теплоэлектроцентралями (АТЭЦ). В последние годы в некоторых странах большое внимание уделяется использованию теплоты комбинированных атомных установок для опреснения морских и солончаковых вод.

Один из основных элементов АЭС - реактор. В основном используют ядерные реакции расщепления урана U-235 под действием тепловых нейтронов. Для их осуществления в реакторе, кроме топлива (U-235), должен быть замедлитель нейтронов и теплоноситель, отводящий тепло из реактора.

реактор	замедлитель	теплоноситель
ВВЭР (водо-водяной энергетический)	вода под давл.	вода под давл.
РБМК (реактор большой мощности канальный)	графит	вода

На АЭС широко применяется насыщенный пар (перегрев пара непосредственно в ядерном реакторе весьма усложняет конструкцию реактора и схему установки, требует дополнительных капитальных затрат). На АЭС стоимость топлива (ядерного горючего), отнесенная к единице выработанной энергии, значительно ниже, чем на электростанциях обычного типа. Поэтому здесь производство электроэнергии на установках меньшей стоимости даже при более низких значениях КПД экономически оправдано.

Схема АЭС может быть одноконтурной, двухконтурной и трехконтурной.

На одноконтурной АЭС (рис. 4.1а) пар образуется в активной зоне реактора и оттуда направляется в турбину. В некоторых случаях до поступления в турбину пар подвергается перегреву в перегревательных каналах реактора. Одноконтурная схема наиболее проста. Однако образующийся в реакторе пар радиоактивен, поэтому большая часть оборудования АЭС должна иметь защиту от излучений. В процессе работы электростанции в паропроводах, турбине и других элементах оборудования могут скапливаться выносимые из реактора с паром твердые вещества (содержащиеся в воде примеси, продукты коррозии), обладающие наведенной активностью, что затрудняет

контроль за оборудованием и его ремонт.

По двухконтурной и трехконтурной схемам (рис. 4.1 б и в) из реактора теплота отводится теплоносителем, который затем передает теплоту рабочей среде непосредственно или через теплоноситель промежуточного контура. На АЭС, двухконтурной или трехконтурной схем рабочая среда и теплоноситель второго контура в нормальных условиях нерадиоактивны, поэтому эксплуатация электростанций существенно облегчается. Кроме того, продукты коррозии паропроводов, конденсаторов и турбинного тракта не попадают в реактор. Однако капитальные затраты в этом случае значительно выше, особенно при трехконтурной схеме. Такие схемы следует применять, когда вероятность контакта активного теплоносителя с водой должна быть полностью исключена (при использовании в качестве теплоносителя жидкого натрия, так как его контакт с водой может привести к крупной аварии). В трактах АЭС, работающих по двухконтурной схеме, даже при небольших нарушениях плотности возможен контакт активного натрия с водой. При трехконтурной схеме контакт активного натрия с водой исключен.

Во всех приведенных на рис. 1 схемах конденсат после конденсатора турбины проходит систему регенеративного подогрева, которая не отличается от применяемой на обычных электростанциях.

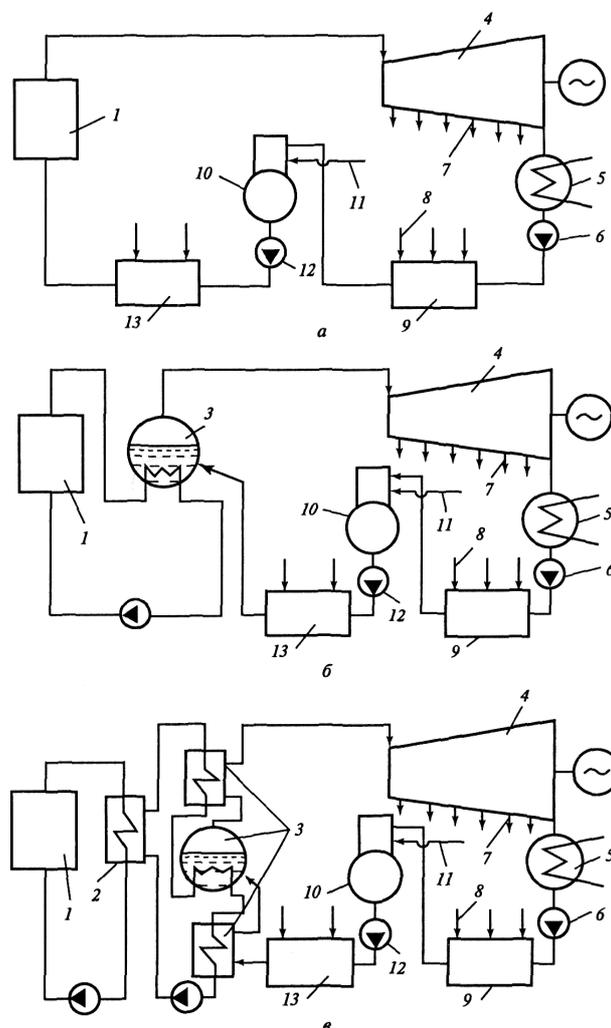


Рис. 4.1. Одноконтурная (а), двухконтурная (б) и трехконтурная (в) схемы АЭС:

1 — реактор, 2 — промежуточный теплообменник, 3 — парогенератор, 4 — турбогенератор; 5 — конденсатор; 6 — конденсатный насос; 7 — пар от отбора, 8 — пар на регенеративный подогреватель; 9, 13 — регенеративные подогреватели низкого и высокого давления; 10 — деаэрактор; 11 — пар на деаэрактор; 12 — питательный насос

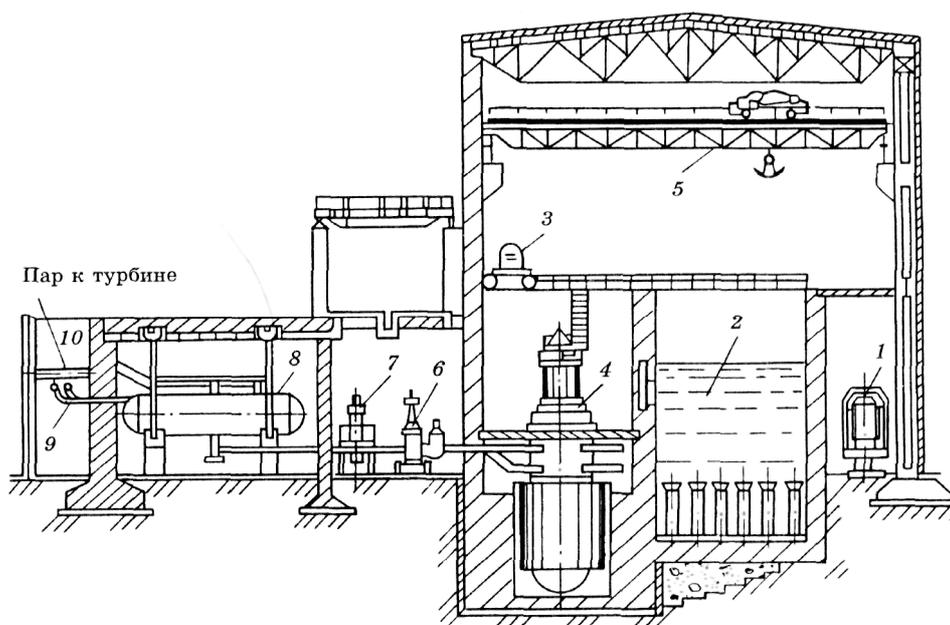


Рис. 4.2 Технологическая схема первого контура АЭС:

1 — контейнер, 2 — бассейн; 3 — перегрузочный кран, 4 — реактор, 5 — мостовой кран реакторного зала, 6 — главная задвижка, 7 — главный циркуляционный насос, 8 — парогенератор, 9 — трубопроводы питательной воды, 10 — трубопроводы вторичного пара

Технологическая схема первого контура двухконтурной АЭС показана на рис. 4.2.

Ядерное топливо, находящееся в тепловыделяющих элементах (ТВЭлах) определенной формы, доставляется в контейнерах 1 на электростанцию и с помощью перегрузочного крана 3 загружается в активную зону реактора 4. Кассеты с отработавшими ТВЭлами помещаются в бассейн 2, где выдерживаются в течение определенного времени. Когда радиоактивность горючего и материала кассет уменьшается до нормативных значений, кассеты в контейнерах вывозят на перерабатывающие заводы.

Теплота, выделяющаяся в реакторе и воспринятая теплоносителем, передается рабочей среде в парогенераторе (ПГ) 8. При трехконтурной схеме между теплоносителем первого контура и рабочей средой имеется еще промежуточный контур (рис. 4.1 в).

Пар, образовавшийся в ПГ (при двухконтурных и трехконтурных схемах) или в реакторе (при одноконтурной схеме), направляется по паропроводу к турбине. На схеме первого контура двухконтурной АЭС (рис. 4.2) пар направляется к турбине по трубопроводу 10, питательная вода подается в ПГ по линии 9.

При работе на насыщенном паре (рис.1, а и б) в проточной части турбины пар быстро увлажняется. Чтобы избежать увеличения интенсивности эрозийного износа элементов проточной части, поток пара перед поступлением в цилиндр низкого давления (ЦНД) турбины пропускается через сепаратор, в котором его влажность понижается до значений, не превышающих 0,5%. На крупных современных блоках после сепаратора пар перегревается до температуры $t_{\text{пн}}$, близкой к начальной температуре t_0 (при некоторых схемах организации промежуточного перегрева $t_{\text{пн}} \approx t_0$).

Схемы АЭС в тепловой части могут выполняться в различных вариантах. На рис. 4.3 в качестве примера представлена двухконтурная схема АЭС для электростанций с реакторами ВВЭР. Эта схема близка к схеме КЭС, однако вместо парогенератора на органическом топливе здесь используется ядерная установка.

АЭС, так же как и КЭС, строятся по блочному принципу.

Ядерное топливо, запасы которого достаточно велики, обладает очень высокой

теплотворной способностью (1 кг U-235 заменяет 2900 т угля), поэтому АЭС особенно эффективны в районах, бедных топливными ресурсами (европейская часть России).

Тип реактора	Мощность реактора, МВт	Турбоагрегаты, МВт
ВВЭР	440	2*220
ВВЭР	1000	2*500
РБМК	1500	2*750
РБМК	1000	1*1000

Перспективными являются АЭС с реакторами на быстрых нейтронах (БН), которые могут использоваться для получения тепла, электроэнергии и для воспроизводства ядерного горючего. Технологическая схема энергоблока такой АЭС представлена на рис. 4. Реактор типа БН имеет активную зону, где происходит ядерная реакция с выделением потока быстрых нейтронов. Эти нейтроны воздействуют на элементы из U-238 (обычно в ядерных реакциях не используется) и превращают его в плутоний Pu-239 (может быть впоследствии использован на АЭС в качестве ядерного горючего). Тепло ядерной реакции отводится жидким натрием и используется для выработки электроэнергии.

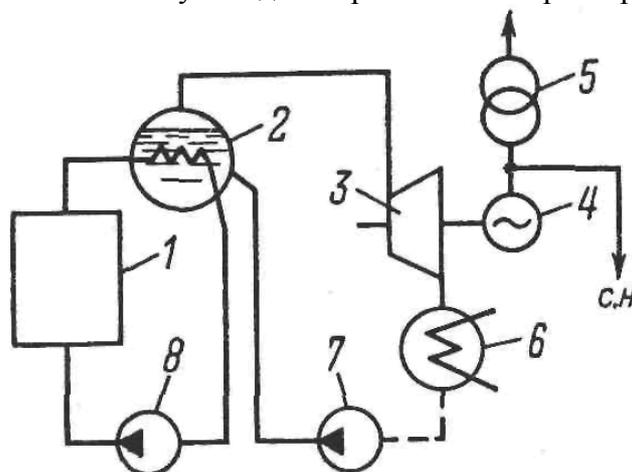


Рис. 4.3. Принципиальная технологическая схема АЭС с реактором типа ВВЭР:

1 — реактор; 2 — парогенератор; 3 — турбина; 4 — генератор; 5 — трансформатор; 6 — конденсатор турбины; 7 — конденсатный (питательный) насос; 8 — главный циркуляционный насос.

Схема АЭС с реактором БН трехконтурная, в двух из них используется жидкий натрий (в контуре реактора и промежуточном). Чтобы избежать при авариях контакта радиоактивного натрия первого контура с водой или водяным паром, выполняют второй (промежуточный) контур с теплоносителем нерадиоактивным натрием. Рабочим телом третьего контура является вода и водяной пар.

В настоящее время в эксплуатации находится ряд энергоблоков типа БН, из них наиболее крупный БН-600.

АЭС не имеют выбросов дымовых газов и не имеют отходов в виде золы и шлаков. Однако удельные тепловыделения в охлаждающую воду у АЭС больше, чем у ТЭС, вследствие большего удельного расхода пара и больших удельных расходов охлаждающей воды. Поэтому на большинстве новых АЭС предусматривается установка градирен, в которых теплота от охлаждающей воды отводится в атмосферу.

Важной особенностью возможного воздействия АЭС на окружающую среду является необходимость захоронения радиоактивных отходов в специальных могильниках, которые исключают возможность воздействия радиации на людей. Чтобы избежать влияния возможных радиоактивных выбросов АЭС на людей при авариях, применены специальные меры по повышению надежности оборудования (дублирование

систем безопасности и др.), а вокруг станции создается санитарно-защитная зона.

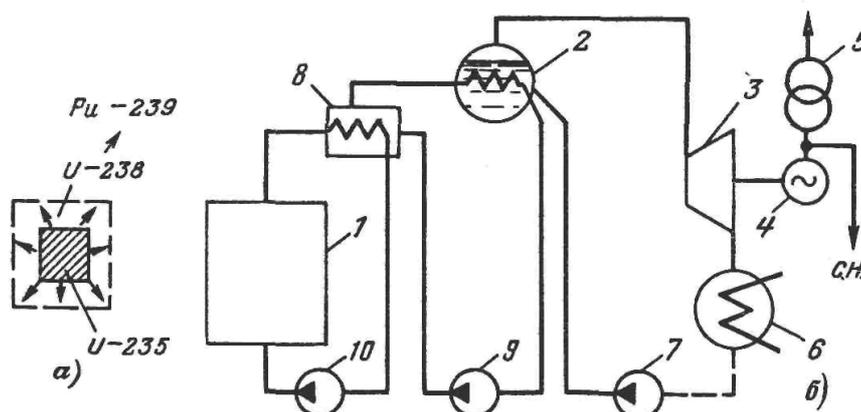


Рис. 4.4. Принципиальная технологическая схема АЭС с реактором типа БН: а - принцип выполнения активной зоны реактора; б — технологическая схема: 1-7 — аналогичны указанным на рис.1; 8 — теплообменник натриевых контуров; 9 - насос нерадиоактивного натрия, 10 — насос радиоактивного натрия

Контрольные вопросы

1. Каково воздействие на окружающую среду со стороны АЭС?
2. Чем обусловлено применение многоконтурных схем АЭС?
3. Каким образом отводится выделяемое при ядерной реакции тепло из реактора на АЭС?
4. Для чего используются сепараторы в проточных частях энергоустановок?
5. Какие материалы используют в качестве замедлителя ядерной реакции в реакторе АЭС?
6. Какие по величине электрические мощности вырабатывают реакторы современных АЭС?
7. Для каких целей создаются защитные зоны вокруг территорий АЭС?
8. Изобразить трехконтурную схему АЭС.
9. Что такое твэл?

Практическое занятие № 5

5. Анализ паросилового цикла Ренкина.

Цель работы: Изучить методику расчета параметров идеального термодинамического цикла паросиловых установок.

План проведения занятия:

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Решение примеров.
3. Ответы на контрольные вопросы.

Краткие теоретические сведения

Цикл Ренкина с перегревом пара является основным циклом паросиловых установок, применяемых в современной теплоэнергетике. В качестве рабочего тела используется водяной пар. Паросиловые установки обычно состоят из паровых котлов

(парогенераторов) и паровых двигателей (паровых машин или паровых турбин) для пароходов, паровозов, паровых автомобилей или электрических генераторов (тепловых и атомных электростанций).

Известно, что большая часть мировых энергетических ресурсов направляется на выработку электроэнергии и работу транспорта, где бесчисленное количество тепловых преобразователей энергии, превращают их в полезную работу. Эффективность преобразователей энергии, к которым относятся двигатели внутреннего сгорания, газотурбинные, паротурбинные и другие энергетические установки, способна снизить не только экономические, но и экологические проблемы, что заставляет постоянно совершенствовать их конструкцию.

Цикл Ренкина - теоретический термодинамический цикл паровой машины, состоящий из четырех основных операций:

- 1- испарения жидкости при высоком давлении;
- 2- расширения пара;
- 3- конденсации пара;
- 4- увеличения давления жидкости до начального значения.

На рис. 5. 1 представлена технологическая схема паросиловой установки для производства электроэнергии.

Пар большого давления и температуры подается в сопловые аппараты турбины, где происходит превращение потенциальной энергии пара в кинетическую энергию потока пара (скорость потока – сверхзвуковая). Кинетическая энергия сверхзвукового потока превращается на лопатках турбины в кинетическую энергию вращения колеса турбины и в работу производства электроэнергии.

После турбины пар направляется в конденсатор. Это обычный теплообменник, внутри труб проходит охлаждающая вода, снаружи – водяной пар, который конденсируется, вода становится жидкой и поступает в питательный насос, где происходит увеличение давления до номинальной (проектной) величины.

Далее вода с высоким давлением направляется в котельный агрегат. В этом агрегате вода сначала нагревается до температуры кипения от дымовых газов из топки котла, затем поступает в кипяtilьные трубы, где происходит фазовое превращение вплоть до состояния сухого насыщенного пара.

Сухой насыщенный пар идет в пароперегреватель, обогреваемый топочными дымовыми газами из топки. Цикл оборота рабочего тела повторяется. Этот цикл паросиловой установки предложил немецкий инженер Ренкин.

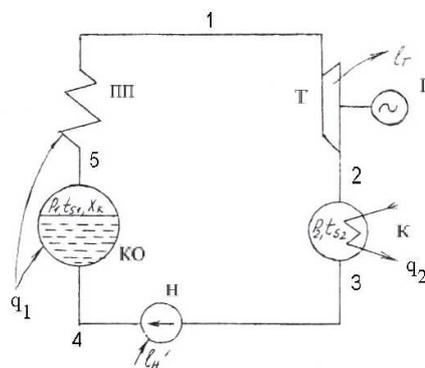


Рис. 5.1 Схема паросиловой установки, работающей по циклу Ренкина.

Влажный насыщенный пар с параметрами P_1, t_{s1}, X_k (точка 5 рис. 5.2), полученный в паровом котле ПК поступает в пароперегреватель ПП, где при постоянном давлении сначала подсушивается от X_k до $X=1$ (процесс 5-а''), а затем перегревается от t_{s1} до t_1

(процесс $a''-1$). Перегретый пар после пароперегревателя ПП подается в турбину Т и адиабатно расширяется в ней от состояния 1 до состояния 2. Влажный пар низкого давления P2 (точка 2) после турбины направляется в конденсатор К, где от него при постоянном давлении P2 и температуре t_{s2} с помощью охлаждающей воды отводится теплота q_2 (процесс 2-3).

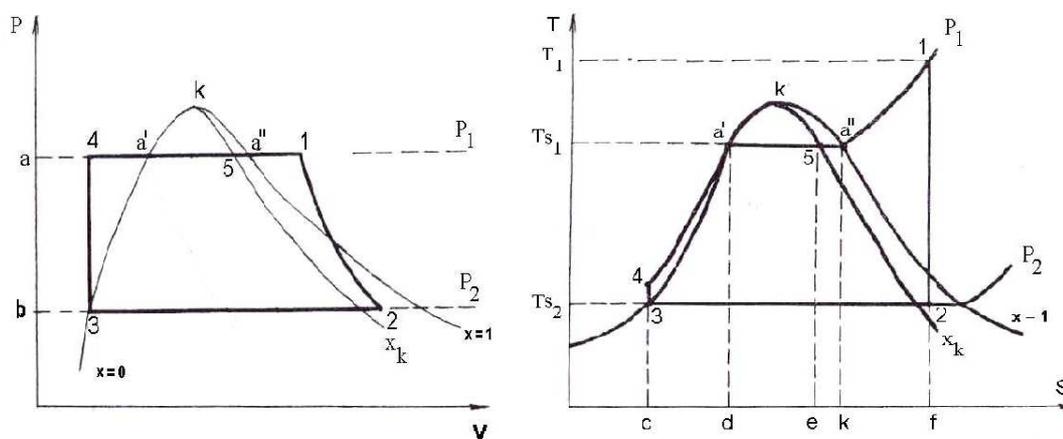


Рис. 5.2 PV и TS-диаграммы цикла Ренкина.

Процесс конденсации в цикле Ренкина доводится до конца, т.е. до получения насыщенной жидкости при постоянном давлении P2 (точка 3). Жидкость поступает в насос Н, где адиабатно сжимается до высокого давления P1 (процесс 3-4) и подается в паровой котел ПК, где вначале вода нагревается до температуры насыщения t_{s1} (процесс 4- a'), а затем идет процесс парообразования (процесс $a'-5$).

Теоретическая работа сжатия L_c воды в насосе Н ($a'43a'$) очень мала (вода практически несжимаема, вся затрачиваемая работа в насосе идет на проталкивание воды, удельный объем воды невелик, поэтому работа проталкивания $(P_1-P_2)V$ мала).

Процесс 3-4 в насосе вырождается в точку, если пренебречь ничтожно малым повышением температуры при адиабатном сжатии воды от P2 до P1, т.е. точка 4 (ненасыщенная жидкость давления P1) совпадает с точкой 3 (насыщенная жидкость давления P2).

После насоса ненасыщенная жидкость (точка 4) нагревается до температуры насыщения t_{s1} (точка a'), соответствующей давлению в котле P1. Теплота q_1 подводится в паровой котле ПК (процесс 4- a') и пароперегревателе ПП (процесс 5-1) – площадь $c4a'a''1fc$, которая включает в себя

теплоту подогрева воды в котле ($c4a'dc$) – процесс 4- a' ,
теплоту парообразования в котле ($da'5cd$) – процесс $a'-5$,
подсушку пара в пароперегревателе ($c5a''rc$) – процесс 5- a'' ,
перегрев пара в пароперегревателе ($ka''1fk$) – процесс $a''-1$.

Полезная работа цикла представляет собой разность работ турбины и насоса $L_c = L_t - L_n = q_1 - q_2$

и выражается площадью 12341 на диаграмме PV и площадью 1234 $a'a''1$ на диаграмме TS.

В h_s -диаграмме (рис. 5.3) процессы подвода и отвода теплоты определяются как разность энтальпий:

$$Q_1 = h_1 - h_4,$$

$$Q_2 = h_2 - h_3,$$

$$L_c = h_1 - h_4 - h_2 + h_3 = h_1 - h_2, \text{ т.к. } h_3 = h_4.$$

Разность энтальпий $(h_1 - h_2)$ определяет удельную работу пара в турбине и называется *располагаемым теплопаданием*.

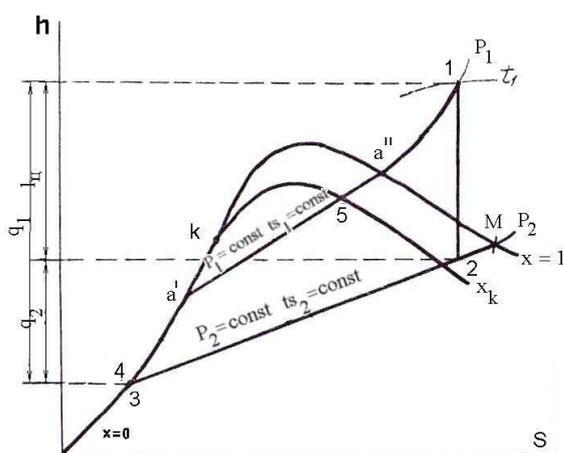


Рис. 5.3 h-s диаграмма цикла Ренкина

Термический к.п.д. цикла Ренкина с перегретым паром

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_4} = \frac{L_{ц}}{q_1}$$

Решение примеров.

Дано: Давление пара в котле и пароперегревателе P_1 , температура перегретого пара t_1 , давление пара в конденсаторе P_2 и степень сухости пара на выходе из котла X_k (Табл.5.2). Необходимо рассчитать цикл Ренкина паросиловой установки.

Построение цикла Ренкина начинается с построения пограничной кривой жидкости. Из справочника по теплофизическим свойствам воды и водяного пара необходимо выписать 10-15 промежуточных давлений в интервале P_1 - P_2 и соответствующих им параметров в таблицу 5.1.

Табл.5.1

P	ts	Ts	h'	S'	h''	S''	r
P1							
P2							
Ркр							

К параметрам насыщенной воды относятся обозначения с одним штрихом, к параметрам сухого насыщенного пара – с двумя штрихами.

Используя сплайновую интерполяцию (математический пакет MathCad) необходимо построить пограничную кривую жидкости ОК (параметры h' , S') и пограничную кривую пара КМ (параметры h'' , S'').

Необходимо обозначить точки

3 (характеризует состояние насыщенной жидкости при давлении P_2),

a' (характеризует состояние насыщенной жидкости при давлении P_1).

На пограничной кривой пара точки a'' и М соответствуют состоянию сухого насыщенного пара при давлении P_1 и P_2 .

В области влажного пара изобары (изотермы) представляют собой прямые линии. Соединив прямой линией точки a' и a'' , получим изобару P_1 , соединив точки 3 и М – изобару P_2 в области влажного пара.

Точка 1 (перегретый пар на выходе из пароперегревателя или на входе в турбину) находится на пересечении изобары P_1 и изотермы t_1 . Изобара P_1 после точки a'' не является прямой, так как соответствует условиям перегретого пара.

Изобара P1 состоит из участков:

4 - a' область ненасыщенной жидкости,

a' - a'' – область влажного пара,

a'' - 1 – область перегретого пара.

В паровой турбине происходит процесс адиабатного расширения пара от P1 до P2 при постоянной энтропии, чему соответствует вертикальная линия из точки 1 до пересечения ее с изобарой P2. Точка 2 характеризует состояние пара на входе в конденсатор. Процесс конденсации пара происходит при постоянном давлении P2 (и постоянной температуре) изображается отрезком прямой 2-3.

Адиабатный процесс сжатия воды от p2 до P1 в насосе изображается отрезком 3-4, однако этот процесс вырождается в точку (совпадение точек 3 и 4).

Процесс в паровом котле 4-5 – на изобаре P1 необходимо найти точку 5, соответствующую сухому пару на выходе из котла.

$$h_5 = h' + rX_k,$$

$$S_5 = S''X_k + S'(1-X_k),$$

Величины h' , r , S' , S'' берутся из справочника по теплофизическим свойствам воды и водяного пара для давления P1.

Оставшийся отрезок изобары P1 (5-1) соответствует процессу в пароперегревателе и состоит из двух участков:

5 - a'' – подсушка пара

a'' 1 – перегрев пара.

В результате получается круговой процесс 1234a'5a''1, соответствующий циклу Ренкина.

Количество отведенной теплоты $q_2 = h_2 - h_3$

Степень сухости пара в точке 2 $x_2 = (S_2 - S') / (S'' - S')$, причем $S_2 = S_1$

Энтальпия пара в точке 2 $h_2 = h' + r x_2$

Значения S' , S'' , h' , r берутся из таблицы для P2.

Расчет цикла Ренкина сводится к определению:

- Количества теплоты, подведенной в цикле,
- Количества теплоты, подведенной только в котле,
- Количества теплоты, подведенной только в пароперегревателе,
- Количества теплоты, отведенной в цикле,
- Термического к.п.д. цикла Ренкина,
- Удельного расхода пара,
- Полезной работы цикла,
- Адиабатного тепловыпадения.

Табл. 5.2

№	P1, МПа	P2, кПа	T1, °C	Xk
1	1,0	20	380	0,90
2	1,2	18	390	0,91
3	1,4	16	400	0,92
4	1,5	14	410	0,93
5	1,6	12	420	0,94
6	1,8	10	430	0,95
7	2,0	8	440	0,96
8	2,2	6	450	0,97
9	2,4	20	380	0,98
10	2,5	18	390	0,97
11	2,6	16	400	0,96

12	2,8	14	410	0,95
13	3,0	12	420	0,94
14	1,0	10	430	0,93
15	1,2	8	440	0,92
16	1,4	6	450	0,91
17	1,5	20	380	0,90
18	1,6	18	390	0,91
19	1,8	16	400	0,92
20	2,0	14	410	0,93

Контрольные вопросы

1. Какие агрегатные состояния воды используются в установках, работающих по циклу Ренкина?
2. Какие термодинамические процессы последовательно происходят в установках, работающих по циклу Ренкина?
3. Что из себя представляют пограничные кривые воды и пара?
4. Каковы особенности адиабатного расширения пара в паровой турбине?
5. Каковы особенности адиабатного сжатия воды в насосе?
6. Из каких условий определяется термический к.п.д. цикла Ренкина?
7. Что из себя представляет степень сухости пара?
8. Для каких целей служит конденсатор в установках, работающих по циклу Ренкина?
9. При каких условиях происходит процесс конденсации пара в конденсаторе?
10. В каком устройстве вода доводится до состояния сухого насыщенного пара?

Практическое занятие № 6

6. Термодинамические процессы в двигателях внутреннего сгорания

Цель работы: Изучение термодинамических процессов в ДВС.

План проведения занятия:

1. Рассмотрение теоретических сведений
2. Решение примеров.
3. Ответы на контрольные вопросы

Краткие теоретические сведения

Тепловой двигатель – превращает теплоту в работу. Необходимая для перевода в работу теплота получается при сгорании жидких, твердых или газообразных топлив. В зависимости от места сгорания топлива различают:

- **двигатели внешнего сгорания** (паровые машины и турбины) – сгорание вне тепловой машины
- **двигатели внутреннего сгорания** - процесс сгорания осуществляется в рабочем пространстве машины.

Карно указал на возможность создания ДВС (1824 г.).

Ленуар (1860 г.) построил первый ДВС, работающий на светильном газе, но без предварительного сжатия рабочего тела (низкий КПД).

Отто построил бензиновый двигатель (1877 г.).

Дизель разработал двигатель, работающий на керосине, который распылялся в цилиндре

воздухом высокого давления от компрессора (1897 г.).

Тринклер построил безкомпрессорный двигатель со смешанным сгоранием топлива (1904 г.). Этот двигатель получил самое широкое распространение во всем мире.

Реальные и идеальные циклы.

Рабочим телом в ДВС являются в начале воздух или смесь воздуха с топливом, а в конце – смесь газов, образовавшаяся при сгорании топлива. Теплота к рабочему телу подводится от сжигаемого топлива внутри цилиндров двигателя, в которых расширяющийся от нагревания газ перемещает поршень. Полученная газом энергия частично расходуется на совершение механической работы, остальная часть отдается окружающей среде.

Основные элементы поршневого ДВС - цилиндр 1 с поршнем 2, возвратно-поступательное движение которого преобразуется во вращательное движение коленчатого вала 8 с помощью кривошипно-шатунного механизма 6, 7 (рис. 6.1). В верхней части цилиндра размещены впускной 4 и выпускной 5 клапаны, приводимые в движение от главного вала двигателя, а также свеча зажигания 3 топливной смеси (или форсунка для распыления топлива). Помимо этого у ДВС имеются механизм газораспределения, системы питания топливом, зажигания, смазки, охлаждения и регулирования (на рисунке не показаны).

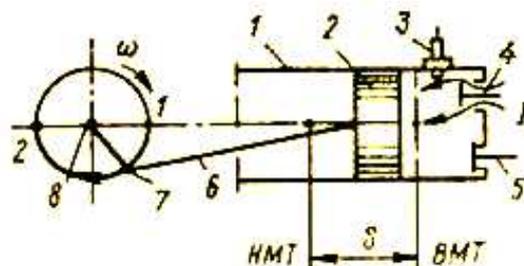


Рис. 6.1. Схема поршневого ДВС

Мертвые точки - два крайних положения в возвратно-поступательном движении поршня: верхнее и нижнее, в которых поршень меняет направление движения на обратное.

Ход поршня S - расстояние между мертвыми точками

Такт - перемещение поршня из ВМТ в НМТ или наоборот.

Рабочий объем цилиндра - внутренний объем цилиндра в пределах хода поршня.

Камера сгорания - часть объема цилиндра, заключенная между крышкой и торцом поршня, находящегося в ВМТ.

Рабочая смесь - смесь распыленного в воздухе топлива, предназначенного для сжигания. Процесс приготовления рабочей смеси – смесеобразование. По способу приготовления горячей смеси ДВС подразделяются на две группы:

- внешнее смесеобразование - карбюраторные и газовые двигатели. Рабочая смесь приготавливается в специальном устройстве – карбюраторе (при работе на бензине или керосине) или смесителе (при работе на газовом топливе). В этом случае в камеру сгорания подается уже готовая рабочая смесь, которая воспламеняется принудительно от электрической искры (свечи зажигания).
- внутреннее смесеобразование - приготовление рабочей смеси происходит внутри рабочего цилиндра, куда воздух и топливо подаются отдельно. Сначала поршень сжимает чистый воздух до давления 3-4 МПа, вследствие чего его температура в конце сжатия достигает 600-650 °С, затем в камеру сгорания через форсунку впрыскивается жидкое топливо (дизельное или моторное), которое воспламеняется при смешении с раскаленным воздухом.

По способу осуществления цикла ДВС могут быть двух- и четырехтактными. В **четырёхтактном двигателе** рабочий цикл осуществляется за четыре хода поршня (такта), т.е. за два оборота вала, а в **двухтактном двигателе** – за два хода (такта) поршня, т.е.

один оборот коленчатого вала.

Индикаторная диаграмма - диаграмма, в которой дается изменение давления в цилиндре в зависимости от положения поршня (объема) за весь цикл.

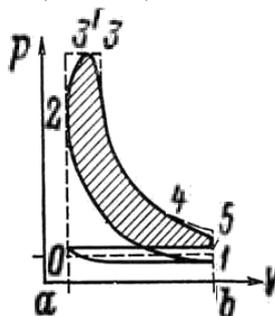


Рис. 6.2. Действительная индикаторная диаграмма четырехтактного двигателя.

- 0-1 – заполнение цилиндра воздухом (при внутреннем смесеобразовании) или рабочей смесью (при внешнем смесеобразовании) при давлении несколько ниже атмосферного из-за гидродинамического сопротивления впускных клапанов и всасывающего трубопровода,
- 1-2 – сжатие воздуха или рабочей смеси,
- 2-3'-3 – период горения рабочей смеси,
- 3-4 – рабочий ход поршня (расширение продуктов сгорания), совершается механическая работа,
- 4-5 – выхлоп отработавших газов, падение давления до атмосферного происходит практически при постоянном объеме,
- 5-0 – освобождение цилиндра от продуктов сгорания.

В реальных тепловых двигателях преобразование теплоты в работу связано с протеканием сложных необратимых процессов (трение, химические реакции в рабочем теле, конечные скорости поршня, теплообмен и др.) Термодинамический анализ такого цикла невозможен.

Теоретические циклы - обратимые термодинамические процессы, допускающие применение для их анализа термодинамических методов

Допущения, используемые для теоретических циклов:

- 1) циклы замкнуты (в действительности продукты сгорания удаляются в атмосферу, а на их место поступает новое рабочее тело).
- 2) Рабочее тело – идеальный газ с постоянной теплоемкостью.
- 3) Подвод теплоты осуществляется от внешних источников теплоты, а не за счет сжигания топлива (аналогично отвод теплоты).
- 4) Механические потери (трение, потери теплоты) отсутствуют.
- 5) Процессы 0-1 и 5-0 исключают из рассмотрения, т.к. работа в них практически одинаковая, только имеет разный знак.

Анализ циклов тепловых двигателей проводится в два этапа: анализируется

- эффективность теоретического (обратимого) цикла,
- реальный (необратимый) цикл с учетом основных источников необратимости.

Для ДВС рассматривают следующие основные циклы:

- а) цикл Отто - подвод теплоты при постоянном объеме ($v = \text{const}$);
- б) цикл Дизеля - подвод теплоты при постоянном давлении ($p = \text{const}$);
- в) цикл Тринклера - смешанный подвод теплоты при $v = \text{const}$ и $p = \text{const}$.

Цикл со смешанным подводом теплоты – цикл Тринклера – характерен для бескомпрессорных двигателей тяжелого топлива. Особенности: механическое распыление

горючего (с помощью плунжерного насоса), внутреннее смесеобразование, самовоспламенение от сжатого до высокой температуры воздуха. Это теоретический цикл всех современных транспортных и стационарных дизелей.

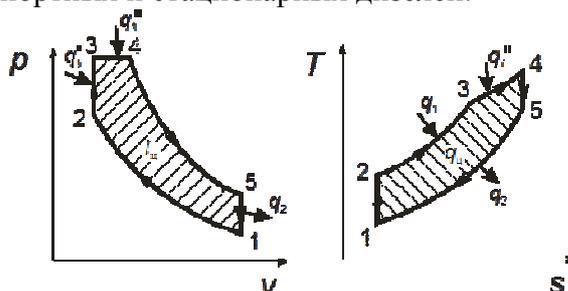


Рис. 6.3. Цикл Тринклера. Рабочая ($p-v$) и тепловая ($T-s$) диаграммы.

- 1-2 – адиабатное сжатие,
- 2-3 – изохорный подвод теплоты,
- 3-4 – изобарный подвод теплоты,
- 4-5 – адиабатное расширение,
- 5-1 – изохорный отвод теплоты.

Характеристики цикла

$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$	степень сжатия	отношение объемов в начале и конце процесса сжатия 1-2
$\lambda = \frac{p_3}{p_2}$	степень повышения давления	отношение давлений в процессе изохорного подвода теплоты
$\rho = \frac{v_4}{v_3}$	степень предварительного расширения	отношение объемов в процессе изобарного подвода теплоты

При анализе считают известными: состояние рабочего тела в т.1 (T_1, p_1) и характеристики цикла $\varepsilon, \lambda, \rho$. Вместо одной из характеристик может быть задана максимальная температура или максимальное давление.

Расчет цикла заключается в определении:

- параметров состояния рабочего тела в характерных точках цикла (p, T, v),
- энергетических характеристик цикла: подводимой удельной теплоты q_1 , отводимой удельной теплоты q_2 , цикловой работы $l_{ц}$ и термического КПД цикла

процесс 1-2 точка 2	адиабатное сжатие	$p v^k = \text{const}$, или $p_1 v_1^k = p_2 v_2^k$ $p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k = p_1 \varepsilon^{k_c}$	$T v^{k-1} = \text{const}$, или $T_1 v_1^{k-1} = T_2 v_2^{k-1}$ $T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\varepsilon} = T_1 \varepsilon^{k_c - 1}$
процесс 2-3 точка 3	изохорный процесс подвод теплоты	$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2}$ $p_3 = p_2 \cdot \lambda = p_1 \varepsilon^{k_c} \lambda$	$T_3 = T_2 \cdot \frac{p_3}{p_2} = T_2 \lambda = T_1 \varepsilon^{k_c - 1} \lambda$
процесс 3-4 точка 4	изобарное расширение подвод теплоты	$\frac{v_4}{v_3} = \frac{T_4}{T_3}$ $p_4 = p_3$	$T_4 = T_3 \cdot \frac{v_4}{v_3} = T_3 \cdot \rho = T_1 \cdot \lambda \rho \varepsilon^{k_c - 1}$

процесс 4-5 точка 5	адиабатное расширение	$p_4 v_4^k = p_5 v_5^k$ $p_5 = p_4 \frac{v_4^k}{v_5^k} = p_4 \frac{v_4}{v_3} \frac{v_3^k}{v_5^k} = p_4 \rho \frac{v_3}{v_1}$ $p_5 = p_4 \frac{\rho^k}{\varepsilon^k} = p_1 \varepsilon^k \lambda \frac{\rho^k}{\varepsilon^k} = p_1 \lambda \rho^k$	
процесс 5-1 точка 5	изохорной процесс		$\frac{p_5}{p_1} = \frac{T_5}{T_1}$ $T_5 = T_1 \cdot \frac{p_5}{p_1} = T_1 \cdot \lambda \rho^k$

Удельный объем v в каждой точке определяется из уравнения Клапейрона.

$$pv = RT$$

Подводимая теплота

В цикле Тринклера теплота подводится в процессах: 2-3 ($v=\text{const}$) и 3-4 ($p=\text{const}$), поэтому

$$q_1 = q_1' + q_1'' = c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3)$$

$$q_1 = c_v(T_1 \lambda e^{k-1} - T_1 e^{k-1}) + c_p(T_1 \lambda \rho e^{k-1} - T_1 \lambda e^{k-1}) = c_v T_1 e^{k-1} [\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)].$$

Отводимая теплота

Теплота отводится в изохорном процессе 4-5.

$$|q_2| = c_v(T_5 - T_1)$$

$$|q_2| = c_v(T_5 - T_1) = c_v T_1 (\lambda \rho^k - 1).$$

Разница между подводимой и отводимой теплотой равна площади цикла на тепловой диаграмме:

$$q_{*} = q_1 - |q_2|$$

Работа цикла

Работа цикла равна разнице между подводимой и отводимой теплотой:

$$L_{\text{ц}} = q_1 - |q_2| = c_v T_1 \{ e^{k-1} [\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)] - (\lambda \rho^k - 1) \}.$$

Графически работа цикла равна площади цикла на рабочей диаграмме

Термический КПД цикла

Термический КПД цикла равен отношению цикловой работы к подводимой теплоте:

$$\eta_t = \frac{l_{\text{ц}}}{q_1} = \frac{q_1 - |q_2|}{q_1}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{c_v T_1 (\lambda \rho^k - 1)}{c_v T_1 e^{k-1} [\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)]} = 1 - \frac{\lambda \rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1} [\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)]}$$

Термический коэффициент полезного действия (КПД) цикла зависит от характеристик цикла ε , λ , ρ и от свойств рабочего тела $k = C_p / C_v$

$$\eta_t = f(\varepsilon, \lambda, \rho, k)$$

Показатель адиабаты k определяется составом продуктов сгорания и изменяется незначительно от 1,33 до 1,37.

Анализ влияния характеристик цикла ε , λ , ρ на КПД

Чем шире температурный диапазон цикла (разница между средними температурами

подвода и отвода теплоты), тем больше его термический КПД.

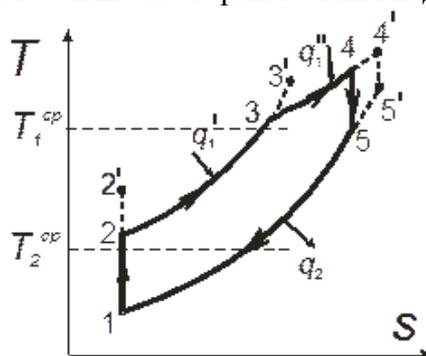


Рис. 6.4. К анализу эффективности цикла Тринклера

При увеличении степени сжатия конечная точка процесса 1-2 сместится в т.2' (рис. 4). Средняя температура подвода теплоты T_{1CP} при этом увеличится, как и термический КПД.

$$\epsilon \uparrow; 1-2 \rightarrow 1-2'; T_1^{cp} \uparrow \rightarrow \eta_t \uparrow$$

Для цикла Тринклера степень сжатия изменяется в пределах: $\epsilon = 10 \dots 13$

С увеличением степени повышения давления конечная точка процесса 2-3 сместится в т.3'. Средняя температура подвода теплоты T_{1CP} увеличивается, как и термический КПД.

$$\lambda \uparrow; 2-3 \rightarrow 2-3'; T_1^{cp} \uparrow \rightarrow \eta_t \uparrow$$

Обычно $\lambda \approx 2$.

С увеличением степени предварительного расширения конечная точка процесса 3-4 сместится в т.4'. Надо отметить, что для замкнутости цикла т. 5 необходимо сместить в т. 5'. При этом увеличиваются средняя температура подвода теплоты T_{1CP} и средняя температура отвода теплоты T_{2CP} .

T_{2CP} растет быстрее (по изохоре), T_{1CP} растет медленнее (по изобаре).

Температурный диапазон цикла сузится и термический КПД уменьшится.

$$\rho \uparrow; 4-5 \rightarrow 4'-5'; T_1^{cp} \uparrow \rightarrow T_2^{cp} \uparrow; \Delta T_{cp} \downarrow; \eta_t \downarrow$$

Увеличение степени предварительного расширения снижает термический КПД. На практике ρ стараются уменьшить: $\rho = 1,1 \dots 1,9$.

Конструкция двигателя, работающего по циклу Тринклера, включает «предкамеру» (рис. 6.5). После сжатия воздуха в «предкамеру» подается под высоким давлением топливо и происходит быстрое сгорание приготовленной смеси при постоянном объеме, а потом происходит сгорание горючего при постоянном давлении по мере его поступления в камеру сгорания.

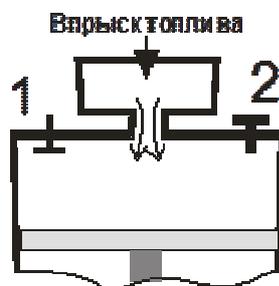


Рис. 6.5. Схема ДВС, работающего по циклу Тринклера

Цикл бензиновых ДВС с внешним смесеобразованием и принудительным искровым зажигание горючей смеси (применяют на легковом автотранспорте).

Характеристики цикла

$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$	степень сжатия
$\lambda = \frac{P_3}{P_1}$	степень повышения давления

Параметры состояния рабочего тела в характерных точках цикла определяются аналогично рассмотренному ранее циклу Тринклера

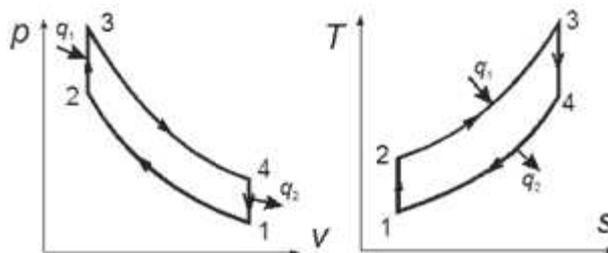


Рис. 6.6. Цикл Отто. Рабочая (p - v) и тепловая (T - s) диаграммы.
1-2 – адиабатное сжатие, 2-3 – изохорный подвод теплоты,
3-4 – адиабатное расширение, 4-1 – изохорный отвод теплоты

$q_1 = c_v(T_3 - T_2)$	Подводимая теплота
$ q_2 = c_v(T_3 - T_1)$	Отводимая теплота
$l_v = q_1 - q_2 $	Работа цикла
$\eta_t = \frac{l_v}{q_1} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\lambda-1}}$	Термический КПД цикла

Чем больше степень сжатия ε , тем выше эффективность цикла. Увеличение ε в карбюраторных двигателях ограничено наступлением детонации (взрывного сгорания), которая зависит от температуры самовоспламенения горючей смеси и конструктивных особенностей камеры сгорания, поэтому $\varepsilon = 6 \sim 12$.

Цикл компрессорных дизелей - ДВС тяжелого топлива (дизельного, солярного и др.) с внутренним смесеобразованием и самовоспламенением горючего от сжатого до высокой температуры воздуха. Горючее распыляется воздухом, подаваемым в цилиндр компрессором. Из-за больших габаритов и веса компрессорные дизели применяются на судах и в качестве стационарных установок электростанций.

Характеристики цикла

$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$	степень сжатия
$\rho = \frac{v_1}{v_3}$	степень предварительного расширения

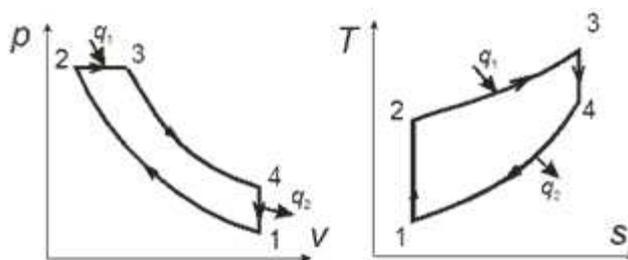


Рис. 6.7. Цикл Дизеля. Рабочая (p - v) и тепловая (T - s) диаграммы
 1-2 – адиабатное сжатие, 2-3 – изобарный подвод теплоты,
 3-4 – адиабатное расширение, 4-1 – изохорный отвод теплоты

$q_1 = c_p(T_3 - T_2)$	Подводимая теплота
$ q_2 = c_v(T_3 - T_1)$	Отводимая теплота
$l_q = q_1 - q_2 $	Работа цикла
$\eta_t = \frac{l_q}{q_1} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{(\rho^\kappa - 1)}{\kappa(\rho - 1)}$	Термический КПД цикла

Верхний предел ε ограничивается в дизелях быстрым увеличением давления. Применяют значения $\varepsilon = 14 \sim 25$. Увеличение ρ отрицательно влияет на повышение эффективности цикла. По мере совершенствования процессов смесеобразования и горения ρ уменьшается.

Решение примеров.

Дано: начальное давление – $P_1 = 0,09 \text{ МПа}$; начальная температура – $T_1 = 270 \text{ К}$;
 степень сжатия – $\varepsilon = 16$; степень повышения давления – $\lambda = 1,6$;
 степень предварительного расширения – $\rho = 1,9$; рабочее тело – воздух;
 $R_v = 287 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; $c_p = 1,01 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$; $c_v = 0,72 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$;
 $n_1 = 1,32$ (сжатие); $n_2 = 1,4$ (расширение).

1. Рассчитать: Цикл ДВС с подводом теплоты при $p = \text{const}$.

Определить:

параметры состояния (p , v , T) рабочего тела в характерных точках цикла;
 удельную работу расширения, сжатия, работу цикла;
 удельное количество подведенной и отведенной теплоты;
 изменение внутренней энергии (u), энтальпии (h) и энтропии (s) в процессах цикла,
 среднее индикаторное давление в цикле (p_i); термический КПД цикла Карно.

Допущения:

- процессы протекают во всех стадиях с постоянным количеством рабочего тела;
- процесс сгорания заменяется подводом теплоты к рабочему телу через стенки цилиндра от некоторого фиктивного горячего источника теплоты (химический состав рабочего тела постоянен при всех стадиях термодинамического цикла);
- процессы сжатия и расширения рабочего тела принимаются адиабатными;
- удаление отработавшего рабочего тела заменяется отводом теплоты от рабочего тела через стенки цилиндра к холодному источнику теплоты (холодильнику);
- теплоемкости рабочих тел не зависят от температуры;
- рабочим телом является идеальный газ.

Цикл ДВС с подводом теплоты при $p = \text{const}$.			
точка 1	точка 2	точка 3	точка 4
P_1	$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon}$	$\frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2} = \rho;$ $T_3 = \rho T_2$	$v_4 = v_1$
T_1	$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n_1} = \varepsilon^{n_1};$ $P_2 = P_1 \varepsilon^{n_1}$	$P_2 = P_3$	$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{n_2-1};$ $T_4 = T_3 \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{n_2-1}$
$v_1 = \frac{RT_1}{P_1}$	$T_2 = \frac{P_2 v_2}{R}$	$v_3 = v_2 \rho$	$P_4 = \frac{RT_4}{v_4}$
Удельная работа			
расширения		сжатия	полезная
$l_1 = P_2(v_3 - v_2) + \frac{1}{n_2 - 1}(P_3 v_3 - P_2 v_2)$		$l_2 = \frac{1}{n_1 - 1}(P_1 v_1 - P_2 v_2)$	$l = l_1 + l_2$
Удельное количество теплоты			
подведенной		отведенной	полезной
$q_1 = C_p(T_3 - T_2)$		$q_2 = C_v(T_4 - T_1)$	$q = q_1 - q_2$
КПД цикла			
Термический	Карно	среднее индикаторное давление	
$\eta_t = \frac{q}{q_1}$	$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_3}$	$P_i = \frac{l}{v_1 - v_2}$	
Изменение			
внутренней энергии		энтальпии	энтропии
$\Delta u = C_v(T_4 - T_1)$		$\Delta h = C_p(T_3 - T_2)$	$\Delta s = C_v \ln \frac{T_4}{T_1}$
Средняя интегральная температура			
подвода теплоты		отвода теплоты	
$T_H = \frac{T_3 - T_2}{\ln \frac{T_3}{T_2}}$		$T_H = \frac{T_4 - T_1}{\ln \frac{T_4}{T_1}}$	

2. Рассчитать: Цикл ДВС с подводом теплоты при $v = \text{const}$.

3. Рассчитать: Цикл ДВС со смешанным подводом теплоты.

Исходные данные и допущения для заданий 2 и 3 взять из 1 задания. Таблица расчетных формул составляется исходя из процессов, происходящих для заданных циклов ДВС.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается различие рабочих и тепловых диаграмм термодинамических циклов с подводом теплоты при постоянном объеме (цикл Отто) и при постоянном давлении (цикл Дизеля)?

2. Каковы допущения, используемые для теоретических термодинамических циклов?
3. В чем заключаются особенности термодинамического цикла со смешанным подводом теплоты (цикл Тринклера) применительно к рабочей ($p-v$) и тепловой ($T-s$) диаграммам?
4. Как определить удельное количество подведенной и отведенной теплоты в термодинамическом процессе?
5. Что такое среднее индикаторное давление в цикле?
6. Из каких основных узлов состоит поршневой ДВС?
7. Какие типы ДВС существуют и какие термодинамические циклы с ними связаны?
8. Какие характерные точки выделяют на термодинамических циклах ДВС?

Практическое занятие № 7

7. Поршневые газовые машины. Двигатель Стирлинга.

Цель работы: Изучение принципа действия газовых двигателей поршневого типа.

План проведения занятия:

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Ответы на контрольные вопросы.

Краткие теоретические сведения

Недостатком большинства тепловых машин с однофазным рабочим телом является то, что температура рабочего тела растет с подводом теплоты, а при отводе теплоты – уменьшается. Максимальная температура в процессе подвода теплоты значительно выше средней температуры в нем, а минимальная температура в процессе отвода теплоты – значительно ниже средней температуры. КПД такой тепловой машины значительно ниже максимально возможного значения КПД, которым является КПД цикла Карно с подводом теплоты при температуре нагревателя (максимальной температуре цикла) и отводом теплоты при температуре охладителя (минимальной температуре цикла).

Особенностью рабочих процессов всех ДВС является то, что рабочее тело в цикле претерпевает химические превращения и требует замены, то есть для работы ДВС необходим или постоянный контакт с атмосферой, или необходимо иметь запас рабочего тела и предусмотреть технические устройства для отвода выпускных газов.

В принципе существует возможность создать тепловую машину, работающую по циклу Карно (рис. 7.1). Рабочим телом ее будет являться двухфазный теплоноситель. Однако ей будут свойственны два серьезных недостатка. В ее состав должны входить машины расширения и сжатия, работающие в двухфазной области с недопустимо малым ресурсом. Кроме того, максимальная температура подвода теплоты ограничена критической температурой рабочего тела, а для того, чтобы хотя бы приблизиться к этому ограничению, необходимо работать с большими максимальными давлениями цикла. Паровые машины, работающие по циклу Ренкина (паротурбинному), за счет некоторого уменьшения КПД избавлены от первого недостатка машины Карно. Однако ограничение по максимально допустимому давлению сильно ограничивает их КПД.

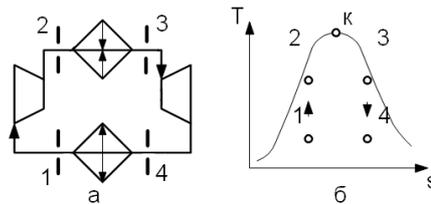


Рис. 7.1. Машина Карно: а – конструкция; б – цикл

Двигатель Стирлинга – это газовый двигатель поршневого типа, сочетающий в себе высокий КПД цикла Карно, независимость от источника паровых машин с отсутствием жестких ограничений по максимальной температуре рабочего тела.

Достоинства двигателя Стирлинга:

- КПД, равный КПД цикла Карно, что делает эффективной работу двигателя даже при относительно небольшой разнице температур между источником и стоком теплоты;
- независимость рабочих процессов в двигателе от источника теплоты;
- возможность работы при незаменяемом рабочем теле;
- относительно небольшое максимальное давление цикла;
- низкий шум работы.

Недостатки двигателя Стирлинга:

- так как источник теплоты – внешний, то двигатель медленно реагирует на изменение подводимого теплового потока и переход от одного режима работы к другому продолжается долго, что затрудняет применение двигателей данного типа в транспортных средствах;
- двигатель Стирлинга требует больших размеров охладителей по сравнению с ДВС, обладает по сравнению с ДВС меньшей удельной мощностью при примерно равном КПД;
- двигатель Стирлинга дороже аналогичного ДВС.

На нынешнем этапе технического развития двигателя Стирлинга не выдерживают конкуренции двигателей других типов и используются там, где двигатели других типов малоприменимы. В настоящее время двигатели Стирлинга используются:

- в тепловых электростанциях малой мощности. Используется возможность эффективной работы при малой разнице температур между источником и стоком теплоты. Источником теплоты энергии могут являться выхлопные газы, горячая вода технологического происхождения или гейзеры и т.п. Электростанции данного типа успешно производит новозеландская компания WhisperGen;
- в солнечных электростанциях. В 2005 г. В Калифорнии (США) был принят план по строительству солнечных электростанций с двигателем Стирлинга общей мощностью 500 МВт. Площадь зеркал концентраторов этих электростанций должна составить примерно 19 км².
- в силовых установках подводных лодок. Подводные лодки класса «Готланд» (Швеция, серия с 1996 г.) оснащены двумя двигателями Стирлинга типа V4-275R. Эти двигатели, работающие на смеси дизельного топлива и перекиси водорода, позволяют лодке поддерживать подводный ход в течение 20 суток без всплытия и связи с атмосферой.
- - в радиоизотопных силовых установках космических аппаратов. Примером может являться силовая установка SRG (NASA, США). Источником теплоты в ней служит капсула с плутонием-238 весом 1,44 кг. Электрическая мощность установки – 100...120 Вт.

Идеализированный цикл и конструкция двигателя Стирлинга.

Двигатель Стирлинга использует в качестве рабочего тела обычный газ. На рис. 7.2

представлен его идеализированный цикл, а возможные конструкции на рис. 7.3. Особенностью двигателя Стирлинга является наличие двух полостей – горячей, к которой подводится теплота, и интенсивно охлаждаемой холодной. Эти полости соединены каналом, в котором установлен регенератор.

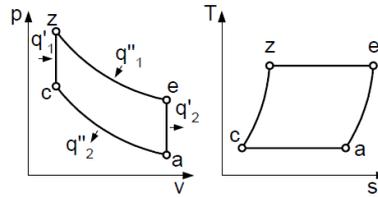


Рис. 7.2. Идеальный цикл Стирлинга

Идеальный цикл Стирлинга состоит из четырех процессов:

- изохорный процесс сжатия с-z, - вытеснение рабочего тела из холодной полости в горячую через регенератор;
- изотермический процесс подвода теплоты z-e, - подвод теплоты к рабочему телу в горячей полости;
- изохорный процесс расширения e-a, вытеснение рабочего тела из горячей полости в холодную через регенератор;
- изотермический процесс отвода теплоты а-с, - отвод теплоты от рабочего тела в холодной полости.

Предположим, что рабочее тело – идеальный газ. Тогда работа цикла будет

$$l_t = RT_z \ln \frac{V_c}{V_z} - RT_a \ln \frac{V_c}{V_z}$$

Соответственно термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{l_t}{q_1''} = 1 - \frac{T_a \ln(V_a/V_c)}{T_z \ln(V_e/V_z)}$$

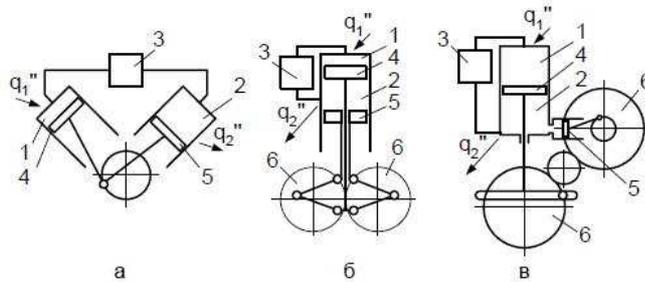


Рис. 7.3. Типы двигателей Стирлинга: а - α ; б - β ; в - γ .

1 – горячая полость; 2 – холодная полость; 3 – регенератор; 4 – поршень; 5 – вытеснитель; 6 – шестерня.

Так как изохоры идеального газа на s-T-диаграмме эквидистантны, то

$$\frac{V_a}{V_c} = \frac{V_e}{V_z} \quad \eta_t = 1 - \frac{T_a}{T_z}$$

Среднее термодинамическое давление цикла

$$p_t = \frac{l_t}{V_a - V_c} = p_a \cdot (\Theta - 1) \cdot \frac{\epsilon}{\epsilon - 1} \cdot \ln \epsilon$$

где степень нагрева газа в цикле и степень сжатия

$$\Theta = \frac{T_a}{T_z} \quad \epsilon = \frac{V_a}{V_c}$$

Конструктивно выделяют три основных типа двигателей Стирлинга (рис. 7.3).

- α -Стирлинг содержит два отдельных силовых поршня в отдельных цилиндрах. Один поршень – горячий, другой – холодный. Цилиндр с горячим поршнем

находится в теплообменнике с более высокой температурой, в то время как цилиндр с холодным поршнем находится в более холодном теплообменнике. Он обеспечивает наибольшую удельную мощность, но в силу высоких температур конструкции горячего поршня малоприменим.

- γ -Стирлинг располагает поршнем и вытеснителем и двумя цилиндрами – одним холодным (там движется поршень, с которого снимается мощность), а другим горячим с одного конца и холодным с другого (там движется вытеснитель). Регенератор соединяет горячую часть второго цилиндра с холодной и одновременно с первым (холодным) цилиндром. γ -Стирлинг имеет наименьшую удельную мощность из всех типов.
- β -Стирлинг наиболее распространенный тип двигателя. У двигателя β -типа цилиндр всего один, горячий с одного конца и холодный с другого. Внутри цилиндра движутся поршень (с которого снимается мощность) и вытеснитель, изменяющий объем горячей полости. Газ перекачивается из холодной части цилиндра в горячую через регенератор. Чаще всего двигатели данного типа используют ромбический привод, обеспечивающий связь поршня и вытеснителя с валом съема мощности.

Рабочим телом в двигателях может служить любой газ или газовая смесь. В описанных конструкциях использовались воздух, водород, гелий, криптон, двуокись углерода и двухфазные смеси.

Воздух является наиболее дешевым рабочим телом в земных условиях. Установки с воздухом в качестве рабочего тела наиболее просты и дешевы. Гелий и водород обладают малой вязкостью и высокой теплопроводностью, мало зависящей от давления, позволяет получать минимальные гидравлические потери. Но они обладают высокими удельными объемами и способностью проникать через уплотнения и конструкционные материалы, водород в земных условиях пожароопасен. Криптон и двуокись углерода использовались как химически инертные газы, не обладающие способностью проникать через уплотнения гелия. Использование двухфазных смесей позволяет получать большие коэффициенты теплопередачи со стенками и уменьшить размеры теплообменных поверхностей или ускорить рабочие процессы.

При испытаниях силовой установки космического аппарата при различных рабочих телах КПД составил: для воздуха – 29,4%, для гелия – 35,1%, для водорода – 40%.

Расчет параметров цикла Стирлинга

В реальном цикле только часть теплоты процесса e-a передается к рабочему телу в процессе c-z. Обозначим параметры рабочего тела на выходе из генератора a и z (рис. 4). Очевидно, что

$$q_{ea} = q_{cz}.$$

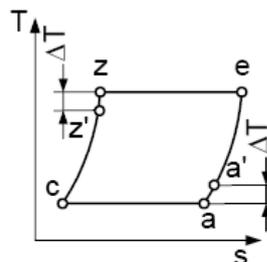


Рис. 7.4. Цикл Стирлинга

Степенью генерации $\eta_{рег}$ называют отношение восстановленного тепла к количеству восстановленного тепла в идеализированном процессе. Если рабочее тело – идеальный газ с постоянной теплоемкостью, то

$$\eta_{\text{рег}} = \frac{T'_Z - T_a}{T_Z - T_a} = \frac{T_Z - T'_a}{T_Z - T_a}$$

Определим T'_Z и T'_a :

$$T'_Z = \eta_{\text{рег}} \cdot T_Z + (1 - \eta_{\text{рег}}) \cdot T_a$$

$$T'_a = \eta_{\text{рег}} \cdot T_a + (1 - \eta_{\text{рег}}) \cdot T_Z$$

Перепад температур

$$\Delta T = T_Z - T'_Z = T'_a - T_a$$

$$\begin{aligned} \Delta T &= T_Z - \eta_{\text{рег}} \cdot T_Z - (1 - \eta_{\text{рег}}) \cdot T_a = (T_Z - T_a) \cdot (1 - \eta_{\text{рег}}) = \\ &= T_a \cdot \left(\frac{T_Z}{T_a} - 1 \right) \cdot (1 - \eta_{\text{рег}}) \end{aligned}$$

$$\Theta = \frac{T_Z}{T_a}$$

где Θ - степень нагрева газа в цикле.

Удельную работу цикла можно определить как разность работ сжатия и расширения

$$I_t := I_{\text{расш}} - I_{\text{сж}}$$

где $I_{\text{расш}} := R \cdot T_Z \cdot \eta_{\text{расш}} \cdot \ln\left(\frac{P_Z}{P_e}\right)$ - удельная работа расширения (процесса z-e),

$I_{\text{сж}} := R \cdot T_a \cdot \frac{1}{\eta_{\text{сж}}} \cdot \ln\left(\frac{P_c}{P_a}\right)$ - удельная работа сжатия (процесса а-с):

$\eta_{\text{расш}}, \eta_{\text{сж}}$ - изотермический КПД процессов расширения и сжатия газа.

Степень повышения давления при сжатии и расширении:

$$\pi_{\text{сж}} := \frac{P_c}{P_a} \quad \pi_{\text{расш}} := \frac{P_Z}{P_e}$$

Коэффициент восстановления полного давления в системе подвода тепла и в системе охлаждения

$$\sigma_{\text{п}}, \sigma_{\text{х}}$$

Давления в конце процессов сжатия и расширения в изохорном процессе:

$$P_Z = P_c \cdot \sigma_{\text{п}} \cdot \Theta \quad P_e = P_a \cdot \frac{\Theta}{\sigma_{\text{х}}}$$

$$\pi_{\text{расш}} = \frac{P_Z}{P_e} = \sigma_{\text{п}} \cdot \sigma_{\text{х}} \cdot \frac{P_c}{P_a} = \sigma_{\text{п}} \cdot \sigma_{\text{х}} \cdot \pi_{\text{сж}}$$

Удельные работы на расширение и сжатие газа

$$I_{\text{расш}} = R \cdot T_Z \cdot \eta_{\text{расш}} \cdot \ln(\sigma_{\text{п}} \cdot \sigma_{\text{х}} \cdot \pi_{\text{сж}})$$

$$I_{\text{сж}} = R \cdot T_a \cdot \frac{1}{\eta_{\text{сж}}} \cdot \ln(\pi_{\text{сж}})$$

$$\Delta I_t = R \cdot T_a \cdot \left(\Theta \cdot \eta_{\text{расш}} \cdot \ln(\sigma_{\text{п}} \cdot \sigma_{\text{х}} \cdot \pi_{\text{сж}}) - \frac{1}{\eta_{\text{сж}}} \cdot \ln(\pi_{\text{сж}}) \right)$$

Удельное количество восстановленной теплоты при регенерации

$$q_{\text{рег}} = \frac{R}{k-1} \cdot T_a \cdot \eta_{\text{рег}} \cdot (\Theta - 1)$$

Для количества теплоты, передаваемого генератором за единицу времени, справедливо

$$G \cdot q_{\text{рег}} = \alpha \cdot F_{\text{рег}} \cdot \Delta T$$

где G – расход рабочего тела в двигателе, кг/с,

α – коэффициент теплоотдачи поверхности регенератора, Вт/(м²·К);

F – площадь поверхности регенератора;

ΔT – перепад температур между холодным и горячим теплоносителем в регуляторе.

$$F_{\text{рег}} = G c_v \eta_{\text{рег}} / (\alpha (1 - \eta_{\text{рег}})).$$

Для реализации идеального цикла Стирлинга с полной регенерацией необходим теплообменник – регенератор бесконечной площади. Поэтому в существующих двигателях Стирлинга степень регенерации не превышает 0,7...0,75.

Удельное количество подведенной теплоты в цикле

$$q_1'' = RT_a \left(\frac{1}{k-1} (\theta - 1) (1 - \eta_{\text{рег}}) + \theta \eta_p \ln(\sigma_p \sigma_x \pi_{\text{сж}}) \right).$$

Удельное количество отведенной теплоты в цикле

$$q_2'' = RT_a \left(\frac{1}{k-1} (\theta - 1) (1 - \eta_{\text{рег}}) + (1/\eta_{\text{сж}}) \ln \pi_{\text{сж}} \right).$$

Термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{l_t}{q_1''} = \frac{\theta \eta_{\text{расш}} \ln(\sigma_p \sigma_x \pi_{\text{сж}}) - (1/\eta_{\text{расш}}) \ln \pi_{\text{сж}}}{\frac{1}{k-1} (\theta - 1) (1 - \eta_{\text{рег}}) + \theta \eta_p \ln(\sigma_p \sigma_x \pi_{\text{сж}})}.$$

В идеальном цикле Стирлинга

$$\eta_{\text{рег}} = \eta_{\text{расш}} = \eta_{\text{сж}} = \sigma_p = \sigma_x = 1,$$

$$\eta_t = 1 - \frac{T_a}{T_z}.$$

Так как удельная работа цикла растет с увеличением степени нагрева газа в цикле и степени повышения давления газа при сжатии, то целесообразно принимать максимальную температуру и давление цикла предельно возможными при принятых конструкционных материалах. В начале XXI века допускалось $T_z = 1000 \dots 1200$ °К.

Массовый расход рабочего тела G , определяющий размеры двигателя, определяют из уравнения баланса мощности.

$$Gq_1'' = \frac{AN_{\text{эл}}}{\eta_t \eta_r \eta_{\text{пр}} \eta_M},$$

где $A = 1,1 \dots 1,3$ – коэффициент, учитывающий затраты электроэнергии на собственные нужды электростанции;

$N_{\text{эл}}$ – электрическая мощность энергоустановки;

η_r – КПД электрогенератора;

$\eta_{\text{пр}}$ – КПД преобразователя электрического тока;

η_M – механический КПД двигателя.

В табл. 1 приведены параметры энергоустановки солнечной электростанции космического аппарата на базе двигателя Стирлинга, спроектированной фирмой «Аллисон» (США) в 90-е годы XX века. КПД установки достаточно большой, удельный вес энергоустановки чрезмерно велик – 64 кг/кВт, что выше аналогичного параметра энергоустановок на базе солнечных батарей.

Таблица 1. Параметры энергоустановки космического аппарата на базе двигателя Стирлинга

Параметр	Значение
Электрическая мощность	4 кВт
Рабочее тело	гелий
Частота вращения ротора	3000 об/мин
Максимальная температура цикла	675 °С
Минимальная температура цикла	66 °С
Максимальное давление цикла	100 бар
КПД цикла	0,375
КПД генератора	0,8
КПД расширения и сжатия	~0,6
Площадь поверхности радиаторов	15 м ²

Масса концентратора	80 кг
Масса преобразователя	80 кг
Масса энергоустановки	258 кг

Контрольные вопросы

1. В чем состоит различие идеального цикла двигателя Стирлинга от цикла ДВС?
2. В чем состоит различие идеального и реального циклов двигателя Стирлинга?
3. В чем состоит конструктивное различие между α ; β ; γ - типами двигателей Стирлинга?
4. Какие газы можно использовать в качестве рабочего тела в двигателях Стирлинга?
5. Из чего складывается удельная работа цикла в двигателях Стирлинга?
6. Как определить удельное количество подведенной и отведенной теплоты в цикле двигателя Стирлинга?

Библиографический список

1. . Основы современной энергетики : учебник для вузов : в 2 т. / под общей редакцией Е.В. Аметистова. - 5-е изд., стер. - М.: Издательский дом МЭИ, 2010. Том 1. Современная теплоэнергетика / А.Д. Трухний и др. Том 2. Современная электроэнергетика / под ред. профессоров А.П. Бурмана и В.А. Строева.
2. Быстрицкий Г.Ф. Общая энергетика: учебное пособие. — Москва: КноРус, 2010. (Библ. ВлГУ)
3. Атомные электростанции: учебное пособие / Зорин В.М.- М.: Изд. дом МЭИ, 2012.
4. Промышленные теплоэнергетические установки и системы: учеб. пособие для вузов / Б.В. Сазанов, В.И. Ситас. - М.: Изд. дом МЭИ, 2014.
5. Атомная энергетика XXI века: учебное пособие / Смирнов Ю.Б., Габараев Б.А., Черепнин Ю.С. М.: Изд. дом МЭИ, 2013.

Интернет-ресурсы

1. <http://stroy-technics.ru/article/termodinamicheskie-tsikly-dvigateli-vnutrennego-sgoraniya>
2. <http://autohis.ru/stirling.php>
3. <http://stringer46.narod.ru/SteamPower.htm>

Оглавление

	стр.
1. Введение.	3
2. Основные определения термодинамики.	4
3. Термодинамические процессы.	9
4. Тепловые электрические станции	13
5. Атомные электрические станции	28
6. Анализ паросилового цикла Ренкина	32
7. Термодинамические процессы в двигателях внутреннего сгорания	37
8. Поршневые газовые машины. Двигатель Стирлинга	46
9. Библиографический список	52
Оглавление	52