

Ю. С. БЕЛЯКОВ

ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА

(конспект лекций)



**Петрозаводск
2011**

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Ю.С. Беляков

ОБЩАЯ ЭНЕРЕТИКА
(конспект лекций)

Петрозаводск
Издательство ПетрГУ
2011

УДК 620.9
ББК 31я73

Рецензенты:

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Петрозаводского государственного университета.

Беляков Ю.С.

Основы энергетики (конспект лекций): учебное пособие. –
Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2011. - 80 с.

В учебном пособии изложен материал, касающийся общих вопросов энергетики. Лекции по этому курсу читаются автором студентам кафедры энергообеспечения предприятий и энергосбережения. Материал может быть полезен и для студентов других специальностей.

Материал данного пособия соответствует государственному стандарту по направлениям «Энергообеспечение предприятий» и «Электроснабжение». Кратко изложены все процессы преобразования энергии, получаемой от первичных энергоносителей, также ее транспорта и доставки до потребителей электрической и тепловой энергии.

© Беляков Ю.С. 2011

© Петрозаводский государственный
университет. 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Лекция 1. Общие вопросы, касающиеся энергии и энергетики.....	5
Лекция 2. Ядерная энергия деления.....	12
Лекция 3. Основные термодинамические процессы.....	15
Лекция 4. Тепловые схемы тепловых электростанций.....	23
Лекция 5. Основные элементы тепловых электростанций.....	27
Лекция 6. Отопление и горячее водоснабжение.....	33
Лекция 7. Атомные электростанции.....	37
Лекция 8. Гидроэлектростанции.....	41
Лекция 9. Ветровые и солнечные электростанции.....	49
Лекция 10. Схемы выдачи мощности электростанциями.....	52
Лекция 11. Электрические сети.....	55
Лекция 12. Потребители электрической и тепловой энергии.....	58
Лекция 13. Потери энергии и вопросы энергосбережения.....	61
Лекция 14. Перспективы развития энергетики.....	64
Приложение 1. Важнейшие даты истории энергетики.....	70
Приложение 2. Общие схемы энергоснабжения.....	74
Приложение 3. Подробная схема ядерной реакции деления.....	76
Приложение 4. Тепловые схемы КЭС и ТЭЦ.....	78
Литература.....	80

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебное пособие изложено в виде конспектов лекций, которые читает автор на кафедре энергообеспечения предприятий и энергосбережения. Материал содержит общие сведения об энергии и энергетике. Приведены основные сведения о первичных энергоносителях. Освещен весь путь преобразований энергии, начиная от энергии первичных энергоносителей и кончая потребителями электрической и тепловой энергии. Значительное внимание уделено физической сути всех описываемых явлений, при этом математический аппарат использован только в самом минимально необходимом уровне. Приняты также значительные упрощения при описании процессов преобразования энергии, при описании принципиальных схем энергоустановок. При этом, однако, сохранена их физическая сущность, что позволит читателям свободно знакомиться с соответствующими специальными курсами.

Ознакомление с лекциями будет полезно для студентов всех энергетических специальностей как с основой их узкой специализации.

ЛЕКЦИЯ 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ, КАСАЮЩИЕСЯ ЭНЕРГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Общие понятия. Энергия определяется, как действие, деятельность, общая мера различных форм движения материи. Это достаточно общее выражение, требующее дополнительных пояснений. В процессе пояснений возникнут новые понятия и невольно будет использовано понятие энергии. В результате образуется замкнутый круг, при определении понятия энергии, необходимо использовать само это понятие. Появляется некая нелинейная задача. Можно сделать вывод, что понятие энергии можно определить только путем ее описания. изложения ее свойств, особенностей, форм взаимодействия материальных объектов, которые возникают с ее помощью.

Энергетика определяется, как отрасль хозяйства, охватывающая энергетические ресурсы, выработку, преобразование, передачу и использование различных видов энергии. Здесь следует, пожалуй, добавить, что энергетика включает в себя и научно-техническое направление, занимающееся изучением сути всех энергетических преобразований, а также созданием новых направлений использования энергии в интересах человека. Известный астрофизик Н.С. Кардашев считает, что уровень развития любой цивилизации определяется уровнем энергии, которой цивилизация может управлять.

Понятие энергии можно определить как следствие силового взаимодействия различных материальных объектов. С некоторой степенью условности физика различает следующие виды взаимодействий:

1. Электромагнитное – взаимодействие между электрически заряженными частицами или телами.
2. Гравитационное – взаимодействие между всеми частицами или телами, имеющими ненулевую массу (покоя или движения)
3. Сильное – взаимодействие между элементарными частицами, именуемыми адронами, практический интерес представляет взаимодействие между протонами и нейтронами.
4. Слабое. Это взаимодействие ответственное за стабильность или распад элементарных частиц. Практический интерес представляет участие слабого взаимодействия в ядерных реакциях, используемых в атомных электростанциях.

Существует связь между силовым взаимодействием материальных объектов и энергией, которой они обмениваются:

$$\frac{dW}{d\xi} = f, \quad (1.1)$$

где W – энергия, f – сила взаимодействия, ξ – обобщенная координата.

В векторной форме и в конкретном трехмерном пространстве эта взаимосвязь выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial W}{\partial x} \cdot \bar{i} + \frac{\partial W}{\partial y} \cdot \bar{j} + \frac{\partial W}{\partial z} \cdot \bar{k} = \bar{f}. \quad (1.2)$$

На основе различных силовых взаимодействий также с некоторой степенью условности различают виды энергии:

1. Механическая
2. Электромагнитная
3. Гравитационная
4. Ядерная
5. Химическая и некоторые другие.

Существует связь энергии с массой, выражаемая формулой:

$$W = m \cdot c^2, \quad (1.3)$$

в этой формуле m – масса материального тела, c – скорость света в вакууме, равная 299792458 м/с. Если массу измерить в кг, то энергия получится в Джоулях. В практических расчетах обычно принимают $c = 300000 \text{ км/с} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

В данном курсе будет рассмотрена энергия и ее преобразования, используемые для целей электроэнергетики и теплоэнергетики, другими словами для электроснабжения и теплоснабжения потребителей. Все остальные вопросы энергетики остаются за пределами настоящего курса.

Классификация источников энергии. В первом приближении все источники энергии можно разделить на две группы. А именно на получаемые или полученные от солнца и получаемые или полученные от других источников.

Рассмотрим виды источников энергии, относящиеся к первой группе.

- Энергия, получаемая непосредственно от солнца электромагнитным путем. Она может приниматься прямо в виде электромагнитного излучения, но может приниматься опосредовано в виде энергии ветра или гидроэнергии рек.

- Энергия солнца, полученная также электромагнитным путем, но ранее, в прошедшие времена и накопленная растительным и животным миром в виде древесины, торфа, каменного угля, биотоплива, возможно горючих сланцев, природного газа и нефти. Последние три источника энергии сопровождаются оговоркой возможно, поскольку до сих пор не ясно их происхождение. Если окажется, что они органического происхождения, то несомненно, что их энергия есть энергия солнца. Если же будет доказано их неорганическое происхождение, то источником их энергии непосредственно солнце быть не может.

Другой вариант классификации источников энергии возможен путем деления их на возобновляемые и не возобновляемые. К первым относят источники, которые функционируют и будут функционировать в течение времени на много порядков больше, чем время существования человеческой цивилизации. К первым относят источники, которые обеспечивают:

- электромагнитную энергию солнца,
- энергию ветра,
- гидроэнергию,

- геотермальную энергию,
- энергию морских и океанических приливов, отливов и волн,
- энергию древесины и биотоплива,
- энергию торфа при условии, что время рекультивации болот будет достаточно для возобновления запасов торфа.

К не возобновляемым источникам относят те, которые имеют ограниченный запас и возобновление этих запасов не происходит или происходит достаточно медленно. К ним относятся:

- нефть,
- каменный уголь, включая все его разновидности,
- природный газ,
- горючие сланцы,
- ядерное топливо.

Те источники энергии, которые свою потенциальную энергию представляют в виде химической энергии и выделяют ее при сгорании, называют топливом. Топливо в свою очередь подразделяется на:

- твердое (уголь, древесина, горючие сланцы),
- жидкое (нефть и ее продукты переработки),
- газообразное (природный газ, попутный газ, доменный газ, биогаз).

Особняком стоит ядерное топливо, которое обычно относят к твердым видам топлива, хотя в упомянутом выше смысле это не топливо, ибо способ извлечения из него энергии не связан с горением.



Потребление топлива в функции времени. История развития человеческой цивилизации это история потребления человечеством энергии. Качественные соображения и количественный анализ показывают, что за всю историю развития человеческой цивилизации наблюдался и наблюдается рост потребления топлива. Примером может служить график потребления топлива, изображенный на рис. 1.1,

представленный Минпромэнерго России в 2007 году. Из приведенного графика видно, что прогноз предполагает-

Рис. 1.1. ... дальнейшее увеличения потребления энергии, по крайней мере в обозримом будущем, выраженное в потреблении количества условного топлива (условное топливо это некоторое абстрактное топливо, которое имеет теплоту сгорания 29.33 МДж/кг). Естественно, что при этом возникает множество вопросов связанных с запасами топлива, использованием возобновляемых источников энергии, охраной окружающей среды и т.п.

Технические характеристики источников энергии. Технические характеристики источников энергии касаются объемов поставки энергии,

мощность потоков энергии, составом различных видов топлива, теплотой сгорания топлива и некоторые другие.

Солнечная энергия. Источник – солнце. Доставка электромагнитным путем. Солнце излучает электромагнитные волны в широком диапазоне частот или в широком диапазоне длин волн. С практической точки зрения представляет интерес ограниченный диапазон длин волн, а именно. Инфракрасное излучение (от 1 мм = 10^{-3} м = 10^6 нм до 750 нм). Видимое излучение (780 – 380 нм). Ультрафиолетовое (380 -10 нм). На инфракрасный диапазон излучения приходится около 50 % всей энергии излучаемой солнцем. В верхней части атмосферы мощность излучения от солнца приходится 1.35 – 1.38 кВт/м². Нетрудно посчитать общую мощность излучения солнца. Радиус земной орбиты $R = 150$ млн км = $1.5 \cdot 10^{11}$ м. Площадь поверхности с этим радиусом $S = 4 \cdot \pi \cdot R^2 = 4 \cdot 3.14 \cdot (1.5 \cdot 10^{11})^2 = 2.826 \cdot 10^{23}$ м². Мощность излучения солнца $P_c = 1.36 \cdot 2.826 \cdot 10^{23} = 3.846 \cdot 10^{23}$ кВт = $3.846 \cdot 10^{26}$ Вт. Теперь можно определить количество вещества солнца расходуемого на излучение, используя формулу (1.3) в исчислении на мощность:

$P_c = m' \cdot c^2$, где m' - секундный расход вещества солнца, откуда следует:

$$m' = \frac{P_c}{c^2} = \frac{3.846 \cdot 10^{26}}{(3 \cdot 10^8)^2} = 4.27 \cdot 10^9 \text{ кг/с} = 4.27 \cdot 10^6 \text{ т/с.}$$

Далее нетрудно проверить, что за 1 млрд. лет ($31.32 \cdot 10^{15}$ с) будет израсходовано $13.31 \cdot 10^{25}$ кг, что при массе солнца $1.985 \cdot 10^{30}$ кг составит 0.006 %. Отсюда можно сделать вывод, что солнце можно действительно считать возобновляемым источником энергии.

Энергия ветра. Ветер представляет собой движение воздуха в атмосфере. Фактически энергия ветра, по сути, преобразованная энергия солнца. Общий объем циркулирующей ветровой энергии оценивается около $3 \cdot 10^{15}$ кВтчасов в год, что соответствует среднегодовой мощности $3.42 \cdot 10^8$ МВт. Эта величина эквивалентна 342000 миллионным энергетическим блокам. Специалисты оценивают возможность использования этой мощности не более чем 1/1000. Основной недостаток энергии ветра заключается в ее неравномерности и непредсказуемости мощности ветрового потока.

Гидроэнергетический потенциал. Он состоит из энергии рек, энергии приливов-отливов и энергии морских волн и океанических течений.

Мировой гидроэнергетический потенциал рек оценивается в размере около $33 \cdot 10^3$ ТВтчасов в год = $33 \cdot 10^{12}$ кВтчасов в год. Это соответствует средней мощности $1.45 \cdot 10^9$ кВт = $1.45 \cdot 10^6$ МВт, что эквивалентно 1450 миллионным блокам. Российский потенциал оценивается мощностью в 450000 МВт, или в 450 миллионных блока. Техничко-экономическая доступность оценивается примерно в 10 % от полного потенциала.

Энергетический потенциал приливов-отливов. Гравитационное взаимодействие земли, луны и солнца порождает приливную волну, которая вследствие вращения земли движется вдоль поверхности земли. Это воспринимается как периодические приливы и отливы. Уровень воды в

зависимости от рельефа местности изменяется от 0.5 до 25 м. В России гидроэнергетический потенциал оценивается в размере около 16 тыс МВт. Однако, следует заметить, что технико-экономическая доступность весьма мала.

Течения перемещают гигантские объемы воды и имеют соответствующий энергетический потенциал, В то же время, пути использования этого вида энергии пока не ясны, поэтому они здесь не рассматриваются.

Техническая характеристика различных видов топлива.

Уголь. Запасы разведанные мировые/России 909/200 млрд. тонн.

Извлекаемое количество угля из недр земли, млн тонн:

Год	1970	1980	1990	2000	2001	2004	2006
Всего	804	1028	1214	877	894	-	-
В России	127	141	137	86	83	283	308

Различают следующие виды углей. Каменный уголь – осадочные породы, продукт глубокого разложения древовидных папоротников плаунов и первых голосемянных растений произраставших 300 – 350 млн. лет назад. Его разновидность – антрацит с большим содержанием углерода. Бурый уголь образовался из торфа также в процессе его глубокого разложения, он представляет собой переходную форму от торфа к каменному углю. Их характеристики:

Уголь	Состав в %					Выход летучих в %	Теплота сгорания, МДж/кг
	C	S	H	O	N		
Бурый	64-78	0.3-6	3-6	15	1-2	40-60	15-30
Каменный	75-90	0.5-6	4-6	2-13	1-3	9-50	22-33
Антрацит	93-94	2-3	2	1-2	1	3-4	33-35

Характеристика каменного угля в зависимости от места добычи:

Место добычи	Зольность в %	Влага в %
Донецк	23.4	7.7
Кузбасс	19.3	8.2
Воркута	21.0	8.0

В состав золы входит: - Al_2O_3 глинозем,
 - SiO_2 кремниевая кислота,
 - MgO магнезия,
 - FeO , Fe_2O_3 , окислы железа и др.

Мазут, дизельное топливо. Эти виды топлива являются продуктами переработки нефти. Мировые запасы нефти около 1000 млрд. тонн. В России около 6.3 млрд. тонн. Добыча составляет около 300 млн. тонн. Из продуктов переработки нефти для энергетики используют дизельное топливо и мазут – остаток этой переработки. Их характеристика:

Топливо	Состав в %				Теплота сгорания, МДж/кг
	C	H	S	O+N	
Мазут	84-87	11.5-12.5	0.5-3.5	0.5-0.7	40-41.5
Диз. топливо	86.3	13.3	0.3	0.1	42.4

Мазут различают по вязкости: М20, М40, М60, М80, М100, М120, где цифра означает вязкость в градусах Энглера.

Газ. Различают газ природный и получаемый при реализации других процессов. Их характеристика:

Вмд газа	Состав в %								Теплота сгорания, МДж/кг
	CH ₄	H ₂	CO	CO ₂	C _n H _m	O ₂	H ₂ S	N ₂	
Природный	94.9	-	-	0.4	3.8	-	-	0.9	36.7
Коксовый	22.5	57.5	6.8	2.3	1.9	0.8	0.4	7.8	16.6
Доменный	0.3	2.7	28	10.2	-	-	0.3	58.5	4.0

Мировые запасы газа порядка 47800 млрд м³, ежегодная добыча около 598 млрд. м³. Отсюда следует, что разведанных запасов хватит на 80 лет. Однако, есть надежда, что будут открыты новые запасы природного газа.

Другие виды топлива. Из них рассмотрим три:

Топливо	Состав в %					Выход летучих в %	Низшая теплота сгорания, МДж/кг
	C	S	H	O	N		
Горючий сланец	60-75	4-13	7-10	12-17	0.3-1.2	80-90	7.6
Торф	58	0.3	6	33.6	2.5	70	8.1
Древесина	51	-	6.1	42.2	0.6	85	19

Расчет теплоты сгорания топлива. Хорошо известны формулы Д.И. Менделеева составленные им для расчета удельной (приходящейся на 1 кг массы топлива) теплоты сгорания топлива. В этих формулах коэффициенты пропорциональности приняты такие, чтобы в результате получит размерность кДж/кг. Различают высшую удельную теплоту сгорания – теплоту, получаемую при полном сгорании 1 кг топлива с учетом, что образующиеся при сгорании водяные пары конденсируются. Теплота, затраченная на превращение воды, содержащейся в топливе, в пар возвращается. Низшая удельная теплота сгорания определяется в предположении, что теплота, затраченная на превращение воды в пар, не возвращается. Формулы Менделеева выглядят следующим образом:

Для твердого и жидкого топлива:

$$Q_B = 338 \cdot C + 1249 \cdot H - 108.5 \cdot (O - S) \text{ [кДж/кг]},$$

$$Q_H = 338 \cdot C + 1025 \cdot H - 108.5 \cdot (O - S) - 25 \cdot W \text{ [кДж/кг]}. \quad (1.4)$$

Для сухого газообразного топлива:

$$Q_H = 127 \cdot CO + 108 \cdot H_2 + 358 \cdot CH_4 + 591 \cdot C_2H_6 + 911 \cdot C_3H_8 + 234 \cdot H_2S \text{ [кДж/кг]}. \quad (1.5)$$

В этих формулах все составляющие топлива указаны в % от общего количества. Рассмотрим примеры расчета теплоты сгорания для двух видов топлива. Бурый уголь (см. таблицу углей):

$$C = 75 \%, S = 5 \%, H = 5 \%, O = 15 \%$$

$$Q_B = 338 \cdot 75 + 1249 \cdot 5 - 108.5 \cdot (15 - 5) = 25350 + 6245 - 1085 =$$

$= 30510 \text{ кДж/кг} = 30.51 \text{ МДж/кг}$, что близко совпадает с данными таблицы. Второй пример – природный газ:

$$CO = 0, H_2 = 0, CH_4 = 94.9, C_nH_m = 3.8, H_2S = 0,$$

$$Q_H = 127 \cdot 0 + 108 \cdot 0 + 358 \cdot 94.9 + \frac{591 + 911}{2} \cdot 3.8 =$$

$$= 33974 + 2853 = 36827 \text{ кДж/кг} = 36.8 \text{ МДж/кг}.$$

В заключение этой лекции дается связь условного топлива с натуральным (фактическим). Удельная теплота сгорания условного топлива $Q_{YT} = 29.33 \text{ МДж/кг}$. Удельная теплота сгорания конкретного топлива Q_K .

Расход условного топлива:

$$B_{YT} = B_K \cdot \frac{Q_K}{Q_{YT}}. \quad (1.6)$$

Расход конкретного топлива:

$$B_K = B_{YT} \cdot \frac{Q_{YT}}{Q_K}. \quad (1.7)$$

ЛЕКЦИЯ 2. ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ ДЕЛЕНИЯ

Ядерная энергия деления атомов тяжелых металлов уже широко используется во многих странах. В некоторых странах доля этого вида энергии достигает 70 % (Франция, Япония). Вероятно в ближайшие 50 – 100 лет ядерная энергия деления будет составлять серьезную конкуренцию своим другим видам энергии, используемой человечеством. Мировые запасы урана, основного носителя ядерной энергии деления, составляет более 5 млн. тонн. Это означает, что запаса ядерной энергии на порядок больше, чем запасов всех ископаемых не возобновляемых видов энергии

Ядра атомов состоят из двух элементарных частиц, протонов и нейтронов. совокупность протонов и нейтронов образуют массовое число, состоящее из количества протонов и количества нейтронов в ядре атома:

$$A = Z_p + Z_n, \quad (2.1)$$

Z_p – количество протонов в ядре, Z_n – количество нейтронов. Масса элементарных частиц измеряется в атомных единицах массы (а.е.м) и в кг. Физикам известны с большой точностью массы основных элементарных частиц. В частности, масса протона:

$$m_p = 1.007276 \text{ а.е.м} = 1.672623 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Масса нейтрона:

$m_n = 1.008664 \text{ а.е.м} = 1.674928 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$ Разница между массой протона и нейтрона невелика, но заметная. Масса электрона, определенное количество которых образуют электронное облако вокруг ядра, примерно в 1823 раза меньше массы протона или нейтрона, поэтому их влиянием, как правило, пренебрегают, по крайней мере, в прикидочных расчетах.

Собранные в ядре атома протоны и нейтроны образуют энергию связи ядра:

$$E_{\text{связи}} = (m_p \cdot Z_p + m_n \cdot Z_n - m_{\text{ядра}}) \cdot c^2 \text{ [Дж, если масса в кг]}. \quad (2.2)$$

Из формулы видно, что энергия связи образуется за счет разности между массой ядра и массой отдельных составляющих ядра.

Ядра всех элементов делятся на:

1. Стабильные или псевдостабильные, у которых время полураспада более миллиона лет.
2. Делящиеся спонтанно, нестабильные с периодом полураспада менее миллиона лет.

Однако, существуют элементы, ядра которых допускают искусственное деление, если их ядра подвергаются обстрелу нейтронами, Эти нейтроны, проникая в ядро, превращают его в нестабильное и вызывают его искусственное деление. В настоящее время используют для целей энергетики три варианта такого искусственного деления:

1. Использование $^{235}_{92}\text{U}$ и медленных (тепловых) нейтронов. Верхняя цифра перед обозначением урана – его масса (примерно), нижняя цифра зарядовое число, указывающее

на количество протонов в ядре. Такое обозначение применяется для любых элементов. Тепловые нейтроны характеризуются скоростью движения, которая для них ниже 2000 м/с.

2. Использование ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ и медленных (тепловых) нейтронов. Плутоний получается искусственным путем при реализации третьего метода.
3. Использование ${}^{238}_{92}\text{U}$ и быстрых нейтронов, движущихся со скоростью намного более 2000 м/с.

Рассмотрим подробнее процесс получения ядерной энергии деления и конкретный пример получения энергии по первому варианту.

В общем виде формула расчета дефекта массы следующая:

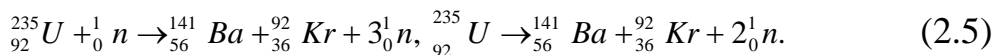
$$\Delta M = m_U + m_n - \sum m_{\text{д}} - \sum m_n, \quad (2.3)$$

где m_U – масса ядра урана, $m_{\text{д}}$ – масса всех продуктов деления, m_n – масса нейтрона, без суммы – поглощаемого, в сумме – масса нейтронов выделяемых в процессе деления ядра урана. Если их количество больше 1, то возможно появление цепной реакции, при которой количество делящихся ядер урана будет расти в геометрической прогрессии.

При такой ядерной реакции выделяется энергия, согласно формуле (1.1):

$$W = \Delta M \cdot c^2. \quad (2.4)$$

Теоретические расчеты и опыт показал, что при использовании ${}^{235}_{92}\text{U}$ и поглощении его атомом одного медленного нейтрона появляется два атома продукта деления и 3 новых нейтрона. В частности может появиться барий и криптон. Реакция (2.3) может быть конкретизирована:



Вычисление в энергетических целях дефекта массы и выделяемой при этом энергии будем производить в исчислении на 1 кг урана. Для этого необходимо составить пропорцию, решить ее и найти дефект массы, приходящийся на 1 кг исходной массы урана:

$$M_U \Leftrightarrow \sum M, \quad X = \frac{\sum X}{M_U}, \quad \Delta M = 1 - X = 1 - \frac{\sum M}{M_U}, \quad (2.6)$$

$$1 \text{ кг} \Leftrightarrow X$$

здесь $\sum M$ – сумма масс, стоящих в правой части формулы (2.5), поскольку в (2.6) стоит отношение масс, то можно использовать любые единицы измерения масс, X – то же самое, но относящееся к 1 кг урана. Теперь можно найти дефект массы, относящийся к этой ядерной реакции, соответствующую ей выделяемую энергию. Известны массы всех участвующих в реакции элементов: $M_U = 235.043915$, $M_{\text{Ba}} = 140.907596$, $M_{\text{Kr}} = 91.905030$, $m_n = 1.008664$, все величины в а.е.м. Дефект массы :

$$\Delta M_1 = 1 - \frac{140.907596 + 91.905030 + 2 \cdot 1.008664}{235.043915} = 1 - 0.999089 =$$

$$= 0.000910 \text{ кг}.$$

Выделяемая энергия:

$$W = 0.000910 \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 8190 \cdot 10^{10} \text{ Дж} = 8.19 \cdot 10^{13} \text{ Дж} = 8.19 \cdot 10^7 \text{ МДж}$$

Энергетический блок мощностью 1000 МВт за год вырабатывает электрической энергии:

$$W_E = 10^3 \cdot 10^6 \cdot 3600 \cdot 8760 = 3.154 \cdot 10^{16} \text{ Дж} = 3.154 \cdot 10^{10} \text{ МДж}.$$

При КПД блока $\eta = 0.4$ потребуется в год урана 235:

$$M_U = \frac{W_E}{W \cdot \eta} = \frac{3.154 \cdot 10^{10}}{8.19 \cdot 10^7 \cdot 0.4} = 962.8 \text{ кг}.$$

Для сравнения определим потребность в антраците:

$$M_{АН} = \frac{W_E}{W_{удАН} \cdot \eta} = \frac{3.154 \cdot 10^{10}}{35 \cdot 0.4} = 0.225 \cdot 10^{10} \text{ кг} = 2.25 \text{ млн. тонн}.$$

В природе уран существует в виде нескольких изотопов. В основном это два изотопа: уран 238, на долю которого приходится около 99.29 % и уран 235, содержание которого составляет 0.71 %. Как уже было упомянуто при попытке получения ядерной энергии с использованием медленных (тепловых) нейтронов необходим уран 235. Вопрос сводится к обогащению добытого урана с доведением содержания урана 235 до величины не менее 3 %, при которой уже становится возможной цепная ядерная реакция расщепления. Кроме того, на практике используется не металлический уран, а его соединения с кислородом (UO_2) или его соединение с углеродом (UC), с кремнием (USi_2) и др. Итак, рассчитает общую потребность обогащенного ядерного топлива с использованием окиси урана для обеспечения работы энергетического блока мощностью 1000 МВт в течение года.

Всего потребуется урана при обогащении урана 235 до 3 %:

$$M = 962.8 \cdot \frac{100\%}{3\%} = 32093 \text{ кг}.$$

С учетом массы кислорода, доля которого приблизительно равна отношению: $\frac{2 \cdot 16}{238} = 0.134$. Общая масса ядерного топлива составит:

$$M = 32093 \cdot (1 + 0.134) = 36400 \text{ кг} = 36.4 \text{ тонн}.$$

Формула (2.5) ядерной реакции деления урана 235 показывает один из возможных вариантов деления. Кроме того, приведенные в формуле осколки деления не стабильны, дальнейшая их судьба показана в приложении 1.

Ядерную энергию деления с использованием тепловых нейтронов можно получить при использовании плутония 239. Однако, в природе плутония практически нет, он получается искусственным путем, схема его получения приведена в лекции 7.

ЛЕКЦИЯ 3. ОСНОВНЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Все термодинамические процессы базируются на трех законах (или началах) термодинамики. В свою очередь законы термодинамики описывают процессы преобразования энергии или в пределах одного вида энергии или процессы преобразования одного вида энергии в другие. Процессы преобразования энергии ложатся в основу создания соответствующих устройств, с помощью которых удастся получить тот вид энергии, который нужен потребителям.

В современном понимании термодинамика есть наука, изучающая закономерности теплового движения, взаимную связь с другими видами энергии и влияние этой связи на свойства физических тел. Различают физическую термодинамику, техническую термодинамику, термодинамику необратимых процессов и некоторые другие направления. Нас будут интересовать некоторые разделы технической термодинамики, применительно к изучению вопросов электро- и теплоэнергетики.

Законы (начала) термодинамики. Существует три закона, из которых первые два играют принципиальную роль в создании и описании работы тепловых машин и других преобразовательных устройствах.

Первый закон. Фактически это закон сохранения и превращения энергии, применительно к тепловым процессам. Некому рабочему телу (воде, пару или вообще любому газу или жидкости) сообщается некоторое количество теплоты – dQ . До этого момента это рабочее тело обладало внутренней энергией U , в результате появилось приращение этой внутренней энергии – dU . Рабочее тело при расширении и взаимодействии с внешней средой, которое на тело оказывает давление, производит механическую работу – dL . Между ними существует взаимосвязь:

$$dQ = dU + dL. \quad (3.1)$$

При этом возможны варианты:

$dQ = 0$, процесс адиабатный, без подвода или отвода теплоты.

$dL = 0$, процесс изохорный, рабочее тело не совершает механической работы. Такое явление может быть в том случае, если объем пара жестко ограничен, или в случае использования в качестве рабочего тела несжимаемой жидкости. В этих случаях вся поступающая теплота идет на увеличение внутренней энергии рабочего тела.

$dU = 0$, вся поступающая теплота расходуется на совершение механической работы. Такое явление возможно только при использовании в качестве рабочего тела газов.

Второй закон (начало) термодинамики. Существует несколько формулировок этого закона. Например. Теплота сама собой не может переходить от тела менее нагретого к более нагретому без одновременных изменений в этих телах или в окружающей среде. Другой вариант формулировки. Невозможно построить вечный двигатель второго рода.

Вечный двигатель первого рода нельзя построить потому, что его построение противоречит первому закону термодинамики, фактически закону сохранения и превращения энергии. Построение вечного двигателя второго рода не противоречит первому закону. Действительно, в морях, океанах и озерах земли содержится громадное количество энергии, которую в принципе можно было бы использовать. Однако опыт и теоретические соображения показывают, что попытка использования теплоты этих водоемов с температурой, например, 10°C для нагревания помещения до требуемой более высокой температуры, например 20°C обречены на неудачу. Скорее будет происходить передача теплоты от помещения к водоему. Таким образом, второй закон (начало) термодинамики говорит о направленности тепловых процессов. Вариант третьей формулировки. Самопроизвольные процессы, происходящие в любой термодинамической системе, возможны только в том случае, если эта система неравновесная и эти процессы идут в направлении приближения к равновесию. При достижении равновесного состояния процессы прекращаются.

Третий закон (начало) термодинамики гласит, что нельзя достигнуть температуры рабочего тела, равной абсолютному нулю (по современным данным это минус 273.15°C) путем отнятия от тела теплоты при помощи конечных действительных процессов. Другими словами нельзя создать такую тепловую машину, которая отняла бы все тепло от тела.

Основные термодинамические понятия. Для рассмотрения процессов преобразования энергии, конечной целью которых является получение электрической и тепловой энергии необходимо определиться с основными понятиями, которые будут использоваться при рассмотрении.

Температура. Абсолютная температура измеряется по шкале Кельвина, обозначается как « T ». Связь со шкалой Цельсия :

$$T = t + 273.15. \quad (3.2)$$

Где t температура по шкале Цельсия (сопровождается обозначением С или $^{\circ}\text{C}$). Значение одного градуса Кельвина и Цельсия совпадают.

Количество тепловой энергии (теплоты) измеряется в международной системе единиц СИ в Джоулях (Дж). Существует связь со старой единицей калорией: $1\text{ Дж} = 0.24\text{ Кал}$.

Давление (p) определяется как сила величиной в 1 Ньютон (Н), приходящаяся на площадь 1 м^2 и равномерно распределенная по этой площади. Такая единица давления называется Паскаль (Па). Производные: $1\text{ кПа} = 10^3\text{ Па}$, $1\text{ МПа} = 10^6\text{ Па}$, связь со старой единицей измерения давления атмосферой: $1\text{ МПа} = 10.2\text{ ат}$.

Объем измеряется в м^3 обозначается « V », удельный объем это объем приходящийся на единицу массы рабочего тела, обозначается как « v » и измеряется в $\text{м}^3/\text{кг}$. Плотность – величина обратная удельному объему, обозначается как « ρ » (греческая буква ро) и измеряется в $\text{кг}/\text{м}^3$.

Удельная теплоемкость – количество теплоты, которое требуется для изменения температуры рабочего тела массой 1 кг на 1 градус. Вообще существует три вида теплоемкости: массная, объемная и мольная. Мы будем

использовать только массную, удовлетворяющую формуле $c = \frac{dQ}{dT}$ и измеряемую в $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$. Для газов (в частности для водяного пара) различают:

- теплоемкость при постоянном давлении (изобарную), обозначают c_p ,
 - теплоемкость при постоянном объеме (изохорную), обозначают c_v ,
 - среднюю теплоемкость для данного интервала температур c_{cp} ,
- практически в таблицах дается значение этой теплоемкости для интервала $0 - t_0$ С, Тогда: $Q = c_{cp} \cdot (t - 0) = c_{cp} \cdot t$. (3.3)

Энтальпия, по другому теплосодержание. Это понятие говорит о полном внутреннем количестве теплоты и количестве энергии полученной путем воздействия внешней среды на рабочее тело, например путем оказания давления на него. Обычно энтальпию рассчитывают на 1 кг массы и выражают формулой: $I = U + p \cdot v$, (3.4)

где I – энтальпия, U – внутренняя энергия тела, p – давление, v – удельный объем.

Энтропия, это пожалуй самое сложное понятие теплотехники (правильнее говорить физики, потому, что энтропия имеет глубокую связь с различными разделами науки, в частности с теорией информации). Существует несколько определений этого понятия. Например, энтропия есть мера ценности теплоты, энтропия есть мера необратимости тепловых процессов, энтропия есть мера беспорядка термодинамической системы. Понятие энтропии было введено Р. Клаузиусом в 1865 году, оно имеет количественное определение:

$$ds = \frac{dQ}{T}, \quad (3.5)$$

где s – значение энтропии, измеряемой в Дж/градус. Как физическую величину энтропию непосредственно измерить нельзя, однако, это понятие оказалось весьма полезным при описании различных тепловых процессов.

Рассмотрим примеры использования энтропии. Из (3.5) следует:

$$s = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = s_2 - s_1 = \frac{q_2}{T_2} - \frac{q_1}{T_1}. \quad (3.5A)$$

Условные пределы интегрирования означают номера состояния рабочего тела. Если принять, что первое состояние соответствует состоянию при абсолютном нуле, также учесть, что из третьего закона (начала) термодинамики следует, что при $T \rightarrow 0 \lim s = 0$, то для статического состояния i – го тела формулу (3.5A) можно записать в виде:

$$s_i = \frac{q_i}{T_i}. \quad (3.6)$$

Первый пример, Пусть два тела имеют параметры: $T_1 = 500^0$, $q_1 = 100$ МДж, $T_2 = 300^0$, $q_2 = 50$ МДж. Эти два тела объединяются (смешиваются). До смешения каждое из них обладало энтропией:

$$s_1 = \frac{100}{500} = 0.2, \quad s_2 = \frac{50}{300} = 0.16.$$

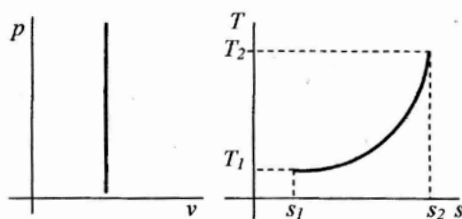
После объединения этих двух тел температура объединенного тела будет находиться в пределах: $T' \leq 499^0$, $T'' \geq 301^0$, а количество теплоты составит: $q = q_1 + q_2 = 100 + 50 = 150$ МДж. Энтропия объединенного тела будет находиться в пределах:

$$s' = \frac{150}{499} = 0.300, \quad s'' = \frac{150}{301} = 0.498.$$

Вывод, после объединения двух тел энтропия объединенного тела гарантировано больше, по сравнению с энтропией каждого тела в отдельности.

В качестве второго примера рассмотрим процесс таяния снега и замерзания воды. В обоих этих случаях $T = \text{const.}$ В первом случае, при таянии снега $dQ > 0$ и энтропия увеличивается, во втором случае, при замерзании воды, она отдает теплоту, $dQ < 0$ и энтропия уменьшается. Если рассматривать хаотическое движение молекул воды как «беспорядок» по сравнению с расположением тех же молекул в кристалле льда, можно считать увеличение энтропии как меру увеличения беспорядка.

Основные термодинамические процессы. Все изложенные ниже термодинамические процессы являются идеализацией реальных тепловых процессах, которые имеют место в процессе преобразования энергии в паровом котле, вообще в парогенераторе, турбине, вообще в тепловой машине и в, конечном итоге, в электрическом генераторе. Идеализированные термодинамические процессы позволяют разложить на составляющие сложные процессы, что является необходимым этапом изучения (этапом абстрактного мышления) с тем, чтобы потом создать практически приемлимую теорию. Принято процессы изображать в виде диаграмм с координатами: давление – удельный объем и температура – энтропия.



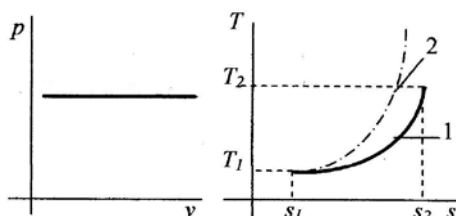
изменение его

Рис. 3.1.

из (3.5) следует:

$$s = \int_{q_1}^{q_2} \frac{dq}{T} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_v \cdot dT}{T} = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \cdot (\ln T_2 - \ln T_1) = s_2 - s_1. \quad (3.7)$$

Эта зависимость изображена на второй диаграмме, кривая называется изохорой.



Изобарный процесс происходит при постоянном давлении ($p = \text{const.}$). К рабочему

Изохорный процесс, процесс совершающийся при постоянном объеме рабочего тела ($v = \text{const.}$). Диаграммы изображены на рис. 3.1. Поскольку объем тела постоянен, то вертикальная линия на первой диаграмме объяснима. При подводе тепла к рабочему телу происходит

температуры: $dq = c_v \cdot dT$. С другой стороны

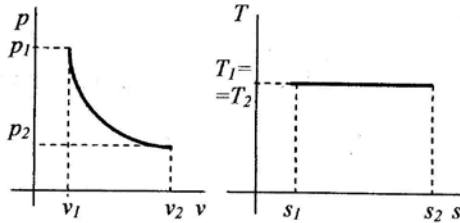
телу подводится теплота, Уравнение кривой, изобары аналогичное уравнению (3.7), в котором изохорную теплоемкость необходимо

Рис. 3.2. 1 – изобара, 2 – изохора.

заменить на изобарную (c_p). В результате получается уравнение изобары:

$$s = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = c_p \cdot (\ln T_2 - \ln T_1). \quad (3.8)$$

Поскольку $c_p > c_v$, то изобара менее крутая (рис. 3.2).



Изотермический процесс

происходит при постоянной температуре ($T = \text{const.}$). Диаграммы этого процесса изображены на рис. 3.3. Не вызывает сомнения прямая, изображенная на второй диаграмме, характеризующая этот процесс. Поскольку температура при этом процессе

постоянная, следует:

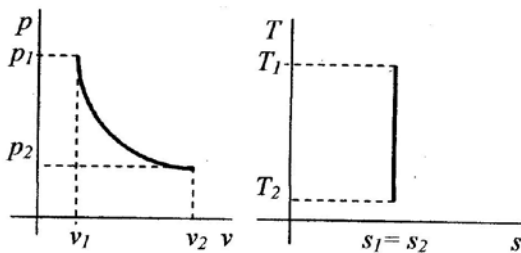
Рис.3.3. $p \cdot v = R \cdot T. \quad (3.9) \quad \text{В}$

этой формуле $R = 8.314510 \text{ [Дж/моль·град]}$ – газовая постоянная. Отсюда следует уравнение кривой первой диаграммы: $p = \frac{R \cdot T}{v}$. Существует два

варианта реализации этого процесса, имеющие практическое значение. Изотермическое сжатие. От рабочего тела (газа) отводится теплота в количестве равном работе сжатия. Изотермическое расширение связано с подводом теплоты, которая совершает работу, равную подведенной энергии.

Адиабатный процесс характеризуется отсутствием подвода или отвода тепла к рабочему телу ($Q = \text{const. } dQ = 0$). Из первого закона (начала) термодинамики следует:

$$dQ = dU + dL = 0, \quad dU = -dL. \quad (3.10)$$



Это означает, что изменение внутренней энергии связано с работой, совершаемой рабочим телом. Следует также, что при расширении газа происходит его охлаждение, а при сжатии происходит нагревание, увеличение температуры. Поскольку приращение теплоты равно нулю, то из

определения

Рис. 3.4.

энтропии следует:

$$s = \int \frac{dQ}{T} + C = C = \text{const}, \quad (3.11)$$

что и изображено на правой диаграмме рис. 3.4. Уравнение кривой левой диаграммы рис. 3.4. выглядит следующим образом:

$$p \cdot v^\gamma = a, \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v}, \quad (3.12)$$

где γ – показатель адиабаты, a – некоторая постоянная, определяемая из некоторых граничных условий адиабатного процесса.

Все вышеупомянутые процессы могут быть обобщены в виде так называемых политропных процессов, однако их изучение выходит за рамки данного курса.

Теплообмен и теплопередача. Существуют условно выделяемые три вида теплообмена. Реальный процесс теплообмена содержит в себе сразу все три вида. Однако, изучение реального процесса возможно только путем разделения его на относительно простые составляющие с последующим синтезом.

Теплопроводность – передача теплоты за счет соударения и диффузии частиц тел, также квантов упругих колебаний этих частиц – фононов. Количественно этот процесс описывается законом Фурье:

$$q_T = -\lambda \cdot \text{grad}t, \quad (3.13)$$

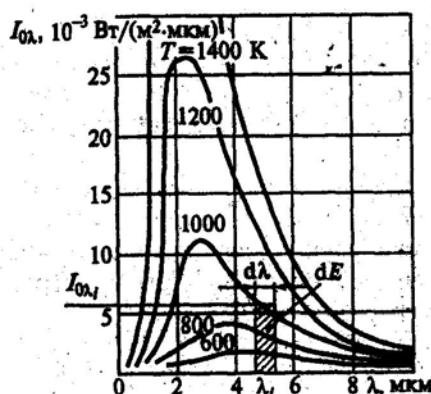
где q_T – удельный тепловой поток [Вт/м²], λ – коэффициент теплопроводности [Вт/м·град], t – температура, поскольку берется градиент температуры, то температуру можно брать как в градусах Кельвина, так и в градусах Цельсия.

Конвекция – передача теплоты перемешивающимися объемами жидкости или газа. Различают свободную конвекцию и вынужденную, происходящую под действием внешних сил. Существует формула Ньютона – Рихмана, описывающая этот процесс:

$$q_K = \alpha_K \cdot \Delta t, \quad (3.14)$$

где q_K – удельный поток теплоты [Вт/м²], α_K – коэффициент конвективной теплоотдачи [Вт/м²·град], t – температура в любых градусах, поскольку берется разность температур между греющей средой и нагреваемой.

Теплообмен излучением. Существует закон М. Планка для абсолютно черного тела, описывающий зависимость плотности теплового



потока излучения от длины волны излучения. Эти зависимости для различных температур тела показаны на рис. 3.5. Эти же зависимости выражаются формулой:

$$I_{0\lambda} = \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1}, \quad (3.15)$$

где $I_{0\lambda}$ [Вт/М²·мкм] – плотность теплового потока излучения, λ [мкм] – длина волны излучения, T [град К] – температура излучающего тела, коэффициенты: $C_1 = 3.74 \cdot$

10^{-16}

Рис. 3.5. [Вт/м²], $C_2 = 1.44 \cdot 10^{-2}$ [м·К].

Из диаграммы видно, что максимум плотности потока излучения падает на инфракрасное излучение (точнее даже на часть этого диапазона).

Существует закон Вина, показывающий, что при росте температуры излучающего тела спектр излучения смещается в стороны более коротких волн:

$$T \cdot \lambda = 2.8988 \cdot 10^{-3} = \text{const} \text{ [м} \cdot \text{К]}. \quad (3.16)$$

Существует также закон Стефана=Больцмана, характеризующий излучение реального тела:

$$E = C \cdot \left(\frac{T}{1000} \right)^4 = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T}{1000} \right)^4, \quad (3.17)$$

где E – поверхностная плотность потока излучения [Вт/м²], $\varepsilon = (1 - 0)$ - коэффициент черноты (степень черноты) реального тела, C_0 - излучательная способность абсолютно черного тела [Вт/м²·К].

Реальный теплообмен - сложный теплообмен, в котором участвуют все виды теплообмена.

Теплопроводность. Теплопроводность можно рассматривать как явление, связанное с распространением теплоты в неоднородном температурном поле. С другой стороны теплопроводность можно определить как способность тел (твердых, жидких и газообразных) передавать (распространять) тепловую энергию, Причем коэффициент теплопроводности характеризует именно это свойство тела:

$$\lambda = - \frac{q}{\text{grad}t} \text{ [Дж/градК/м]} \quad (3.18)$$

где q - количество теплоты, проходящее через тело, t – температура в данной точке тела. Совокупность значений температуры во всех точках тела называют температурным полем. Если оно не зависит от времени, то поле называется стационарным, если зависит, то нестационарным.

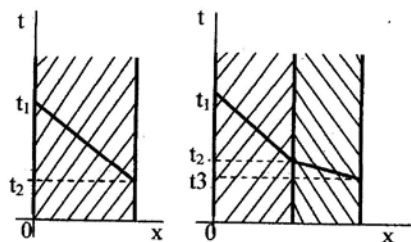
Теплопроводность (как процесс) через плоскую стенку неограниченной длины (на практике достаточно большой длины) описывается известным уравнением: $\frac{dt}{d\tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)$,
 (3.19)

где t – температура в каждой точке стенки в функции трех измерений. τ – время. При этом предполагается, что внутри стенки нет источников теплоты. Практический интерес представляет стационарный процесс, при котором $\frac{dt}{d\tau} = 0$, следовательно:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0. \quad (3.20)$$

Рассмотрим изменение температуры внутри однородной стенки по одной координате, что также представляет практический интерес. Из (3.20) следует: $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0$. Интегрируя первый раз имеем: $\frac{\partial t}{\partial x} = C_1$, интегрируя второй раз, получаем окончательную формулу изменения температуры при движении внутри стенки:

$$t = C_1 \cdot x + C_2. \quad (3.21)$$



Постоянные интегрирования C_1 и C_2 определяются из граничных условий (температур на границах стенки), в то же время C_2 является функцией коэффициента теплопроводности стенки. Для однородной стенки график изменения температуры показан на рис. 3.6 (слева), для неоднородной стенки,

состоящей из двух одно-

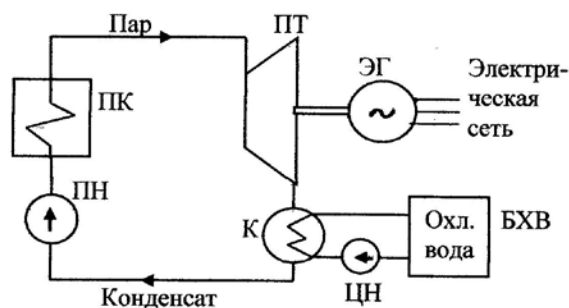
Рис. 3.6.

родных частей с разными коэффициентами теплопроводности, график изменения температуры показан на рис. 3.6. справа. Как видно их формулы (3.21) и графиков изменение температуры носит линейный характер. Причем, так, где теплопроводность стенки хуже, разность температур больше.

Изложение основных теплотехнических вопросов достаточно краткое, однако, минимальные их знания необходимы всем энергетикам вообще и для понимания всего пути преобразования энергии топлива в электрическую, в частности.

ЛЕКЦИЯ 4. ТЕПЛОВЫЕ СХЕМЫ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Изучение тепловых схем тепловых электростанций начнем с простейшей схемы, реализующей так называемый цикл Ренкина, названный именем шотландского физика и инженера, предложившего аналогичный цикл. Схема



такого цикла показана на рис. 4.1. Обозначения: ПК – паровой котел, преобразующий энергию топлива в энергию водяного пара, ПТ – паровая турбина, преобразующая энергию пара в механическую энергию, передаваемую через вал электрическому генератору (ЭГ), К –

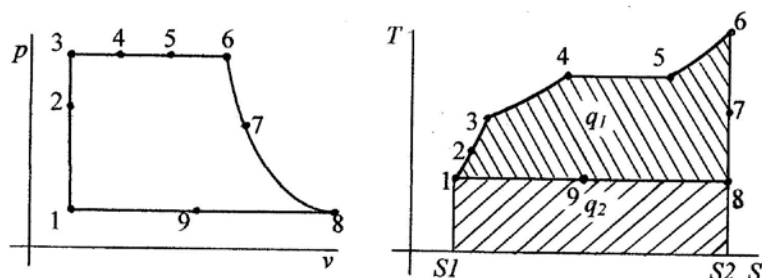
конденсатор, в ко-

Рис. 4.1.

тором отработанный пар конденсируется, БХВ – бассейн холодной воды, которая подается в конденсатор циркуляционным насосом (ЦН), ПН – питательный насос, подающий воду в паровой котел. На рис. 4.2 изображены процессы

преобразования энергии в виде $p-v$ и $T-S$ диаграмм.

Процессы цикла Ренкина можно описать следующим образом.



1-2-3 – питательный насос (ПН) закачивает воду в паровой

котел (ПК), поднимая давление.

Рис. 4.2.

Поскольку вода практически не сжимаемая, это процесс можно считать изохорным. При этом работа, совершаемая ПН - работа извне, переходит во внутреннюю энергию воды.

3-4 - процесс нагрева воды. Повышение температуры воды происходит при практически постоянном давлении, процесс можно считать изобарным. Производится подвод теплоты к воде.

4-5 – Испарение воды, происходит при постоянной температуре, процесс изотермический. Увеличивается внутренняя энергия рабочего тела.

5-6 – Доведение параметров пара до требуемых. Происходит при постоянном давлении в пароперегревателе. Процесс изобарный.

6-7-8 – Процесс передачи энергии пара паровой турбине. Этот процесс происходит без поступления теплоты извне и без отдачи ее во внешнюю среду, поэтому этот процесс можно считать адиабатным.

8-9-1 – Процесс конденсации отработанного пара с отводом теплоты во внешнюю среду с помощью охлаждающей воды.

Цикл замкнулся. Теперь можно оценить эффективность этого цикла, прикинув коэффициент полезного действия (КПД) энергоустановки, реализующей такой цикл. Одно из преимуществ изображения термодинамических циклов в координатах $T - S$ заключается в том, что площадь, образуемая диаграммой представляет собой энергию. Из рис. 4.2 видно, что q_1 представляет теплоту которая преобразовалась в работу, переданную через вал турбины генератору. Вторая часть диаграммы образует теплоту q_2 , которая уходит с охлаждающей водой. Исходя из этого, термодинамический КПД турбины можно изобразить формулой:

$$\eta_T = \frac{q_{ц} - q_2}{q_{ц}} = \frac{q_1}{q_1 + q_2}, \quad (4.1)$$

здесь $q_{ц} = q_1 + q_2$ – количество теплоты цикла. Если в нашем прикидочном расчете принять для водяного пара среднюю теплоемкость, количество теплоты в формуле (4.1) можно выразить следующим образом:

$$q_{ц} = C_{CP} \cdot T_1 \cdot D, \quad q_2 = C_{CP} \cdot T_2 \cdot D, \quad (4.2)$$

где C_{CP} – средняя теплоемкость пара, T_1 – температура пара на входе турбины, T_2 – температура пара на выходе турбины, D – расход пара через турбину. Подстановка (4.2) в (4.1) дает:

$$\eta_T = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%. \quad (4.3)$$

Для численного примера примем параметры пара близкие к реальным, например: $t_1 = 500^\circ\text{C}$, $T_1 = 500 + 273 = 772^\circ\text{K}$, $t_2 = 100^\circ\text{C}$, $T_2 = 110 + 273 = 383^\circ\text{K}$. Температура T_2 не может быть ниже 100 градусов по Цельсию, чтобы не допустить конденсацию пара в турбине. Подстановка чисел в (4.3) дает:

$$\eta_T = \frac{772 - 383}{772} \cdot 100 = 50.38\%.$$

Если учесть КПД других элементов схемы (рис. 4.1), то можно определить КПД всей энергетической установки:

$$\eta_y = \eta_K \cdot \eta_T \cdot \eta_{TM} \cdot \eta_G. \quad (4.4)$$

Здесь $\eta_K = 0.9$ – КПД котла, $\eta_{TM} = 0.98$ – механический КПД турбины, $\eta_G = 0.98$ – КПД электрического генератора. Результирующий КПД будет:

$$\eta_y = 0.9 \cdot 0.5 \cdot 0.98 \cdot 0.98 = 0.4321 = 43.21\%.$$

Этот КПД называется КПД брутто, при этом не учитывается, что часть электроэнергии, вырабатываемой генератором расходуется на обеспечение собственных нужд электростанции. КПД, учитывающий потребление собственных нужд, называется КПД нетто, который ниже КПД брутто. Если принять потребление собственных нужд около 6% , то можно определить КПД нетто:

$$\eta_{yH} = 0.4321 \cdot (1 - 0.06) = 0.4061 = 40.61\%.$$

Все изложенное относится к конденсационным циклам, используемым на конденсационных электростанциях (КЭС). Конечно, реальные тепловые схемы КЭС гораздо сложнее. Гораздо сложнее

энергии и электрической. Их именуют теплоэлектростанциями, сокращенно ТЭЦ. Они предназначены, в частности, для централизованного

энергии и электрической. Их именуют теплоэлектростанциями, сокращенно ТЭЦ. Они предназначены, в частности, для централизованного

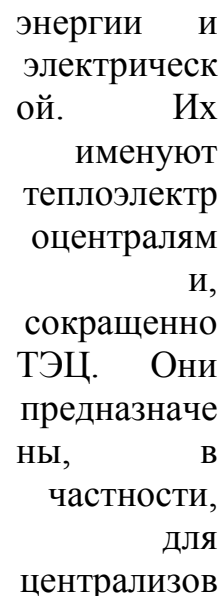


Рис. 4.3.

ния, отсюда

- ния, отсюда

- БХВ – бассейн охлаждающей воды, используемой для конденсации отработанного пара.

- ЦН – циркуляционный насос, подающий охлаждающую воду в конденсатор.

- ПН – питательный насос, подающий воду в ПК и создающий необходимое давление как воды на входе ПК, так и пара на выходе ПК.

Реальные схемы ТЭЦ гораздо сложнее не только в части использования паровых турбин с из отборами пара. Дело в том, что ТЭЦ должны содержать схемы подготовки воды для подогрева, схемы приема и обработки конденсата от промышленных потребителей пара и многое другое. Более подробная схема ТЭЦ приведена в приложении 4.

ЛЕКЦИЯ 5. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КЭС И ТЭЦ

Паровые (энергетические) котлы. Паровые котлы различаются по нескольким признакам. Первый признак: котлы прямоточные и барабанные. У первых пар, после его образования сразу, непосредственно поступает к потребителю пара. Они практически безынерционные. Используются в качестве источников пара на котлах небольшой мощности не очень часто. Чаще используются на мощных котельных агрегатах. Барабанные котлы, как следует из названия, имеют специальный резервуар, именуемый барабаном, где происходит разделение воды и пара, накопление определенного объема пара. Барабанные котлы более инерционные, имеют заметную постоянную времени.

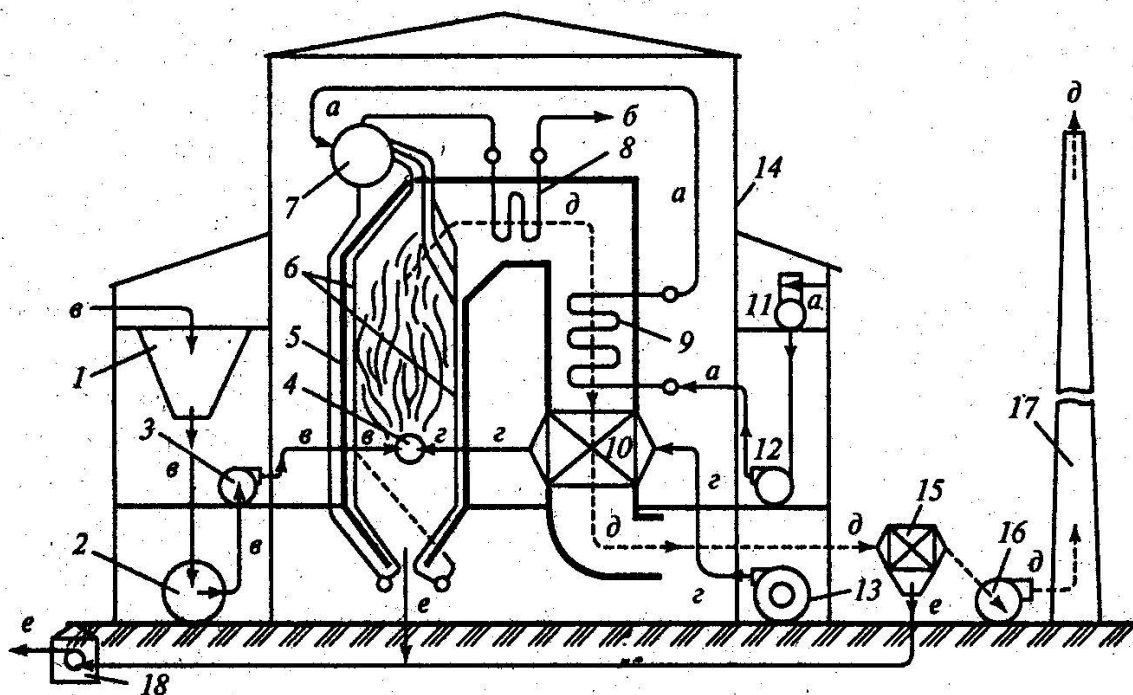


Рис.

5.1.

Технологическая схема котельной установки показана на рис. 5.1. Обозначение элементов принять следующее:

1 – Бункер угля. Уголь обычно в бункер подается транспортером из склада угля.

2. – Мельница, предназначена для размалывания угля, результате чего получается угольная пыль.

3. – Вентилятор, он подает пылевидное угольное топливо к горелкам.

4. – Горелки, к ним подается с одной стороны топливо, с другой подается воздух. Производится их смешивание и на выходе горелки поджиг топливно-воздушной смеси.

5. – Топка котла, внутри топки котла в результате сгорания топлива образуется высокотемпературный факел с температурой порядка 1400 - 1500 градусов Ц. Факел образует топочные газы.

6. - Экранные трубы, они покрывают внутреннюю часть топки со всех сторон. Экранные трубы принимают теплоту факела и топочных газов конвективным путем и радиационным путем. Они же осуществляют процесс теплопередачи через стенки труб от топочных газов воде, которая циркулирует внутри труб. Происходит ее нагревание и испарение.

7. – Барабан котла. Пар поступивший в барабан занимает его верхнюю часть, Нижнюю часть барабана занимает вода, которая через опускные трубы опускается в нижний коллектор котла и затем поступает в экранные трубы. при движении вверх она нагревается и испаряется.

8 – Пароперегреватель. Его назначение – доведение параметров пара до требуемых значений. Это касается его температуры и влажности. Пар, поступающий в турбину должен быть сухой. Диапазон температур в современных энергетических котлах находится в пределах 400 – 650 градусов Ц.

9. – Водяной экономайзер, предназначен для предварительного подогрева питательной воды в барабан котла. Подогрев осуществляется уходящими газами до температуры достигающей 260 градусов Ц.

10. – Воздухоподогреватель, предназначен для подогрева воздуха перед подачей его в горелки котла.

11. – Бак питательной воды, который может иметь деаэрационное устройство, предназначенное для удаления воздуха из питательной воды.

12. – Питательный насос, подающий воду в барабан котла и создающий необходимое давление воды и пара.

13. – Вентилятор, нагнетающий воздух через воздухоподогреватель в горелки котла.

14. – Здание котла, защитное сооружение.

15 – устройство очистки дымовых газов от золы и некоторых других веществ, которые нельзя выбрасывать в атмосферу.

16 – Дымосос, обеспечивает движение дымовых газов в дымовую трубу и, в конечном итоге, в атмосферу.

17 – Дымовая труба, ее назначение заключается в выбросе дымовых газов в атмосферу.

18. – Багерный насос, осуществляющий золоудаление.

Буквами обозначены пути: а – подачи сырой воды, б – поставки сухого пара, в – топлива, г – воздуха, д – дымовых газов, е – шлака и золы.

Паровые котлы различают по их производительности. Малые котлы производительностью до 25 тонн пара в час. Котлы средней мощности до 220 тонн пара в час. Большой мощности свыше 220 тонн пара в час. Все чаще мощность котлов стали выражать в МВт. Тогда сразу становится ясно, турбину какой мощности сможет обеспечить данный паровой котел.

Различают котлы по давлению пара, которое котел может обеспечить. Котлы, обеспечивающие давление до 1.4 МПа относят к котлам низкого давления. До 4 МПа – к котлам среднего давления. До 14 МПа к котлам высокого давления и до 26 МПа к котлам, работающим на сверхкритических параметрах пара. При давлении свыше 22.136 МПа и температуре свыше

374.15 градуса Ц (647.3 К) вода сразу переходит в перегретый пар, минуя так называемое двухфазное состояние (минуя область влажного пара).

Наконец различие существенное по видам используемого топлива. Существуют котлы газомазутные (газ основное топливо, мазут резервное). Угольные котлы, в частности пылеугольные. Котлы, использующие торф и другие органические виды топлива.

Топливный баланс парового котла его КПД выражается формулами:

$$Q_{\text{ТОПЛИВА}} = Q_{\text{ИСПОЛЬЗОВАННОЙ}} + Q_{\text{ПОТЕРЬ}}, \quad \eta_k = \frac{Q_{\text{ИСПОЛЬЗОВАННОЙ}}}{Q_{\text{ТОПЛИВА}}} \cdot 100\%. \quad (5.1)$$

КПД современных энергетических котлов лежит в пределах 90 – 95 %.

Паровые турбины. Они делятся на четыре класса (серии). Серия К, конденсационные турбины, используются только для передачи мощности через вал электрическому генератору с последующей выработкой электрической энергии. Турбины серии Р (с противодавлением), работающие только на отборе пара, именно этот отбор обеспечивает объем пара, проходящий через проточную часть турбины и следовательно мощность на ее валу. Серия Т, эта серия турбин обеспечивает промежуточный отбор пара для целей теплофикации, кроме того, она может работать в конденсационном режиме. Таким образом ее мощность на валу обеспечивается объемом пара в отборе плюс объемом пара, идущим в конденсатор. Допускается любое соотношение между этими двумя частями пара. Другими словами такая турбина может работать чисто в теплофикационном режиме, обеспечивая 100 % мощности, в чисто конденсационном режиме, также обеспечивая 100 % мощности и при любых их соотношениях. Турбины серии ТП, они обеспечивают отбор пара для промышленных потребителей, отбор пара для целей теплофикации, они могут работать в чисто конденсационном режиме. Соотношение этих режимов может быть любое, такое же, как и для турбин серии Т.

С физической точки зрения паровые турбины делятся на активные и реактивные. У первых, которые называют турбинами Лавалля, вращающий момент ротора возникает за счет изменения направления скорости потока пара в роторе. При этом обеспечивается увеличение скорости движения пара в неподвижных сопловых устройствах статора, которые имеют соответствующий профиль. У вторых (реактивных) момент вращения ротора возникает за счет изменения направления потока рабочего тела (пара) в роторе, а также за счет увеличения скорости потока в лопатках статора и лопатках ротора. Эти турбины называют по имени их изобретателя Ч. Парсонса. Реальные турбины смешанные, они имеют активную и реактивную составляющие. Как правило все паровые турбины быстроходные, рассчитанные на 3000 оборотов в минуту. Реже используются турбины со скоростью вращения 1500 оборотов в минуту.

Турбины обозначаются следующим образом, указывается серия, затем электрическая мощность генератора, и давление пара на входе турбины. Например: ПТ-60-130. Это означает, что турбина имеет

промышленный и теплофикационный отборы, может вращать генератор мощностью 60 МВт, давление пара на входе должно быть 130 атмосфер (13 МПа).

На рис. 5.2 показана в разрезе паровая турбина мощностью 50 МВт со скоростью вращения 3000 оборотов в минуту (К-50-130). Приняты обозначения:

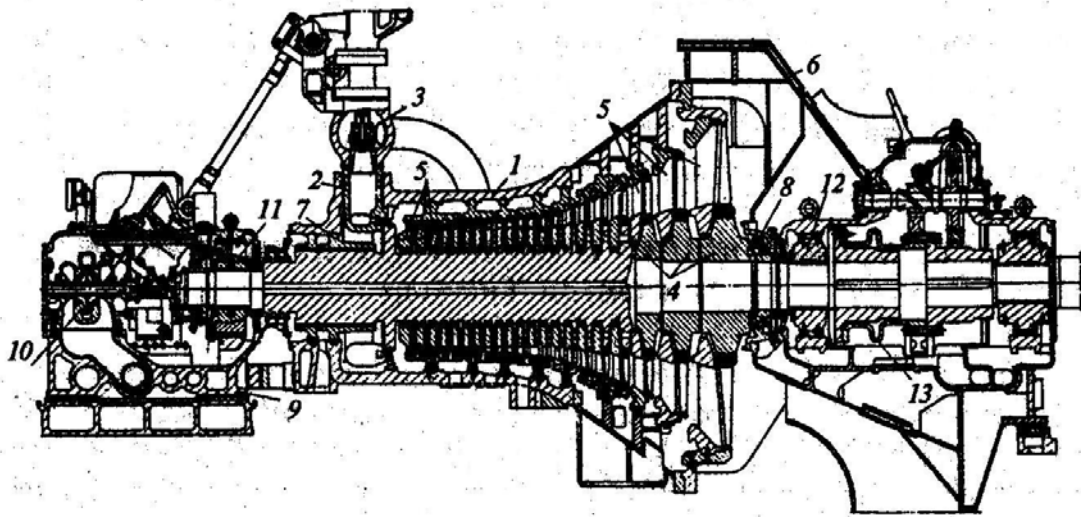
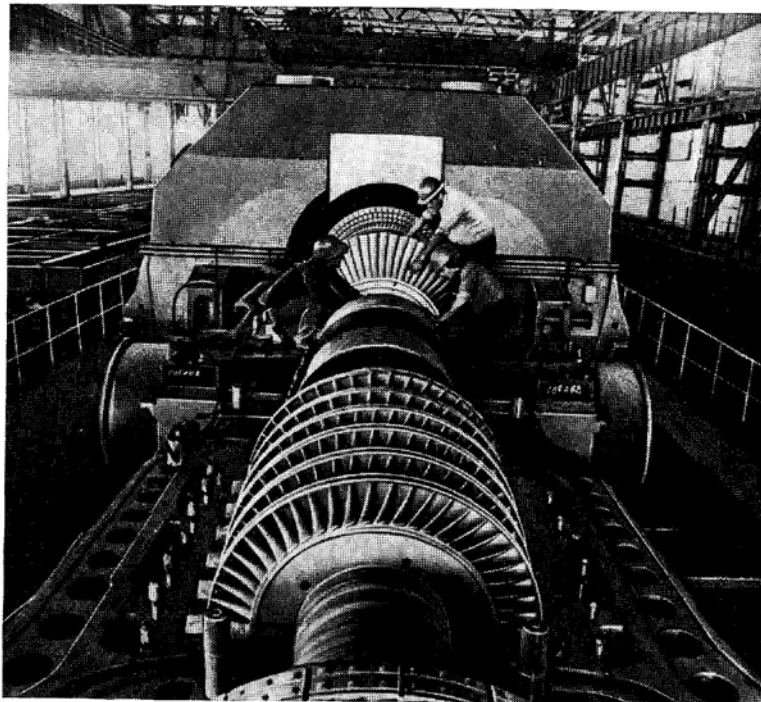


Рис. 5.2.

- 1 – Корпус (цилиндр) турбины.
- 2 – Паровая коробка, к которой подается пар по паровпускной трубе.
- 3 – регулирующий клапан, регулирует объем пара поступающего в турбину.



- 4 – Диски турбины, на которые насажены лопатки турбины. Всего турбина имеет 21 ступень, т.е. 21 диск с лопатками, однако, первые 18 представляют одно целое с валом турбины и образуют часть высокого давления (ЧВД), последние ступени имеют рабочие колеса большого диаметра, поскольку должны пропускать

большие

Рис. 5.3.

объемы пара при низком (относительно) давлении. Они образуют часть низкого давления (ЧНД).

5 – Неподвижные диафрагмы, в которых размещены сопловые решетки с соответствующими профилями.

6 – Выхлопной патрубок турбины, отводящий отработанный пар в конденсатор.

7 – переднее концевое уплотнение, предназначено для предотвращения утечки пара из цилиндра турбины.

8 – заднее концевое уплотнение, предназначено для предотвращения присоса воздуха из атмосферы, поскольку оно работает уже в области вакуума турбины.

9 – Станина, на которую опирается упорно-опорный подшипник.

10 – Масляный насос, обеспечивает подачу масла в систему смазки подшипников.

11 – Упорно-опорный подшипник, воспринимает вес ротора и фиксирует осевое положение ротора.

12 – Задний опорный подшипник.

13 – Соединительная муфта, передающая момент валу генератора.

На рис. 5.3. показан общий вид турбины мощностью 800 МВт.

Механический КПД турбины зависит от ее мощности. Так турбины мощность до 5000 кВт имеют КПД 96 – 99 %, При мощности более 5000 кВт КПД может приближаться к 99.5 %.

Необходимый элемент цикла Ренкина – конденсатор. По сути он представляет собой теплообменный аппарат, в котором охлаждающая вода отнимает теплоту у отработанного пара, конденсирует его. Второе назначение конденсатора заключается в обеспечении вакуума на выходе турбин,

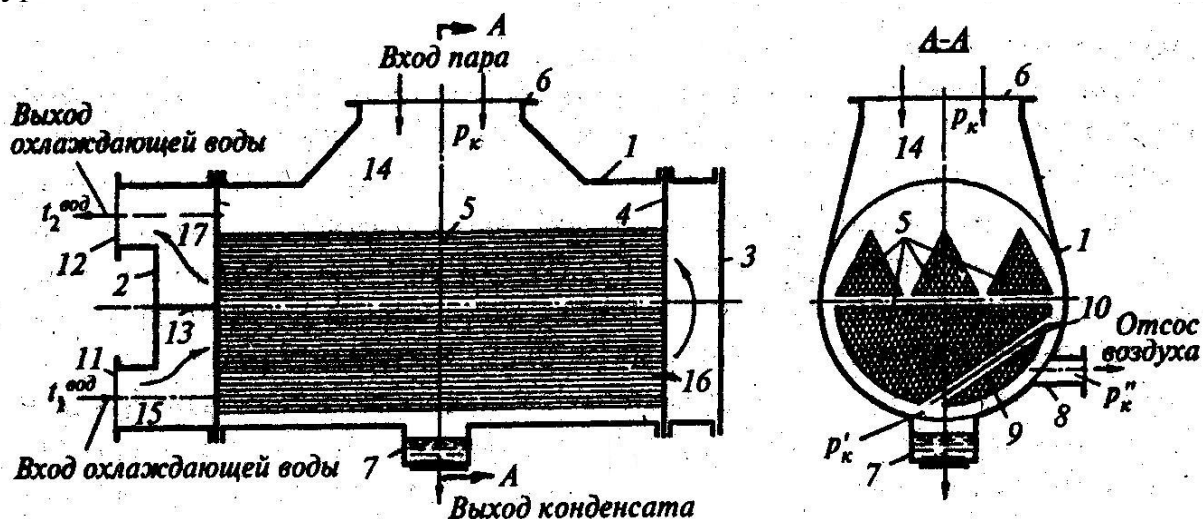


Рис.

5.4.

который и создается при конденсации пара. Принципиальная схема конденсатора показана на рис. 54. Обозначения следующие:

1 – корпус конденсатора.

- 2 – крышка конденсатора с трубной доской.
- 3 – Вторая крышка конденсатора.
- 4 – Вторая трубная доска, к трубным доскам прикреплены трубы, по которым проходит охлаждающая вода.
- 5 – Прямые охлаждающие трубы.
- 6 – Фланец, который прикрепляется к выходу турбины, и через который отработанный пар поступает из турбины в конденсатор.
- 7 – Место сбора конденсата.
- 8 – Патрубок, предназначенный для отсоса воздуха и несконденсированного пара.
- 9 – Отделенная часть трубной поверхности, предназначенная для интенсивного охлаждения пара. При этом обеспечивается его минимальное удаление вместе с воздухом
- 10 – Перегородка, отделяющая часть трубной поверхности.
- 11 – Труба, подводящая охлаждающую воду.
- 12 – Труба, отводящая отработанную охлаждающую воду.
- 13 – Перегородка, разделяющая входящую и выходящую охлаждающую воду.
- 14 – Горловина – вход отработанного пара турбины.
- 15, 16, 17 – Камеры, соответственно входная, промежуточная и выходная.

Упомянутые в тепловых схемах ТЭЦ водонагреватели, представляют собой теплообменные аппараты трубчатого или пластинчатого типа, в которых передача теплоты происходит через стенки труб или стенки пластин соответственно.

ЛЕКЦИЯ 6. ОТОПЛЕНИЕ И ГОРЯЧЕЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ

В настоящей лекции будут рассмотрены централизованные схемы отопления и горячего водоснабжения.

Источники тепла. В городах источниками тепла не редко являются ТЭЦ, тепловые схемы которых были рассмотрены в лекции 4. Теплофикационные турбины (серии Т или ПТ) имеют отбор пара, используемый для подогрева холодной воды, поступающей на вход теплообменного аппарата (см. рис. 4.2). Эта вода должна иметь качество питьевой водопроводной воды. Доведение воды до требуемого качества должно осуществляться водоочистительными сооружениями городов. На ТЭЦ осуществляется только деаэрация подаваемой воды (удаление из воды воздуха, имеется ввиду прежде всего кислорода). Как правило, на ТЭЦ имеется несколько водогрейных котлов. Они используются как пиковые источники теплоты, когда не хватает тепловой мощности турбины, они используются также как самостоятельные источники теплоты, например, в летний период, когда требуется небольшая тепловая мощность только для горячего водоснабжения. Кроме того, на ТЭЦ должны быть баки с горячей водой, как резервные источники тепла, используемые в основном в аварийных случаях.

Упомянутые выше водогрейные котлы служат вторым источником при централизованном теплоснабжении. Они в необходимых количествах устанавливаются на отопительных котельных, могут работать в общую тепловую сеть или снабжать отдельных тепловых потребителей. Диапазон тепловых мощностей водогрейных котлов, выпускаемых промышленностью, весьма велик, от единиц Гкал/час до 180 Гкал/час (208 МВт). Широко распространены водогрейные котлы типа КВГМ-100 (котел водогрейный газо-мазутный, мощностью 100 Гкал/час (116 МВт)). На крупных котельных используются водогрейные котлы типа ПТВМ -180. По видам сжигаемого топлива водогрейные котлы также весьма разнообразны. Мощные водогрейные котлы в качестве топлива используют природный газ, мазут, уголь, торф. Менее мощные котлы могут использовать упомянутые выше виды топлива, кроме того, они могут использовать древесные отходы. Водогрейные котлы могут подогревать воду до 150 градусов Ц, но поскольку вода находится под давлением, то она не вскипает.

Требования к системам централизованного отопления. Требования определяются строительными нормами и правилами (СНИП). Прежде всего система отопления должна обеспечить комфортную температуру внутри помещений, например:

- жилые помещения, гостиницы - $+18^{\circ}\text{C}$,
- учебные заведения, предприятия общественного питания - $+16^{\circ}\text{C}$,
- театры, магазины - $+15^{\circ}\text{C}$,
- детские сады, больницы - $+20^{\circ}\text{C}$,
- бани - $+25^{\circ}\text{C}$.

Верхний предел комфортности лежит около 24 – 25 градусов Ц.

Упомянутые температурные требования должны выдерживаться при расчетных отрицательных температурах наружного воздуха. В свою очередь последние определяются на основе карты климатического районирования. Согласно этой карте расчетная температура для Петрозаводска -29°C , для Норильска -45°C , для Москвы -25°C .

Тепловая характеристика зданий также играет немалую роль в определении объема теплоты, необходимого для поддержания требуемой температуры внутри помещений. Здания характеризуются коэффициентом теплоотдачи, который связан с другими величинами следующим соотношением:

$$\alpha_c \cdot \delta t = k_c \cdot \Delta t, \quad (6.1.)$$

где α_c – коэффициент теплоотдачи от внутреннего воздуха к внутренне поверхности стены, k_c – коэффициент теплопередачи стен здания, δt – допустимый перепад температур между внутренним воздухом и внутренней поверхностью стены (обычно это 5 – 6 градусов Ц), $\Delta t = t_{\text{ВНУТР}} - t_{\text{НАР}}$ – разность температур воздуха внутри помещения и наружного воздуха (например 18 – $(-30)=48$). Потребное количество теплоты в исчислении на час определяется следующим образом. Используется формула:

$$Q = q \cdot F \cdot (1 + k), \quad (6.2)$$

здесь q – удельный показатель расхода теплоты [кДж/м²·час], F – площадь помещения, k – поправка, касающаяся отопления общественных зданий. Удельные усредненные показатели расхода теплоты можно взять из СНИПа:

$t_{\text{НАРУЖНОГО ВОЗДУХА}}$	0	-10	-20	-30	-40
q [ккал/м ² ·час]	80	110	130	150	160
q [кДж/м ² ·час]	333	458	541	625	666

Эти величины могут уточняться в зависимости от конструкции здания и используемых материалов.

Пример, квартира имеет площадь $F = 100 \text{ м}^2$, расположена в городе с расчетной температурой наружного воздуха -30°C . Из таблицы находим удельный показатель расхода $q = 625 \text{ кДж/м}^2 \cdot \text{час}$. По формуле (6.2) находим часовой расход теплоты и мощность:

$$Q = 625 \cdot 100 = 62500 \frac{\text{кДж}}{\text{час}} = \frac{62500 \text{кДж}}{3600 \text{сек}} = 17.36 \text{ кВт}.$$

Существует другой вариант расчета потребного количества теплоты:

$$Q[\text{Вт}] = x_0 \cdot V \cdot (t_{\text{ВН}} - t_{\text{НАР}}), \quad x_0 = \frac{a}{\sqrt[3]{V}}, \quad (6.3)$$

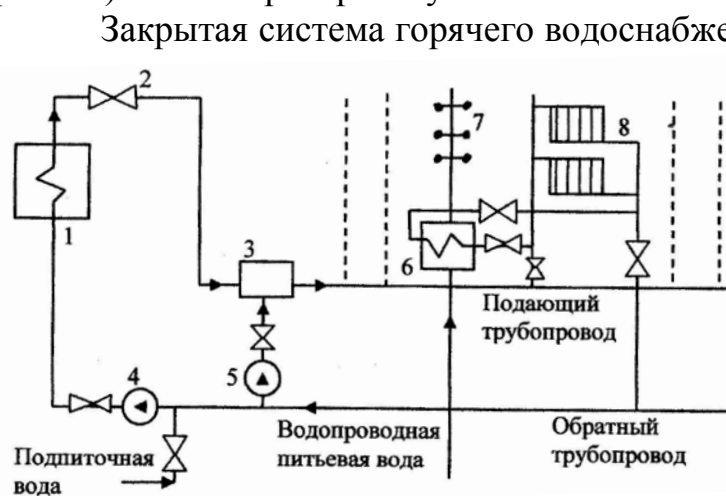
где $a = 1.5 - 2.5$ – коэффициент учитывающий теплоизоляцию здания (например, $a = 1.6$ для стен здания в 2.5 кирпича, $a = 2.2$ для блочных домов), V – объем помещения. Приняв высоту рассмотренной выше квартиры $H = 3 \text{ м}$, объем помещения $V = F \cdot H = 300 \text{ м}^3$. Далее находится требуемая мощность источника теплоты:

$$Q_{\text{ВТ}} = \frac{a}{\sqrt[3]{V}} \cdot V \cdot (t_{\text{ВН}} - t_{\text{НАР}}) = \frac{2.5}{\sqrt[3]{300}} \cdot 300 \cdot [20 - (-30)] = 1.449 \cdot 10^4 \text{ Вт} = 16.81 \text{ кВт}.$$

Имеем несколько отличающиеся величины, но можно говорить о практическом совпадении результатов расчета. Если известна продолжительность отопительного периода, то можно подсчитать общий объем теплоты необходимый на весь период отопления. Однако для такого расчета необходимо знать график изменения температур во времени или рассчитывать по средней величине наружного воздуха за отопительный период. Отопительный период определяется следующим образом. Началом отопительного периода считается тот момент, когда среднесуточная температура наружного воздуха стала ниже 8 градусов Ц в течение 5 суток в подряд. Концом отопительного периода считается тот момент, когда среднесуточная температура наружного воздуха становится выше 8 градусов Ц в течение 5 суток в подряд. Для г. Петрозаводска отопительный период примерно начинается 15 сентября и заканчивается 15 мая.

Горячее водоснабжение. Горячее водоснабжение неразрывно связано с централизованным отоплением, хотя, конечно, в летний период отопление не нужно, но горячая вода необходима.

Различают два принципиальных вида горячего водоснабжения, или, как говорят два вида водоразбора. Первый вариант – закрытая система горячего водоснабжения (рис. 6.1), второй вариант – открытая система (рис.6.2). Рассмотрим работу этих систем.



Закрытая система горячего водоснабжения имеет источник тепла -1, в качестве которого может выступать ТЭЦ, котельные с водогрейными котлами. Через напорный вентиль -2 горячая вода с температурой достигающей 150⁰С подается в подающий трубопровод. В теплообменнике смешивающего типа

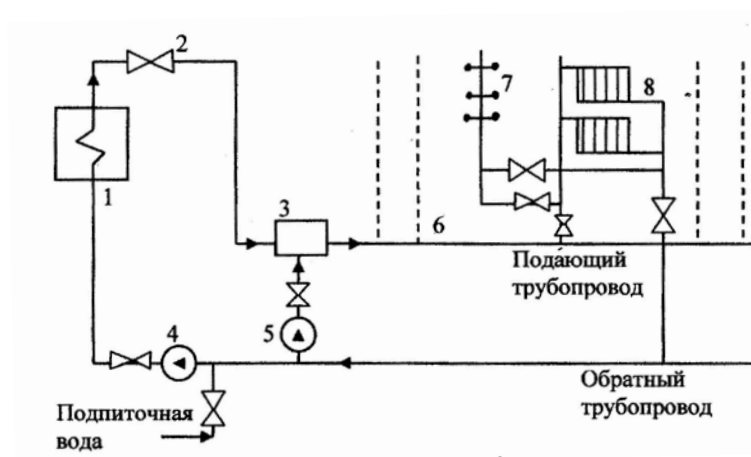
(смешивается прямая горячая вода и обратная во-

Рис. 6.1.

да, подаваемая насосом -5) вода принимает температуру, необходимую для отопления (95⁰С). Эта вода подается в батареи отопления – 8. Теплообменник поверхностного типа – 6 обеспечивает подогрев водопроводной воды до температуры 65⁰С, подогретая вода используется в системе горячего водоразбора – 7. Утечка сетевой воды компенсируется подпиточной водой, которая вместе с обратной водой подается сетевым насосом – 4 в источник тепла для подогрева. В результате получается двухтрубная система теплоснабжения, работающая по замкнутому циклу.

Открытая система горячего водоснабжения характеризуется тем, что в водоразборники – 7 подается та же вода, которая используется для теплоснабжения. Подогретая вода в источнике тепла через напорный вентиль

– 2 подается в теплообменник смешивающего типа – 3. Для доведения сетевой воды до требуемой температуры в теплообменник насосом – 5 подается обратная вода. Далее сетевая вода поступает в здания. Непосредственно она подается в батареи отопления – 8, а с добавкой обратной воды в систему подачи горячей воды к водоразборникам – 7.



Приведенные схемы теплоснабжения носят упрощенный характер, показывающие только принцип теплоснабжения. Реальные

Рис. 6.2. тепловые сети имеют много не показанных элементов, таких как системы регулирования, в том числе и автоматические, системы телемеханики и защиты и т.п.

ЛЕКЦИЯ 7. АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ (АЭС)

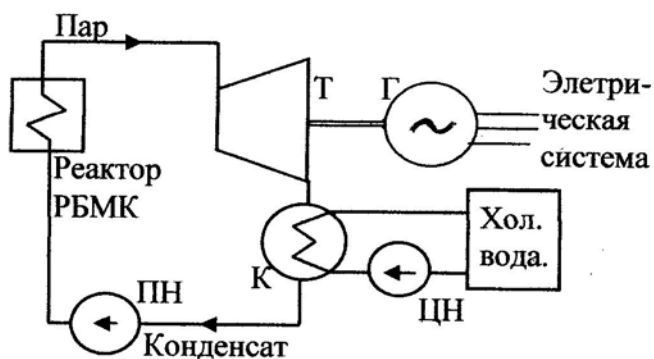
Первая атомная электростанция была пущена в 1954 году около г. Обнинска, мощность ее составила 5 МВт электрических. С тех пор атомные электростанции продолжают увеличивать свою долю в выработке электроэнергии.

По своей сути АЭС есть тепловые электростанции, у которых вместо парового котла источником пара является атомный реактор или промежуточный теплообменник. В настоящее время существует несколько типов АЭС, различающихся в основном реакторами. Прежде всего различают атомные реакторы на медленных (тепловых) нейтронах и атомные реакторы на быстрых нейтронах.

АЭС с реакторами на медленных нейтронах. В лекции 2 говорилось, что в реакторах на медленных нейтронах используется обогащенное урановое ядерное топливо с содержанием $^{235}_{92}\text{U}$ около 3 % и $^{238}_{92}\text{U}$ до 97 %. Возможно также использование плутония $^{239}_{94}\text{Pu}$.

Атомные реакторы, использующие урановое ядерное топливо делятся на несколько принципиальных видов. Рассмотрим два из них, наиболее популярных.

Реакторы типа РБМК (реактор большой мощности, канальный).



Название реактора говорит о том, что тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) с ядерным топливом размещаются в отдельных каналах с индивидуальной системой охлаждения. В свою очередь ТВЭЛы расположены среди замедлителей нейтронов, в качестве которых используется графит. Использование реакторов

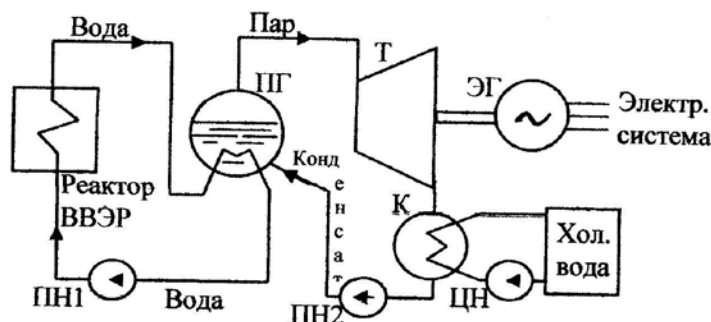
типа

Рис. 7.1.

РБМК позволяет создать одноконтурную схему электростанции, показанную на рис. 7.1. Для таких схем предъявляются повышенные требования к чистоте воды, циркулирующей между реактором и турбиной. Вода должна быть дисциplinированной, не содержащей никаких примесей. В этом случае вода, прошедшая активную зону реактора, не является радиоактивной. Использование реакторов этого типа позволяют создавать энергетические блоки мощностью 1500 МВт электрических.

Второй вариант атомных реакторов относится к категории корпусных. Такое наименование реактор получил в силу того, что его активная зона помещается внутри стального корпуса, рассчитанного на давление теплоносителя, обеспечивающего отвод тепла от активной зоны. Реакторы этого типа именуются ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор).

Замедлителем нейтронов в таких реакторах является обыкновенная вода. Схема энергетического блока с реакторами ВВЭР показана на рис. 7.2. Система такого энергоблока двухконтурная. В первом контуре циркулирует



вода под давлением. Она является теплоносителем. Эта вода, нагретая в реакторе, идет в парогенератор (ПГ), где отдает тепло воде второго контура. Охлажденная вода первого контура питательным насосом

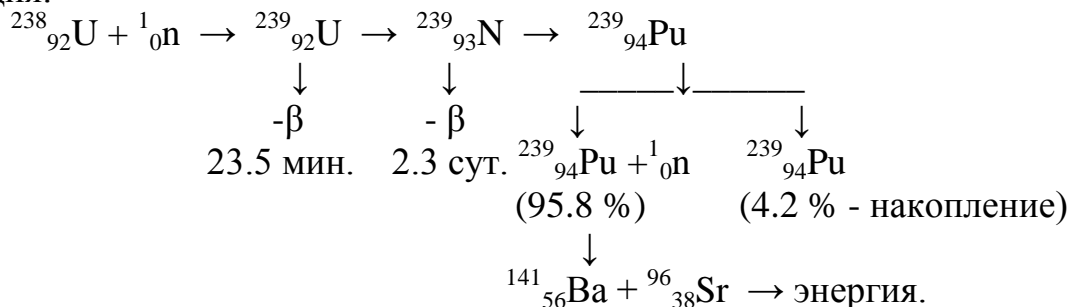
(ПН1) подается на вход реактора. Вода второго

Рис. 7.2.

контура, приняв тепло от

воды первого контура испаряется, и из парогенератора (ПГ) поступает в турбину (Т). Оработанный пар поступает в конденсатор (К), далее в виде конденсата подается питательным насосом (ПН2) в парогенератор. Реакторы типа ВВЭТ характеризуются повышенной надежностью и безопасностью. Максимальная электрическая мощность таких реакторов достигает 1000 МВт.

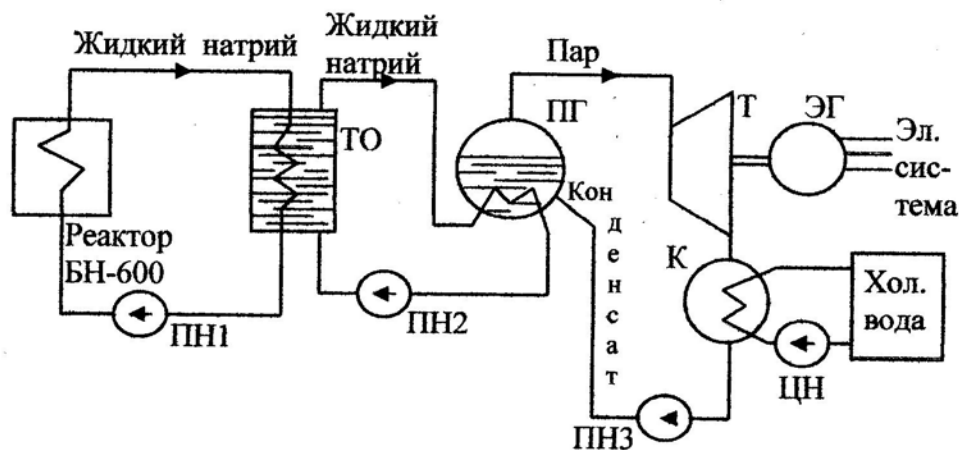
АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. Такие реакторы называют реакторы – размножители или реакторы бридеры (от английского слова breeder). В лекции 2 было сказано, что уран $^{238}_{92}\text{U}$ практически не реагирует на медленные нейтроны, но он хорошо взаимодействует с быстрыми нейтронами. При этом становится возможной следующая ядерная реакция:



Из приведенной диаграммы видно, что происходит постепенное накопление плутония 239, который уже может использоваться в реакторах, работающих на медленных нейтронах. Поэтому такие реакторы и называются реакторами – накопителями. Одновременно в таком реакторе происходит деление урана 235 (содержание которого не более 1 %) с выделением энергии и 95.8 % плутония 239 также с выделением энергии.

Специфические ядерно-физические свойства и условия осуществления цепной реакции в таком реакторе исключают возможность использования такого теплоносителя как вода. Другими словами, требуется использование жидкометаллического теплоносителя. В качестве последнего чаще всего используют натрий. Например, в наиболее популярном в России реакторе такого типа БН – 600. Использование в первом контуре

жидкометаллического теплоносителя потребовало схему энергетического блока с реакторами ВН -600 выполнять трехконтурной. Такая схема показана на рис. 7.3. В



первом контуре жидкий натрий, нагретый в реакторе, поступает в теплообменник (ТО), где жидкий металл отдает

тепло жидкому натрию второго контура. Если натрий первого контура радиоактивный, натрий второго контура не радиоактивный. Жидкий натрий второго контура поступает в парогенератор (ПГ), отдает тепло воде третьего контура, превращая ее в пар, который уже

Рис.7.3.

и поступает в

турбину. (Т). В остальном, что касается третьего контура, схема аналогичная схеме любой конденсационной электростанции.

Сведения о развитии атомной энергетики. Несмотря на немалые трудности и аварии на АЭС атомная энергетика развивалась и вероятно будут развиваться. Основное преимущество АЭС заключается в отсутствии выбросов в атмосферу CO_2 . Недостатки те же, какие существуют у всех конденсационных электростанций, это тепловое загрязнение, что хорошо видно из таблицы 7.1. где сравнивается тепловая и электрическая мощность реакторов. Немалой проблемой является утилизация и хранение отработавшего топлива.

Все рассмотренные выше и упомянутые в таблице 7.1 реакторы относятся к категории гетерогенных, у которых топливо, замедлитель нейтронов и теплоноситель разделены, Существуют реакторы, относящиеся к категории гомогенных, у которых топливо, замедлитель нейтронов и теплоноситель представляют собой однородную смесь (расплав).

Таблица 7.1. Основные сведения о реакторах.

Параметры	Реакторы				
	РБМК-1000	РБМК-1500	ВВЭР-1000	ВВЭР-440	ВН-600
Мощность, МВт	1000/3200	1500/4800	1000/3000	440/1375	600/1470
Электр./Тепловая	0.3125	0.3125	0.3333	0.3200	0.4081
Теплоноситель	Кипящая вода	Кипящая вода	Вода	Вода	Натрий
Масса топлива, т.	192	189	75	40	8.5
Содержание делящегося нуклида, %	2	2 – 2.4	3 – 3.4	3.3	18

Температура теплоносителя. град.Ц Вход/Выход	270/284	270/284	289/322	269/300	410/580
КПД, %	78	78	83	80	90

При определении КПД (нижняя строка) учитывались только потери в самом реакторе. Температура теплоносителя указана для первого контура. Так, для реактора БН-600 второй натриевый контур имеет температуры 340/550, а третий, водяной контур имеет температуру пара 540 град.Ц при давлении 14 МПа.

Таблица 7.2. Основные сведения об российских АЭС.

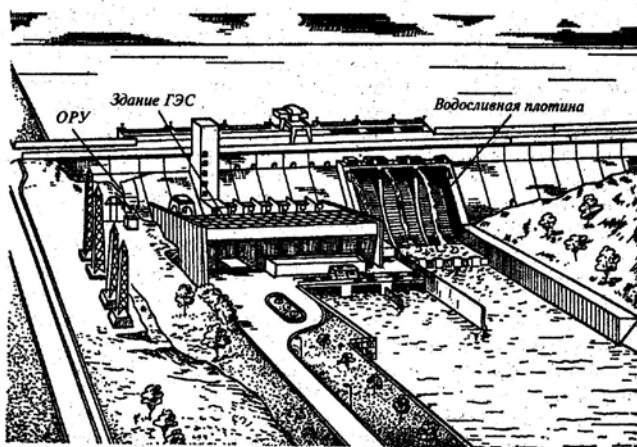
АЭС	Р уст. МВт	Реактор	Кол-во блоков	Годы пуска первого и последующих блоков
Ново- Воронежская	1880	ВВЭР-440 ВВЭР- 1000	2 1	1971, 1972 1980
Ленинградская	4000	РБМК- 1000	4	1973 - 1981
Кольская	1760	ВВЭР-440	4	1973 - 1984
Билибинская	48	ЭГП-6	4	1974 - 1976
Курская	4000	РБМК- 1000	4	1976 – 1985
Белоярская	600	БН-600	1	1980
Смоленская	3000	РБМК- 1000	3	1982 - 1990
Калининская	3000	ВВЭР- 1000	3	1984 - 2004
Балаковская	4000	ВВЭР- 1000	4	1985 - 1993
Ростовская (Волго- Донская)	2000	ВВЭР- 1000	2	2002, 2010

Реактор Билибинской АЭС типа ЭГП – 6 представляет собой энергетический реактор малой мощности, он обеспечивает 48 МВт электрической мощности и 78 МВт тепловой мощности.

ЛЕКЦИЯ 8. ГИДРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

Гидроэлектрические станции (ГЭС) занимают значительное место в обеспечении потребителей электрической энергией. В общем объеме выработки электроэнергии в России их доля составляет около 20 %, которая несколько колеблется в зависимости от водности года. Кроме общей выработки электроэнергии ГЭС играют большую роль как регуляторы перетоков мощности по линиям электропередачи, как источники резервной мощности, и, наконец, они играют главную роль в регулировании частоты, которая должна поддерживаться в пределах 50 ± 0.05 Герца.

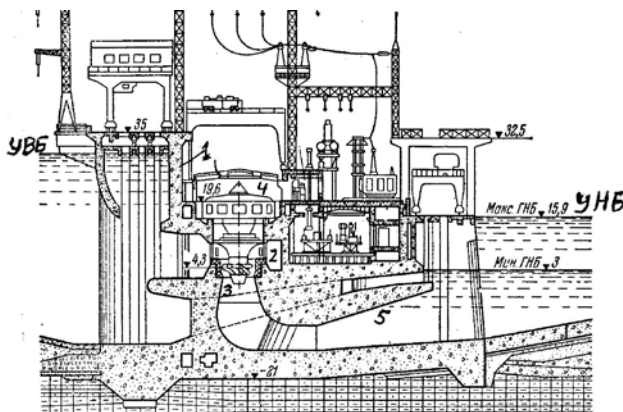
Различают несколько видов ГЭС. Собственно ГЭС, использующие водоток рек, который образует водяной напор. Гидроаккумулирующие (ГАЭС), накапливающие воду при провале нагрузок и использующие накопленную воду при максимуме нагрузок. Приливные ГЭС, использующие водяной напор, образующийся при приливах и отливах. Некоторые другие ГЭС (волновые, прямоточные и т.п.).



прохода ее

Рис. 8.1.

помимо турбин при образовании ее



По компоновке ГЭС делят на приплотинные, русловые и дерива-

Состав ГЭС. В состав ГЭС прежде всего входят гидротехнические сооружения, это дамбы, плотины, здания ГЭС, напорные сооружения, каналы подводящие и отводящие. Их назначение: создание водяного напора, образование здания ГЭС, образование системы подвода воды к зданию ГЭС, в конечном итоге к турбине, образование системы отвода воды после

через турбину, сброс воды излишков. Далее в составе ГЭС выделяют гидромеханическое оборудование, состоящее из гидравлических турбин, спиральных камер, систем регулирования. Наконец выделяют электрическую часть ГЭС, состоящую из электрических генераторов, как правило, расположенных на одном валу с турбиной, распределительных устройств.

Рис. 8.2.

ционные. Различают также

горизонтальное расположение турбин и генераторов и вертикальное.

Рассмотрим ГЭС приплотинного типа, общий вид которой показан на рис. 8.1, а разрез одного из вариантов показан на рис. 8.2. При такой компоновке здание ГЭС (1) совмещается с основной плотиной, которые вместе создают верхний бьеф, Уровень верхнего бьефа (УВБ) образует нормальный подпорный горизонт (НПГ). Вода попадает в спиральную камеру (2), где принимает вращательное движение и поступает на лопасти турбины (3). На одном валу с турбиной расположен генератор (4). Вода пройдя турбину через выходную трубу (5) поступает в отводящий канал, образуя уровень нижнего бьефа (УНБ). Разность между УВБ и УНБ образует напор данной ГЭС:

$$H = \text{УВБ} - \text{УНБ}. \quad (8.1)$$

Строго говоря, напор не является постоянной величиной, он имеет сезонные изменения и даже суточные, поскольку изменяются УВБ и УНБ. Зная величину напора и расход воды через турбину можно определить мощность, которую турбина развивает на валу и передает генератору:

$$P[\text{кВт}] = g \cdot Q \cdot \rho \cdot H \cdot \eta, \quad (8.2)$$

где $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ – земное ускорение, $Q [\text{м}^3/\text{с}]$ расход воды через турбину, $\rho [\text{кг/м}^3]$ – плотность воды, η – КПД турбины. Пример, $H = 28 \text{ м}$, $Q = 100 \text{ м}^3/\text{с}$, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\eta = 0.92$. Согласно формуле (8.2) получаем мощность ГЭС:

$$P = 9.81 \cdot 100 \cdot 1000 \cdot 28 \cdot 0.92 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{м} \right] = 25.27 \cdot 10^6 [\text{Вт}] = 25.27 \text{ МВт}.$$

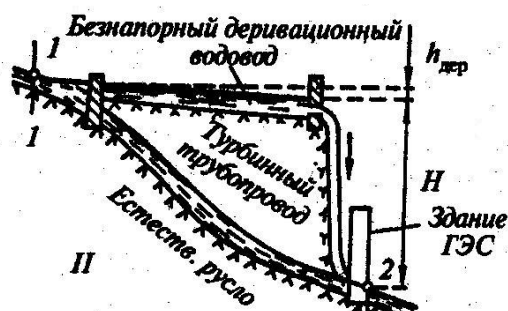


Формула
(8.2)
справедли
ва для
расчета
мощности
ГЭС
любых
вариантов
,
приплоти
нных

дерива

Рис. 8.3.

ционных



ГАЭС и т.д.

Деривационные ГЭС характерны тем, что вода к зданию ГЭС подводится специальным каналом, именуемым деривационным каналом. Такой канал соединяет водохранилище со зданием ГЭС,

он должен обеспечить поступление воды в необходимом объеме. Длина деривационного

Рис. 8.4. канала бывает от сотен метров до десятков километров. Естественно, что для работы ГЭС нижний бьеф должен находиться ниже подвода воды деривационным каналом. Схема подвода воды в плане показана на рис. 8.3, схематичный разрез ГЭС на рис. 8.4.

Формула (8.2) следует из известного уравнения Д. Бернулли, которое описывает движение идеальной жидкости (жидкости, движущейся без трения, с небольшим допущением за таковую можно принять воду):

$$p + \frac{\rho \cdot v^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z = const. \quad (8.3)$$

Здесь p – статическое давление, получаемое жидкостью от внешней среды, ρ – плотность жидкости, v – скорость ее движения, g – земное ускорение, z – высота расположения движущейся жидкости над условным нулевым уровнем. Если обе части равенства (8.3) разделить на $\rho \cdot g$ и умножить на $\rho \cdot g \cdot W$, где W – воды в m^3 , то формула отразит энергию потока воды. Для потоков воды одной и той же реки, но находящихся на разных уровнях две величины энергии определяются как:

$$\mathcal{E}_1 = \rho \cdot g \cdot W \cdot \left(\frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1 \right), \quad \mathcal{E}_2 = \rho \cdot g \cdot W \cdot \left(\frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + z_2 \right). \quad (8.4)$$

Разность этих энергий определяет тот объем энергии который можно извлечь из этого потока воды:

$$\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = \rho \cdot g \cdot W \cdot \left(z_1 - z_2 + \frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot g} \right). \quad (8.5)$$

При свободном движении воды статическое давление одинаковое, $p_1 = p_2$, также можно пренебречь разностью скоростей, тогда формула (8.5) упростится:

$$\Delta \mathcal{E} = \rho \cdot g \cdot W \cdot (z_1 - z_2) = \rho \cdot g \cdot W \cdot H. \quad (8.6)$$

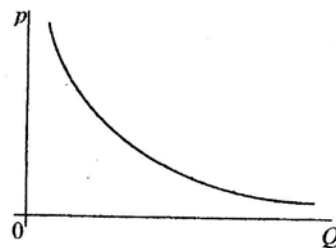
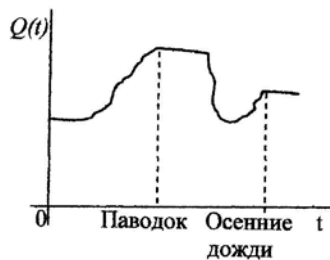
Разделив обе части равенства (8.6) на время осуществим переход к расходу воды и соответственно к мощности. Если ввести еще величину КПД установки, то получим формулу (8.2).

Вода для ГЭС собирается в пределах водосбросного бассейна, именно он характеризует общий сток воды. При этом определяют расход воды в m^3/c . На основе многолетних исследований и измерений стока воды всех источников бассейна определяют суммарный сток воды и строят гидрограф, т.е. график зависимости стока воды от времени. На его основе определяют суммарный расход и общий сток за требуемый период времени (месяц, квартал, год):

$$Q(t) = \sum_{i=1}^{i=N} q_i(t), \quad W = \int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt, \quad t_2 - t_1 = T, \quad (8.7)$$

$Q(t)$ – суммарный расход воды от всех источников, $q_i(t)$ – расход каждого отдельного источника, t_1 и t_2 начало и конец отсчета, T – интересующий интервал времени. Расход да и суммарный сток воды в

ретроспективе являются вполне определенными величинами, однако эти же будущие величины зависят от множества непредсказуемых природных факторов. Поэтому можно говорить только о вероятности той или иной величины расхода. Эту вероятность называют обеспеченностью. Логика этого понятия такова, что малый расход гарантирован в большей мере, чем больший. Поэтому вероятность появления малого расхода выше, вероятность появления большего расхода меньше. Принято считать, что появление



расхода с вероятностью меньшей 0.1 % нереально и, следовательно, расчет всех гидротехнических сооружений можно вести с учетом расхода, вероятность которого 0.001. Пример изменения

стока во времени в разрезе года показан на рис. 8.5. Весенний паводок резко увеличивает расход, небольшое увеличение могут дать затяжные осенние дожди. Конкретная форма зависимости характерна для конкретного региона, а также она меняется от года к году.

На рис. 8.6 показана характерная зависимость вероятности появления расхода от величины самого расхода. Кривая соответствует качественному

Рис. 8.5.

Рис. 8.6.

описанию этой

зависимости. Кроме того, характерная форма этой зависимости позволяет предположить, что она (зависимость) подчиняется так называемому Н – распределению случайной величины. Действительно ранговый анализ, предполагает, что между множеством элементов, факторов, событий существует слабая связь, которая в силу особенностей этой слабой связи и обуславливает появление Н – зависимости. Такая методика рангового анализа была разработана на кафедре электроснабжения московского энергетического института (технического университета).

На практике прогнозирование расхода осуществляется следующим образом. За достаточно большее количество прошлых лет собирают данные о расходах в интересующий период времени, например в паводок. Результаты обрабатываются по законам и правилам математической статистики. В результате получают некоторую эмпирическую зависимость вероятности от величины расхода, например можно получить формулу, отражающую зависимость, показанную на рис. 8.6. Зная запасы снега перед паводком, можно спрогнозировать расход, определить вероятность его появления и на основе вероятности принимать конкретные решения.

Рассмотрим пример. Пусть средняя многолетняя величина расхода воды для периода паводка определена: $Q_{\text{ср}} = 260 \text{ м}^3/\text{с}$. Обработка многолетних данных о расходе позволила вывести зависимость:

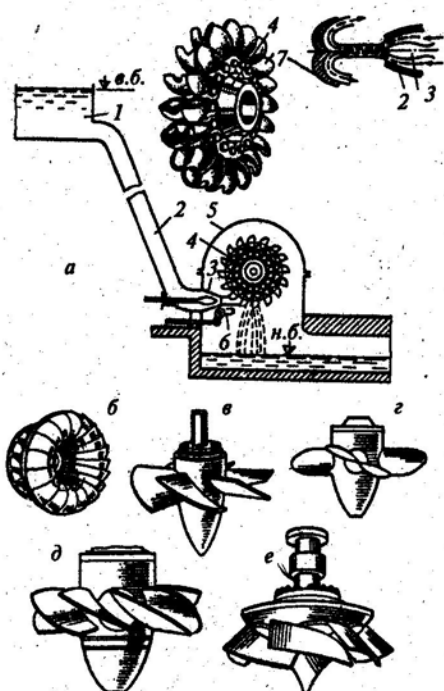
$$p(x) = \frac{1}{20 \cdot x^3 + 5 \cdot x^2 + x + 1}, \quad x = \frac{Q}{1000}, \quad (8.4)$$

Если конкретный зафиксированный или прогнозируемый расход $Q_I = 100 \text{ м}^3/\text{с}$, то из (8.4) следует $x_1 = \frac{100}{1000} = 0.1$, $p(x_1) = .$ Чаще всего результаты расчетов сводят в таблицы. В данном случае в табл. 8.1:

$Q_{\text{м/сек}}$	100	265	500	1000	2000	3500
x	0.1	0.265	0.5	1.0	2.0	3.5
$p(x)$	0.855	0.503	0.19	0.037	0.0055	0.001

Диапазон используемых напоров для ГЭС достаточно широк. С этих позиций ГЭС делятся на:

- низконапорные $H \leq 25$ метро,
- средненапорные $H = 25 - 80$ метров,
- высоконапорные $H > 80$ метров.



От напора зависит тип использованной турбины. На низконапорных ГЭС используют или пропеллерные или более экономичные поворотно-лопастные (ПЛ) турбины (рис. 8.7 в и г), которые имеют подварианты: двух перовые (д) и диагональные (е). Средненапорные в основном используют радиально-осевые (РО) турбины (б), наконец высоконапорные используют как радиально-осевые турбины, так и ковшевые (К) турбины (а). На рис. 8.7а также показана технология использования ковшевой турбины. 1 – верхний бьеф, 2 – трубопровод, 3 – сопло, 4 – рабочее колесо ковшевой турбины, 5 – кожух, 6 – регулировочная игла. Зависимость выбора типа турбины от величины напора прежде всего связана с явлением кавитации. Это явление является следствием резкого

падения давления

Рис. 8.7.

ниже критического при движении воды в турбине в тех местах, где наблюдается увеличение скорости. При снижении скорости и увеличения давления происходит скачкообразное превращение пара в воду. В этом месте возникает гидравлический удар, а также появление акустических волн, отрицательно действующих на поверхность лопастей турбины (явление кавитации), в результате в металле появляются растущие во времени каверны, приводящие к конечному итоге к разрушению турбины. Радиально-осевые турбины в меньшей мере подвержены кавитации по сравнению в поворотно-лопастными (и их разновидностями), кошевые турбины в меньшей степени подвержены кавитации по сравнению с радиально-осевыми.

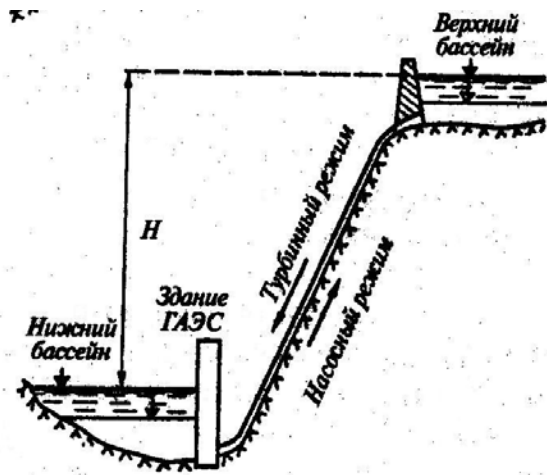
Как уже упоминалось, электрические генераторы расположены на одном валу с гидравлической турбиной. Скорость вращения и турбины и

генератора зависит только от числа пар полюсов ротора генератора и определяется формулой:

$$n = \frac{3000}{p} \left[\frac{\text{оборотов}}{\text{минуту}} \right], \quad (8.5)$$

где p – количество пар полюсов. При этом различают :

- тихоходные (ПЛ и их варианты) 16 2/3 - 300 об/мин,
- среднескоростные (РО) 100 – 600 об/мин,
- быстроходные (РО и К) 300 – 1500 об/мин.



Гидроаккумулирующие электростанции. Принцип их действия показан на рис. 8.8. Суть их режима работы заключается в следующем. Хорошо известно, что крупные тепловые и атомные электростанции должны работать в так называемом базовом режиме, т.е. с постоянной нагрузкой достаточно длительное время. В этом случае они имеют максимальную эффективность. В другой стороны потребляемая

нагрузка изменяется в течение суток и

Рис. 8.8.

недели. Для урегулирования этого

противоречия необходимы мобильные регуляторы нагрузки, одним из вариантов которых являются ГАЭС. В период спада нагрузки в энергосистеме ГАЭС работает в насосном режиме и перекачивает воду из нижнего бассейна в верхний. При этом она потребляет избыток электрической мощности, тем самым позволяя КЭС и АЭС работать с постоянной нагрузкой. В периоды максимальных нагрузок ГАЭС переходит в генераторный режим, срабатывая накопленную воду верхнего бассейна. Выдаваемая в этом режиме в сеть электрическая мощность обеспечивает постоянство нагрузки КЭС и АЭС, срезая, как говорят, пики нагрузок. Условие эффективности использования ГАЭС зависит от соотношения потерь, а именно:

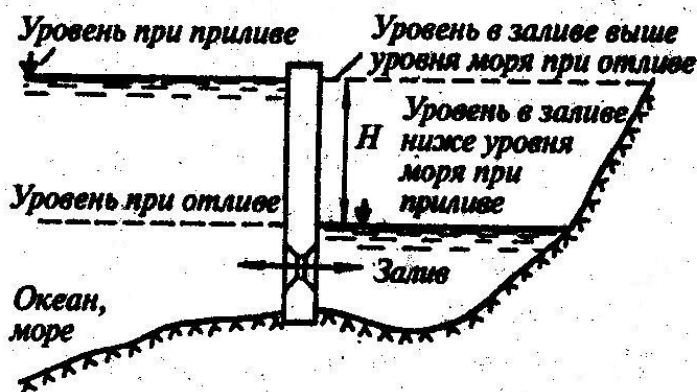
$$\Delta W_{\text{ГАЭС}} < \Delta W_{\text{КЭС+АЭС}}, \quad (8.6)$$

В формуле слева потери КАЭС, в основном зависящие от ее КПД, справа – сумма потерь на КЭС и АЭС за счет регулирования их нагрузки. Несмотря на то, что КПД ГАЭС невелик (75 – 82 %) использование ГАЭС получается весьма эффективным.

Режимы работы ГАЭС вносят существенные поправки в конструкцию турбинного и генераторного оборудования. Так, генераторы должны быть способными работать в двигательном режиме при максимальной мощности. Турбины должны работать в реверсивном режиме – чисто турбинном и насосном. При использовании поворотно-лопастных турбин это возможно осуществить соответствующим разворотом лопастей. При использовании

радиально- осевых турбин необходимо изменять направление вращения, с соответствующим переключением порядка чередования фаз генератора.

Приливные ГЭС (ПГЭС). Их сооружение возможно на берегах морей и океанов, где имеет место заметная величина разности уровней воды во время прилива и отлива. Общая схема ПГЭС показана на рис. 8.9. На ПГЭС как правило используют обратимые турбины, позволяющие работать как при приливе, заполняя при этом водохранилище, как и при отливе, сбрасывая накопленную воду через турбины в море (океан). В настоящее время работает экспериментальная ПГЭС на Кольском полуострове мощностью 400 кВт. Крупная ПГЭС работает во Франции мощностью 240 МВт. Существуют проекты сооружения ПГЭС в России, например Мезенская ПГЭС в Архангельской области.



Одним из недостатков ПГЭС можно считать тот факт, что режим выдачи мощности связан с режимом приливов-отливов, но не с режимом потребления электроэнергии.

Следует сказать,

что в большинстве случаев реки, озера, искус-

Рис. 8.9.

ственные водохранилища используются комплексно, с интересах различных отраслей хозяйственной деятельности. Во многих случаях режим работы ГЭС зависит от требований других хозяйствующих организаций. На режим работы ГЭС существенно влияет объем верхнего бассейна, который может быть искусственного происхождения, естественного (используются озера), возможно сочетание тех и других совместно. В зависимости от объема они делятся на водохранилища суточного регулирования, недельного, сезонного и многолетнего. Существуют ГЭС, работающие вообще без водохранилища, как говорят, по водотоку.

Гидравлический удар. Поскольку практически на всех ГЭС используются трубопроводы для подачи воды к турбинам, также вспомогательные трубопроводы, то вполне возможно появление повышенного давления при резком изменении расхода воды. Такое явление связано с тем, что вода практически не сжимается при увеличении давления, и это явление называется гидравлическим ударом. Известный Российский ученый Н.Е. Жуковский изучив явление гидравлического удара вывел формулу расчета давления, возникающего при гидравлическом ударе. Основная идея заключается в предположении, что изменение количества движения жидкости равно импульсу силы, что выражается формулой:

$$G \cdot (v + a) = p_y \cdot S, \quad (8.7)$$

где G – расход воды в м³/с, v – скорость движения воды в м/с, a – скорость звука в воде, которая равна скорости распространения ударной волны, S – площадь поперечного сечения трубопровода в м². В свою очередь:

$$G = \rho \cdot S \cdot v, \quad (8.8)$$

где ρ – плотность воды в кг/м³. Подстановка (8.8) в (8.7) дает:

$$\rho \cdot S \cdot v(v + a) = p_y \cdot S, \quad p_y = \rho \cdot v^2 + \rho \cdot v \cdot a, \quad a \gg v, \quad (8.9)$$

$$\rho \cdot v^2 \ll \rho \cdot v \cdot a, \quad p_y = \rho \cdot v \cdot a.$$

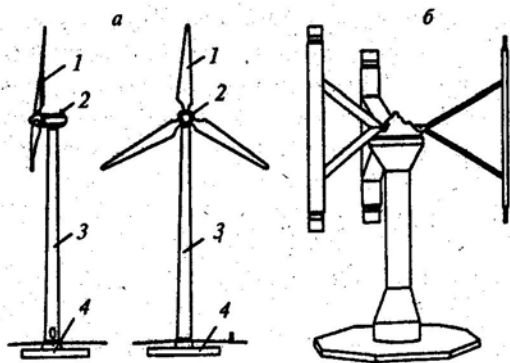
Формула говорит о том, что величина давления, возникающая при гидравлическом ударе не зависит от величины поперечного сечения трубопровода, другими словами не зависит от величины расхода воды, но зависит от скорости движения воды. Рассмотрим пример. Пусть скорость движения воды в трубопроводе $v = 5$ м/с (вполне реальная скорость), плотность воды $\rho = 1000$ кг/м³, скорость звука в воде $a = 1000$ м/с. Формула (8.9) дает:

$$p_y = 1000 \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right] \cdot 5 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right] \cdot 1000 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right] = 5 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \frac{1}{\text{м}^2} \right] = 5 \text{ МПа}.$$

Формула (8.9) дает значение давления при резком, практически мгновенном закрытии трубопровода. При конечной скорости закрытия получаются более сложные зависимости, соответственно давление получается несколько ниже, однако, и в этих случаях оно может достигать значительных величин. При регулировании режимов ГЭС, связанных с изменением расходов, в аварийных случаях, когда требуется быстрое закрытие трубопроводов сбросом аварийных затворов, возможно появление гидравлического удара. Инструкции оперативному персоналу и противоаварийная автоматика предусматривают противодействие гидравлическому удару.

ЛЕКЦИЯ 9. ВЕТРОВЫЕ И СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Ветровые электростанции. В лекции 1 упоминалось, что энергия ветра по сути своей есть энергия солнца. Ветер возникает за счет неравномерного прогрева атмосферы земли, вследствие чего возникает перепад атмосферного давления и, как следствие перемещение больших объемов воздуха, воспринимаемое как ветер.



Вся энергия ветра оценивается в диапазоне 175 – 219 тыс. млрд. кВт·часов. Предполагается, что к 2020 году возможен ввод ветровых электростанций (ВЭС) мощностью около 450 млн.кВт. со среднегодовой выработкой около 900 млрд.кВт·часов электроэнергии при 2000 часов использования установленной мощности. Не трудно подсчитать, что будет использовано 0.51 – 0.41 % от

ВОЗМОЖНОГО

Рис. 9.1.

потенциала.

ВЭС может состоять из одной или нескольких ветровых энергоустановок (ВЭУ). Существует два варианта конструкции ВЭУ: с горизонтальной осью и вертикальной осью (рис. 9.1). Первые более быстроходные, вторые более тихоходные. Наибольшее распространение получили ВЭУ с горизонтальной осью. Общий вид такой реальной ВЭУ показан на рис. 9.2.



Основные элементы ВЭУ. 1 - рабочее колесо ветродвигателя. Наибольшее распространение имеют трехлопастные рабочие колеса, используются двухлопастные и даже однолопастные с противовесом. 2 – гондола, в которой расположен редуктор и электрический генератор. Редуктор необходим для приведения в соответствие скорости вращения вала рабочего колеса, которое находится в пределах

от долей

Рис. 9.2.

оборотов в секунду до нескольких оборотов в секунду, и генератора, имеющего скорость вращения десятки оборотов в секунду. В качестве генераторов нередко используют асинхронные двигатели в генераторном режиме с последующим преобразователем частоты. 3 – башня, представляющая собой несущую конструкцию. 4 – фундамент. ВЭУ с вертикальным валом имеют лопасти с профилем близким к профилю самолетного крыла (в некоторых экспериментальных ВЭУ использовались крылья самолетов). За счет обтекания такого профиля создается окружное

усилие и соответствующий вращательный момент. В целом такие конструкции ВЭУ сложнее ВЭУ с горизонтальным валом.

Расчетная мощность ВЭУ с горизонтальным валом определяется следующей формулой:

$$P = N_{\text{уд}} \cdot F \cdot \eta_{\text{РОТ}} \cdot \eta_{\text{ГЕН}} \cdot \xi, \quad N_{\text{уд}} = 0.5 \cdot \rho \cdot v^3, \quad (9.1)$$

здесь $F = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ – ометаемая рабочим колесом площадь, D – диаметр рабочего колеса, ρ – удельная плотность воздуха, v – скорость ветра, $\eta_{\text{РОТ}}$ – КПД ротора, включая редуктор, $\eta_{\text{ГЕН}}$ – КПД генератора, включая все преобразователи, ξ – доля мощности получаемая ветродвигателем от потока.

В примере рассчитаем мощность при двух скоростях ветра $v_{\text{min}} = 4$ м/с, $v_{\text{max}} = 20$ м/с. Далее примем: $D = 10$ м, $\rho = 1.226$ кг/м³, $\eta_{\text{РОТ}} = 0.9$, $\eta_{\text{ГЕН}} = 0.9$, $\xi = 0.45$ (значения этой величины лежат в пределах 0.4 – 0.5). Вычисления дают следующие значения:

$$N_{\text{удmin}} = 0.5 \cdot 1.226 \cdot 4^3 = 39.2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \quad N_{\text{удmax}} = 0.5 \cdot 1.226 \cdot 20^3 = 4904 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$$

$$F = \frac{\pi \cdot 10^2}{4} = 78.5 \text{ м}^2, \quad P_{\text{min}} = 39.2 \cdot 78.5 \cdot 0.9 \cdot 0.9 \cdot 0.45 = 1123 \text{ Вт} = 1.123 \text{ кВт},$$

$$P_{\text{max}} = 4904 \cdot 78.5 \cdot 0.9 \cdot 0.9 \cdot 0.45 = 140319 \text{ Вт} = 14.032 \text{ кВт}.$$

Видна большая зависимость мощности, развиваемой ВЭУ от скорости ветра. Однако, при скорости приближающейся к 25 м/с лопасти ветроколеса становятся в нейтральное положение (если они имеют изменяющийся угол атаки).

Одним из существенных недостатков ВЭС является полная зависимость выдаваемой мощности от скорости ветра, прогнозы которой оставляют желать лучшего. Поэтому практически ВЭС могут работать только с другими причем мобильными источниками электроэнергии (мы не рассматриваем ВЭС небольшой мощности, работающие в автономном режиме). Хорошее сочетание получается при соединении ГЭС, имеющей водохранилище, и ВЭС, соизмеримой мощности. При наличии ветра ГЭС накапливает воду в водохранилище, при отсутствии ветра ГЭС сбрасывает накопленную воду.

Солнечная энергетика, солнечные электростанции (СЭ). Несмотря на гигантские объемы энергии, поступающей от солнца (см. лекцию 1), непосредственное ее использование пока не велико и связано с немалыми трудностями. Одной из причин такого положения дел является малая плотность солнечной энергии, второй причиной является неравномерность распределения энергии во времени, зависимость от состояния атмосферы (облачность), широтная зависимость и, наконец, суточная зависимость.

Существует несколько вариантов использования солнечной энергии.

Первый вариант, сооружение традиционной КЭС, у которой источник пара нагревается солнечными лучами, направляемыми многочисленными зеркалами, отражающими солнечные лучи в направлении источника. Однако,

создание такой установки сопряжено с рядом технических трудностей. Самая главная трудность спрятана в системе управления многочисленными зеркалами, которая должна отслеживать движение солнца и регулировать углы ориентации зеркал. Естественно, что ночью такая электростанция работать не может.

Второй путь связан с использованием полупроводниковой техники в различных вариантах:

- Фотоэнергетические установки на основе кремния с КПД 8 – 24 %,
- Монокристаллические с КПД 15 – 24 %,
- Поликристаллические с КПД 12 – 16 %,
- Аморфные с КПД 8 – 14 %,
- На основе арсенида галлия (соединение мышьяка с галлием) с КПД 30 % и более.

Следует заметить, что пока эти источники не работают на большую энергетику, не исключено, однако, их включение в большую энергетику в будущем.

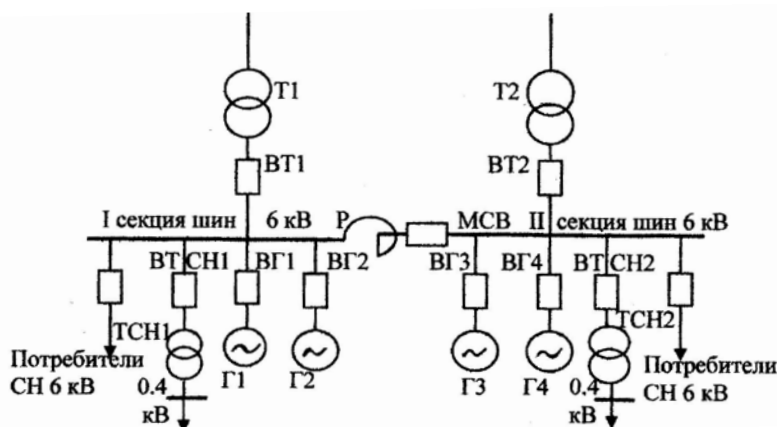
ЛЕКЦИЯ 10. СХЕМЫ ВЫДАЧИ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Конечной целью электростанций является выработка электрической энергии и передача ее через электрические сети потребителям. В каждый момент времени электростанция выдает какую-либо мощность. Величину выдаваемой мощности электростанциям задают в виде суточного графика, который зависит от многих обстоятельств, в том числе, от типа электростанции, рыночных соображений, состояния электрической сети и т.д. В любом случае выдача мощности осуществляется через схему первичных соединений электростанции, которую называют главной схемой.

Существует большое разнообразие главных схем. Систематизируя их можно выделить два главных направления. Первое направление связано с образованием сборных шин генераторного напряжения, к которым подключаются и генераторы и повышающие напряжение трансформаторы, связывающие электростанцию с электрической сетью. Второе направление образует блочный вариант схем. Например такой блок: Паровой котел, паровая турбина, электрический генератор, повышающий трансформатор.

Однако, и блочные схемы допускают большое разнообразие вариантов.

Рассмотрим первый вариант схемы. Пример типовой схемы показан на рис. 10.1. Шины напряжением 6 кВ (шины генераторного напряжения имеют



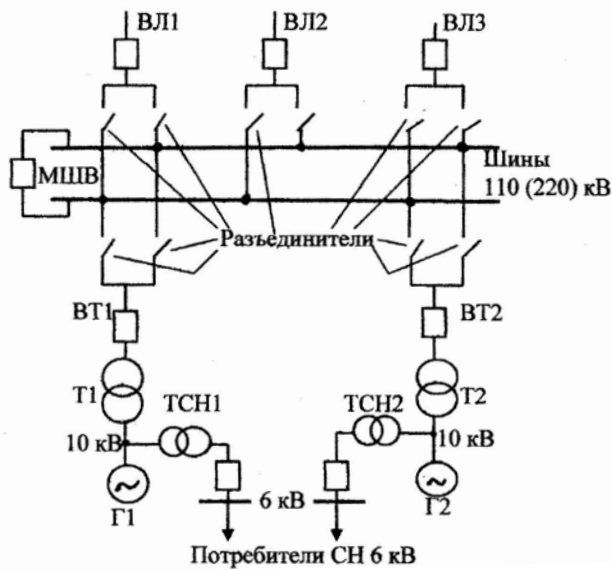
классы напряжений в диапазоне

Рис. 10.1.

3 – 20 кВ) разделены на две секции, соединенные между собой секционным выключателем (МСВ) через токоограничивающий реактор (Р). К каждой секции шин подключено по два генератора и по одному повышающему трансформатору. Секционный выключатель, как правило, в нормальном режиме включен. Этим обеспечивается надежность функционирования такой схемы.

Вариант блочной схемы показан на рис. 10.2. Здесь изображены два блока генератор-трансформатор, которые связаны с двумя системами шин. Системы шин отличаются от секций шин тем, что каждое присоединение может быть подключено к любой системе шин с помощью разъединителей. Однако еще на стадии проектирования предполагается к какой системе шин будет подключен каждый фидер (присоединение). Такой вариант называется фиксированным распределением присоединений. Это важно для выполнения селективной дифференциальной защиты шин. Режим с нарушением фиксации возможен в ремонтных режимах, когда присоединение нормально

подключенное к одной системе шин переводится на другую. Системы шин соединяются междушинным выключателем (МШВ), который, как правило,



нормально включен. От шин может отходить несколько линий электропередачи, в данном случае три.

Собственные нужды электростанции. Собственные нужды электростанций являются основной технологического процесса производства электроэнергии и тепловой энергии на электростанциях. Действительно, отбирая часть выработанной электроэнергии собственные нужды направляют ее на осуществление

подачи топлива в энергетические котлы, на подачу и регулирова-

Рис. 10.2.

ние потока воды на ГЭС. В

результате получается система с положительной обратной связью, которая и обеспечивает незатухающий процесс производства электрической и тепловой энергии. Кроме того, часть энергии собственных нужд расходуется на под-

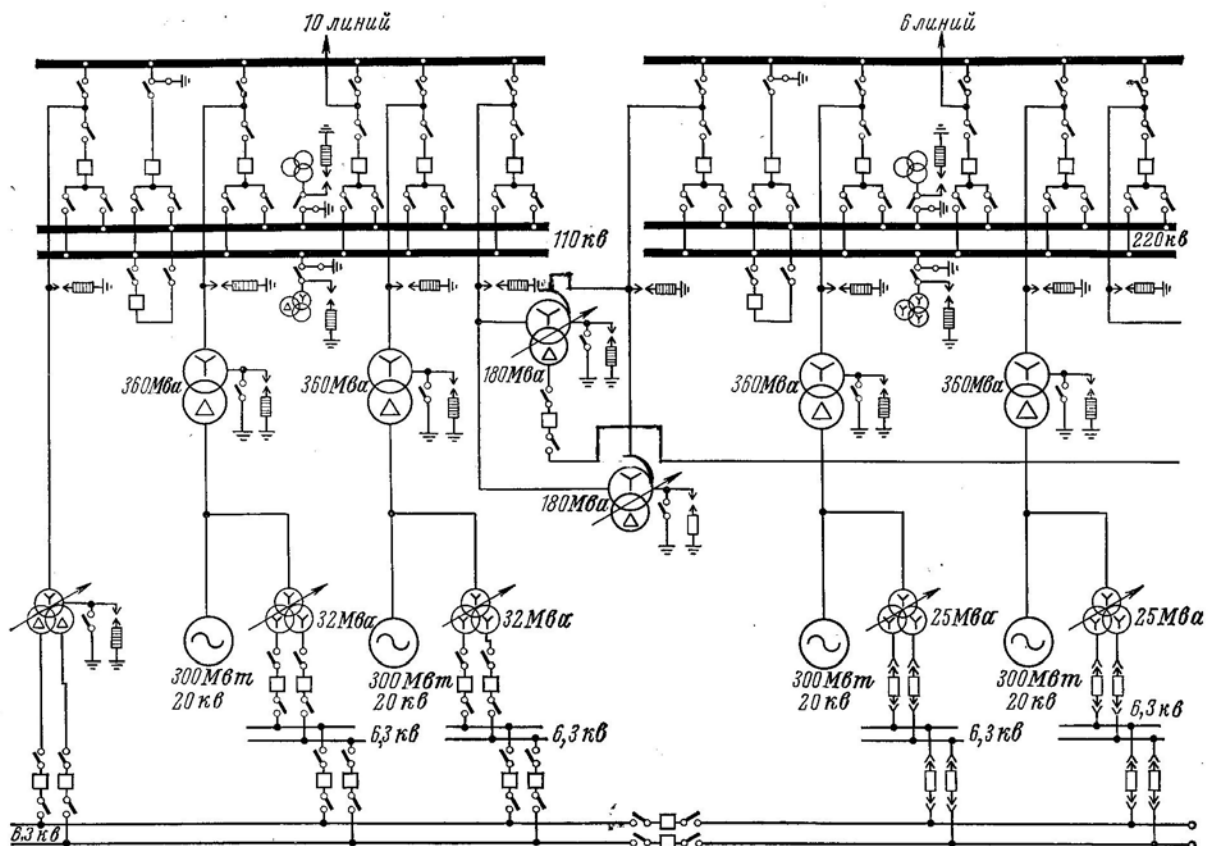


Рис.

10.3.

держание множества других технологий, необходимых для функционирования электростанций.

технологий, необходимых для

В этом смысле значение собственных нужд чрезвычайно велико. Поэтому собственным нуждам электростанций, их надежности уделяется большое внимание еще на стадии проектирования. При эксплуатации персонал обязан обеспечивать надежность собственных нужд, при ликвидации аварийных ситуаций персонал обязан в первую очередь обеспечить (запитать) собственные нужды. Особенно велико значение собственных нужд на АЭС.

Питание собственных нужд, как правило, осуществляется на напряжении 6 кВ и 0.4 кВ. Питание потребителей СН 6 кВ осуществляется непосредственно от шин, если генераторное напряжение 6кВ (рис.10.1), или через промежуточные трансформаторы, если генераторное напряжение отличается от 6 кВ. При блочной схеме питание собственных нужд осуществляется отпайкой от выводов генератора (рис. 10.2). От шин 6 кВ осуществляется трансформирование на напряжение 0.4 кВ для питания потребителей собственных нужд на этом напряжении.

На рис. 10.3 изображена схема реальной электростанции с четырьмя блоками 300 МВт. Электростанция имеет системы шин напряжением 110 и 220 кВ, которые связаны двумя автотрансформаторами (см. лекцию 11). Собственные нужды имеют четыре источника питания через трансформаторы напряжением 20/6 кВ с двумя вторичными обмотками. Кроме того, как и у всех электростанций большой мощности имеются резервные трансформаторы СН, питающиеся от шин более высокого напряжения (в данном случае от шин 110 кВ).

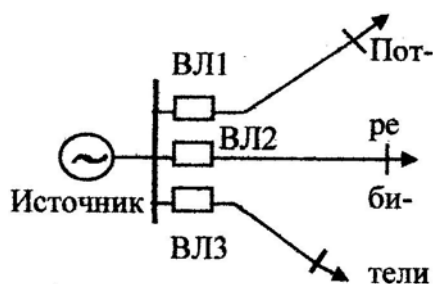
На АЭС кроме обеспечения собственных нужд от собственных источников предусматривается дополнительное питание от независимого источника, в качестве которого используется дизельная электростанция. Может использоваться близлежащая ГЭС с реализацией специальной схемы подачи от нее напряжения на шины собственных нужд.

Следует также заметить, восстановление работоспособности электростанции начинается с восстановления собственных нужд.

ЛЕКЦИЯ 11. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

Электрические сети предназначены для транспорта электрической энергии от электростанций к потребителям. В состав электрических сетей входят следующие элементы. Воздушные линии электропередачи (ВЛ). Кабельные линии электропередачи (КЛ). Повысительные трансформаторы и автотрансформаторы, расположенные на электростанциях, хотя они расположены на территории электростанций по физической сути они относятся к электрическим сетям. Понижительные трансформаторы и автотрансформаторы, расположенные непосредственно у потребителей или на недалеко расположенных подстанциях. Различное оборудование, расположенное на подстанциях. Обобщая, можно сказать, что сами подстанции являются элементами электрических сетей. Существует несколько видов классификации электрических сетей.

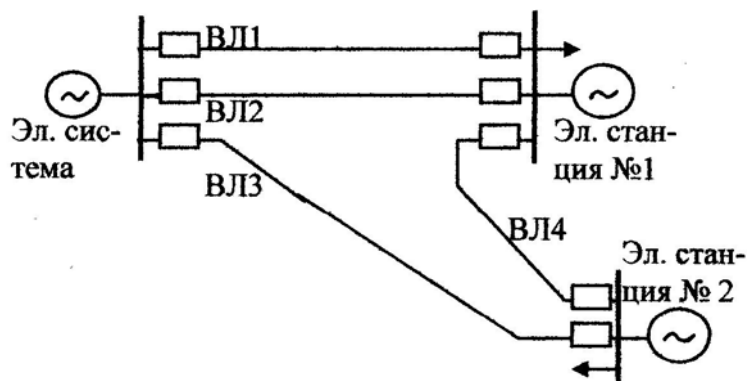
Прежде всего, по ступеням напряжения или, что то же самое, по классам напряжения. Сегодня существуют следующие ступени напряжения (в скобках указаны существующие ступени, но не рекомендуемые при проектировании будущих электрических сетей), все ступени указаны в кВ: 0.4; 0.66; (3); (6); 10; 35; 110; 220; 330; (400); 500; 750; 1150. При этом следует отличать следующие понятия, связанные с напряжениями в электрических



сетях: класс напряжения (ступень), номинальное напряжение, которое задает завод изготовитель, выпускающий электротехническое оборудование, электрические машины и т.п. и фактическое рабочее напряжение. В большинстве случаев эти три напряжения не совпадают.

Следующий вид классификации: радиальные сети (тупиковые) и замкнутые сети. Первые

Рис. 11.1. характеризуются питанием потребителя по одной радиальной линии (рис. 11.1), вторые образуют замкнутые кольца,



удаленным потреби-

Рис. 11.2.

телям, Вторые предназначены непосредственно для питания потребителей. Сеть, напряжением 330 кВ и

выше относится к транзитным сетям, Сеть напряжением 35 кВ и ниже однозначно относится к распределительным сетям. Сеть напряжением 110 и 220 кВ может выполнять обе функции.

Теперь о трансформаторах и автотрансформаторах (АТ). Как уже упоминалось, на электростанциях они повышают напряжение, что бы с помощью высокого напряжения передать электроэнергию к потребителю, который может находиться на достаточно большом расстоянии. Можно ли передать электроэнергию при больших ее объемах, другими словами можно ли передать требуемую величину мощности на требуемое расстояние без использования трансформаторов, при генераторном напряжении. Рассмотрим пример. Пусть требуется передать мощность блока 1000 МВт на расстояние 100 км. при генераторном напряжении 20 кВ. Выполним вычисления. Исходные данные:

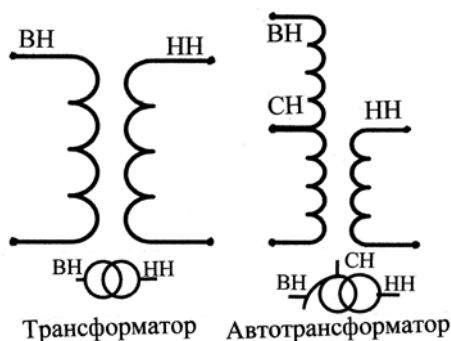
$$P = 1000 \text{ МВт}, \cos \varphi = 0.8, U = 20 \text{ кВ}, L = 100 \text{ км.}$$

здесь $\cos \varphi$ – коэффициент мощности показывающий соотношение между активной мощностью и полной мощностью, выдаваемой блоком. Другими словами эта величина говорит о том, что наряду с активной мощностью блок выдает реактивную мощность. На основе этих данных вычисляем ток, допустимое сечение провода и его диаметр, приняв за материал провода алюминий с допустимой плотностью тока 2.5 А/мм².

$$I = \frac{1000 \cdot 1000}{0.8 \cdot \sqrt{3} \cdot 20} = 28900 \text{ А}, S = \frac{28900}{2.5} = 11560 \text{ мм}^2, d = 2 \cdot \sqrt{\frac{11560}{3.14}} = 122.6 \text{ мм.}$$

Нетрудно придти к выводу, что построить линию электропередачи с тремя проводами диаметром 122.6 мм практически невозможно. Попробуем определить падение напряжения на 1 км длины ВЛ. Индуктивное сопротивление такой ВЛ будет примерно 0.35 Ом/км (активным сопротивлением при таком сечении можно пренебречь). Падение напряжения будет:

$\Delta U = \sqrt{3} \cdot 0.35 \cdot 36127 = 21874 \text{ кВ.}$ На расстоянии 1 км практически будет нулевое напряжение, Следовательно, передать требуемую мощность на расстояние 100 км при генераторном напряжении невозможно. Для решения поставленной задачи приходится использовать повысительные трансформаторы и АТ.



Встречаются

Рис. 11.3.

трансформаторы с тремя обмотками (трехобмоточные трансформаторы, имеющие обмотки высшего, среднего и низшего напряжения). АТ отличаются от трансформаторов тем, что у них обмотка среднего напряжения образуется как отпайка от обмотки высшего

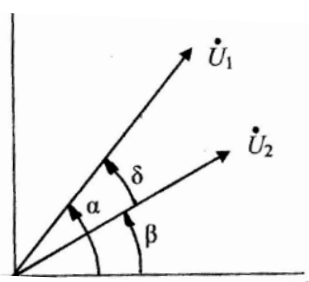
напряжения (рис. 11.3). Они в обязательном порядке имеют обмотку низшего напряжения.

На приемном конце стоят аналогичные трансформаторы и АТ, но выполняющие функцию понижения напряжения до уровня, удовлетворяющего потребителя электроэнергии. При необходимости осуществляется двойная трансформация и даже тройная.

Существует еще одно ограничение передачи мощности по ВЛ, которое также для передачи мощности требует повышенного напряжения. Это ограничение выражается формулой:

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{X} \cdot \sin \delta, \quad (11.1)$$

в этой формуле P – передаваемая по ВЛ активная мощность, U_1 и U_2 –



напряжения в начале и конце ВЛ, X – индуктивное сопротивление ВЛ, $\sin \delta$ – угол между напряжениями ВЛ (рис. 11.4). Анализ этой формулы позволяет сделать следующие выводы. Прежде всего следует вывод, что чем выше напряжение тем больше возможная величина передаваемой мощности. Далее, чем больше сопротивление линии, тем меньше

величина передаваемой

Рис. 11.4.

мощности. Наконец, величина передаваемой мощности зависит от угла между напряжениями, при угле 90 градусов достигается максимально возможная величина передаваемой мощности. При попытке превысить эту величину наступает нарушение устойчивости работы электрической системы со всеми вытекающими последствиями.

Кабельные линии электропередачи (КЛ) используются на напряжении от 0.4 кВ до 500 кВ. Кабели напряжением ниже 1000 В изготавливают трехжильными и четырехжильными. Кабели напряжением выше 1000 В изготавливают трехжильными. Кабели напряжением 220 кВ и выше представляют собой сложные инженерные сооружения, используются в основном как вставки к ВЛ при переходах через водяные препятствия. Поэтому их длина весьма ограничена.

В последнее время промышленность стала выпускать самонесущие изолированные провода (СИП) на напряжение до 35 кВ. Их особенность в том, что каждая жила этих проводов имеет изоляцию, рассчитанную на полное напряжение. Использование этих проводов упрощает строительство линий, делает их дешевле и надежнее.

Наряду с электрическими сетями переменного тока начинают развиваться электрические сети постоянного тока. Появились ВЛ напряжением 2X400 кВ и 2X750 кВ, у которых напряжение между проводами 800 и 1500 кВ соответственно, относительно земли 400 750 кВ.

Сегодня для ВЛ используются алюминиевые провода и сталеалюминиевые провода со стальным тросом внутри провода. Для изготовления токопроводящих жил кабелей используется как алюминий, так и медь.

ЛЕКЦИЯ 12. ПОТРЕБИТЕЛИ ЭНЕРГИИ

Потребители электрической энергии. По другому они называются электроприемниками. Существует множество видов потребителей (электроприемников) электроэнергии. Например, бытовые потребители, промышленные потребители, сельско-хозяйственные, торговые, культурно-массовые и т.п. Для потребителей электроэнергии (электроприемников) существуют критерии не зависящие от типа потребителя, это критерий надежности электроснабжения. Правила устройств электроустановок (ПУЭ) делят все электроприемники на три категории.

К электроприемникам первой категории относятся электроприемники, перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой опасность жизни людей, угрозу для безопасности государства, значительный материальный ущерб, расстройство сложного технологического процесса, нарушение функционирования особо важных элементов коммунального хозяйства, объектов связи и телевидения.

Из состава электроприемников первой категории выделяется особая группа электроприемников, бесперебойная работа которых необходима для безаварийного останова производства с целью предотвращения угрозы жизни людей, взрывов и пожаров.

электроприемники первой категории в нормальных режимах должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых взаимно резервируемых источников питания, и перерыв их электроснабжения при нарушении электроснабжения от одного из источников питания может быть допущен только лишь на время автоматического восстановления питания. Для особой группы возможно использование третьего источника питания.

К электроприемникам второй категории относятся электроприемники, перерыв электроснабжения которых приводит к массовому недоотпуску продукции, массовым простоям рабочих, механизмов и промышленного транспорта, нарушению нормальной деятельности значительного количества городских и сельских жителей.

Питание электроприемников второй категории в нормальных режимах должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых взаимно резервирующих источников питания. Перерывы электроснабжения допустимы на время, необходимое для включения резервного питания действиями дежурного персонала или выездной оперативной бригады.

К электроприемникам третьей категории относятся электроприемники не подпадающие под определения первой или второй категории. Для них допускается перерыв электроснабжения, необходимый для ремонта или замены поврежденного элемента системы электроснабжения, не превышающий 1 суток. Питание таких электроприемников допускается от одного источника питания, при выполнении вышеупомянутых условий.

Условия и требования ПУЭ носят достаточно общий характер. Для каждого конкретного потребителя электроэнергии его категоричность определяется проектом. Крупные потребители могут в своем составе иметь электроприемники разных категорий. В этом случае проект определяет категорию предприятия в целом и указывает состав электроприемников с разбивкой по категориям. Кроме того, для электроприемников первой и второй категории правильнее было бы сказать, что их питание должно осуществляться не менее чем от двух независимых источников, что на практике и реализуется.

С других позиций потребители электроэнергии делятся по признакам, определяющим способ потребления электроэнергии. Можно выделить статических потребителей, к статическим можно отнести осветительную нагрузку, электролизное производство алюминия, меди и т.п. С каким то допущением к статической нагрузке можно отнести двигательную нагрузку, связанную с сетью трехфазного переменного тока через выпрямители или частотные преобразователи. Двигательная нагрузка (синхронная и асинхронная), непосредственно питающаяся от сети переменного тока представляет особую категорию нагрузки. Она характеризуется существенной зависимостью потребляемой мощностью от частоты, от напряжения, ей свойственны электромагнитные и электромеханические переходные процессы.

Общую нагрузку разделяют еще по другому признаку, а именно, выделяют симметричную нагрузку и несимметричную нагрузку. Первая, как правило, это двигательная нагрузка, нагрузка электролизных производств составляет около 90 % от всей нагрузки. Вторая – это бытовая нагрузка, но она имеет относительно небольшую несимметрию, и электрифицированная железная дорога на переменном токе. Несмотря на принимаемые меры по ее симметрированию в отдельных местах ее несимметрия довольно заметная.

Потребители тепловой энергии. Прежде всего, эти потребители делятся на промышленные и коммунально-бытовые. Промышленные потребители потребляют тепловую энергию в виде пара с возвратом конденсата, в результате чего эта система энергоснабжения работает по почти замкнутому циклу (с пополнением части потерянной воды). Потребители также потребляют тепловую энергию для отопления и вентиляции промышленных зданий и сооружений. Это потребление осуществляется в виде пара или горячей воды. Коммунально-бытовые потребители потребляют тепловую энергию в виде горячей воды. Эта энергия идет на отопление зданий и обеспечение горячей водой по закрытой или открытой системе.

Промышленная нагрузка мало зависит от сезона, однако она может зависеть от времени суток и дней недели, все связано с режимом работы промышленного предприятия. Коммунально-бытовая нагрузка относится к категории сезонной нагрузки. Зимой она максимальная, летом она состоит только из горячего водоснабжения, потребление горячей воды зависит от времени суток (утренние и вечерние максимумы потребления) и дней недели.

Согласно существующим нормам и правилам отопительный сезон (т.е. подача горячей воды на отопление) начинается в том случае, если среднесуточная температура держится ниже +8 градусов С. в течение 5 суток. Конец отопительного сезона связан с повышением среднесуточной температуры выше +8 градусов С. в течение 5 суток. Однако окончательное решение принимается местной властью соответствующим постановлением.

Тепловая нагрузка в отличие от электрической, не имеет категории надежности. Однако, к поставщикам тепловой энергии предъявляется требование в период отопительного сезона обеспечить бесперебойное теплоснабжение.

ЛЕКЦИЯ 13. ПОТЕРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ, ЭКОНОМИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ

Процесс преобразования энергии первичных энергоносителей в электрическую и тепловую энергию, поступающую потребителям, связан с потерями на всех этапах преобразования. Попробуем систематизировать эти потери.

Тепловые потери.

Потери в паровых котлах. Общий КПД 85 – 95 %.

- потери с уходящими газами,
- потери из-за не плотности котла,
- потери из-за теплопроводности стенок котла,
- потери при пуске котла.

Условные потери, носящие скорее экономический характер, это потери на обеспечение собственных нужд котла, на обеспечение электродвигателей дымососов, вентиляторов, питательных насосов и других.

Потери в паропроводах из-за не идеальности изоляции. КПД паропроводов 99 – 99.5 %.

Потери в турбинах. Механический КПД 95 – 98 %.

- при пусках турбин, затраты на прогрев,
- термодинамические потери (оценка дана ранее),
- механические потери,
- потери на охлаждение, смазку, регулирование и т.п.

Условные потери, потери на обеспечение циркуляционных, конденсатных и других насосов,

Потери при переработке и доставке топлива, затраты электроэнергии на обеспечение котлов топливом.

Гидроэнергетические потери.

Потери в водохранилищах.

- возгонка снега под действием прямых лучей солнца,
- испарение воды из водохранилищ,
- потеря напора при движении воды по деривационным сооружениям,
- потери воды в напорных трубопроводах.

Гидромеханические потери.

- потери воды при обеспечении водой собственных нужд,
- потери с водой, уходящей в нижний бьеф,
- механические потери турбин, КПД 95 – 97 %,

Условные потери, затраты электроэнергии электродвигателями, обеспечивающими функционирование маслonaпорных установок, затворов и другого оборудования.

Электрические потери.

- потери в электрических генераторах, связанные с питания систем возбуждения,
- механические потери генераторов, в том числе на охлаждение,

- потери на получение водорода для генераторов с водородным охлаждением, на получение и циркуляцию дисциллированной воды у генераторов с непосредственным охлаждением обмоток водой,

- потери в обмотках генератора, статора и ротора.

Потери в трансформаторах и АТ.

- потери холостого хода, практически не зависящие от нагрузки,

- потери в обмотках, целиком зависящие от нагрузки,

- потери на охлаждение трансформаторов и АТ.

Потери в воздушных и кабельных линиях электропередачи, КПД 92 – 96 %.

- потери на изоляцию, на корону, образуют потери холостого хода, не зависящие от нагрузки, в основном зависящие от уровней напряжения.,

- нагрузочные потери, в прямую зависящие от нагрузки ВЛ или КЛ.

Потери у потребителей электрической нагрузки. Это также потери в принадлежащим им трансформаторам, ВЛ и КЛ. К ним также следует отнести потери в электродвигателях.

Эффективное использование энергии, энергосбережение.

Эффективное использование энергии прежде всего связано с новыми, передовыми технологическими процессами, используемыми при производстве продукции. В значительной степени эффективность связана с автоматизацией технологических процессов. Автоматика позволяет минимизировать холостые ходы оборудования, не допускать отклонений от оптимального процесса производства.

Реализация энергосбережения возможна различными путями. То что касается затрат тепловой энергии для технологических процессов, то это связано с совершенством самого технологического процесса. То, что касается затрат на отопление, вентиляцию, то здесь возможны, к примеру, следующие пути, позволяющие сэкономить тепловую энергию:

- утепление существующих зданий и сооружений, проектирование и строительство зданий и сооружений только с повышенной теплоизоляцией,

- использование замкнутой системы вентиляции на производстве,

- автоматизация регулирования подачи тепла в тепловых узлах зданий, внедрение ручного регулирования в каждой квартире и комнате,

- внедрение индивидуального учета потребленного тепла.

При этом должен реализовываться принцип сохранения требуемой комфортности в помещениях зданий.

На тепловых электростанциях возможно использование передовых технологий сжигания топлива, новых более эффективных термодинамических циклов, например, ПГУ.

Электрическую энергию также можно экономно расходовать, используя следующие принципы:

- производить замену не загруженных электродвигателей на электродвигатели, работающие с нагрузкой 90 – 95 %. То же самое относится к трансформаторам, которые так же должны работать с нагрузкой около 90 %.

- использование энергосберегающих ламп для освещения как промышленных зданий, как и квартир.

- на электростанциях и преобразовательных подстанциях энергосбережение возможно путем снижения затрат на собственные нужды, с сохранением надежности технологического процесса производства и распределения электроэнергии.

Воздушные и кабельные линии электропередачи имеют резервы экономии электроэнергии. Прежде всего, это рациональный электрический режим электрических сетей. Он предусматривает оптимальное распределение нагрузок между электростанциями, оптимальную загрузку линий, регулирование напряжения в электрических сетях и оптимизацию распределения реактивной мощности.

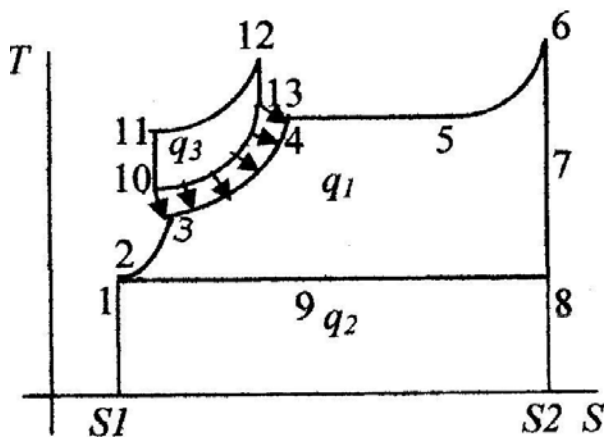
Следует сказать, что некоторые из перечисленных мероприятий идут в противоречие друг с другом. Например, оптимизация распределения нагрузок между электростанциями можем противоречить оптимизации загрузки электрических сетей, особенно со вводом рыночных отношений. При этом возможен глобальный поиск минимума затрат или оптимизация по другим критериям.

ЛЕКЦИЯ 14. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

В лекции 1 упоминалось, что потребление энергии человечеством продолжает расти, прогнозируется рост потребления на обозримое будущее. Следовательно, необходимо энергетикам обеспечить на этот период требуемые объемы энергии. Отсюда вывод, необходимо уже сегодня обдумывать перспективные пути развития энергетики.

Существует два принципиальных пути развития. Первый путь связан с совершенствованием традиционных, уже используемых технологий получения электрической и тепловой энергии. Второй путь базируется на новых технологиях. В некоторой части эти пути пересекаются.

Парогазовые установки. В последнее время начинает получать распространение парогазовый цикл, который при его реализации позволяет получать повышенный КПД энергетических установок (ПГУ) по сравнению с использованием традиционного цикла Ренкина. Суть его заключается в следующем. На первом этапе топливо (газ, мазут) сжигается в газовой турбине с температурой на входе турбины 1000 – 1100 градусов Ц. Газовая турбина вращает электрический генератор, который выдает электроэнергию в сеть. На выходе турбины газы имеют температуру порядка 400 – 600 градусов Ц. Эти газы сбрасываются в паровой котел – утилизатор, который является источником пара для паровой турбины.



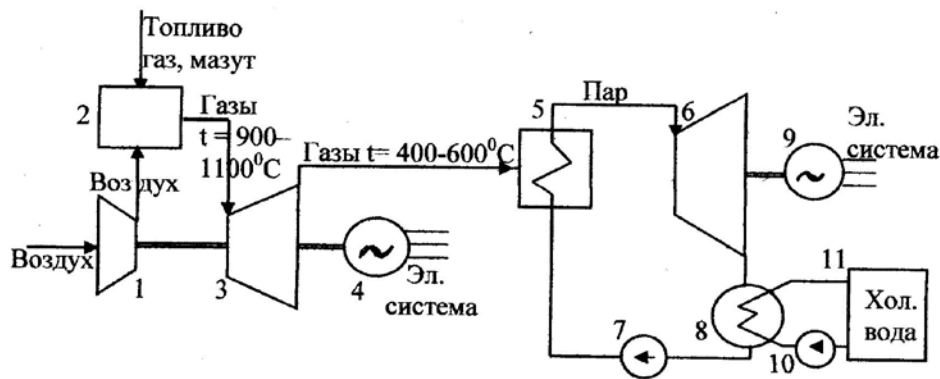
процесс 11 – 12 имеет место в ка-

Рис. 14.1.

мере сгорания 2, где топливо перемешивается в воздухе и сгорает. Процесс 12 – 13 адиабатический, он связан с отдачей энергии (работой) газовой турбине (3) с последующей передачей электрическому генератору (4). Процесс 13 – 10 изобарный, он связан с отдачей энергии уходящими газами котлу-утилизатору 5 (процесс отдачи показан стрелками). Поступившие в котел - утилизатор газы отдают энергию воде, которая подается питательным насосом 7. Пар из котла-утилизатора поступает в турбину (6). Отработанный пар конденсируется в конденсаторе 8 и питательным насосом (7) подается снова в котел - утилизатор 5. Энергия турбины передается электрическому генератору 9.

На рис. 14.1 изображен парогазовый цикл в $T - S$ координатах. Рис. 14.2 демонстрирует принципиальную схему ПГУ. Диаграмма состоит из традиционной части (1-2-3-4-5-6-7-8-9) и надстройки, описывающей цикл в газовой турбине. Компрессор 1 реализует изохорный процесс 10 – 11, повышая давление воздуха перед подачей его в газовую турбину. Изобарный

Конденсация отработанного пара осуществляется в конденсаторе 8 путем подачи в него охлаждающей воды циркуляционным насосом 10 от источника охлаждающей воды 11.



Из диаграммы рис. 14.1 видно, что появляется дополнительное количество

теплоты q_3 , которое

Рис. 14.2.

вливается в

общий процесс преобразования энергии. При этом это количество теплоты равно разности количества энергии сгораемого топлива ($Q_{1Г}$) и энергии, отдаваемой котлу – утилизатору ($Q_{2Г}$), что выражается формулой:

$$q_3 = Q_{1Г} - Q_{2Г}. \quad (14.1)$$

Если учесть, что поступившая в котел – утилизатор энергия совершила полезную работу (q_1) и ушла с охлаждающей водой (q_2), то нетрудно составить баланс энергии и определить термодинамический КПД ПГУ:

$$q_3 = Q_{1Г} - Q_{2Г}, \quad q_2 = Q_{2Г} - q_2, \quad Q_{ПГУ} = q_3 + q_2 = Q_{1Г} - Q_{2Г} + Q_{2Г} - q_2 = Q_{1Г} - q_2. \quad (14.2)$$

$$\eta_{ПГУ} = \frac{Q_{ПГУ}}{Q_{1Г}} = \frac{Q_{1Г} - q_2}{Q_{1Г}} \approx \frac{T_{1Г} - T_2}{T_{1Г}},$$

что следует из соотношений, полученных в лекции 3. Поскольку температура газов входящих в газовую турбину ($T_{1Г} = 900 - 1100^\circ\text{C}$) выше температуры пара, входящего в турбину ($500 - 600^\circ\text{C}$), то следует ожидать увеличение термодинамического КПД ПГУ. Рассмотрим пример. Пусть $T_{1Г} = 273 + 1100^\circ\text{C}$, $T_2 = 273 + 20^\circ\text{C}$, тогда КПД ПГУ составит:

$$\eta_{ПГУ} = \frac{1100 + 273 - 20 - 273}{1100 + 273} \cdot 100\% = 78.65\%.$$

Конечно реальный КПД ниже полученного, поскольку в расчете не учтены некоторые потери, не учтены КПД различных установок, однако он принципиально выше, чем у тепловых установках без предвключенных газовых турбин.

Следует ожидать, что в ближайшее время ПГУ получат достаточно широкое распространение.

Сверхпроводимость и перспективы ее использования.

Нидерландский физик Камерлинг-Онесс в 1908 году научился получать температуры близкие к абсолютному нулю. В этом же году ему удалось получить жидкий гелий при $T = 4.2^\circ\text{K}$. В 1911 году охлаждая металлы до низких температур он обнаружил, что некоторые из них полностью теряют сопротивление и становятся сверхпроводящими. Ниже приведены примеры

температур, при которых некоторые металлы становятся сверхпроводниками:

Металл	Алюминий	Свинец	Ртуть	Олово	Цинк
Температура в $^{\circ}\text{K}$	1.2	7.2	4.0-4.2	3.7	0.9

В списке нет таких хороших проводников как серебро, медь, золото, платина, которые не становятся сверхпроводниками по крайней мере до $T = 0.05^{\circ}\text{K}$. Физическое понимание сверхпроводимости было достигнуто только в последние десятилетия. Она обусловлена сверхтекучестью электронов в металлах, которые при низких температурах образуют связанные электронные пары со спинами, направленными в разные стороны (спин – квантовая характеристика электрона, связанная с его магнитным моментом). При взаимодействии таких пар электронов с кристаллической решеткой металла происходит ее возбуждение с полным возвратом полученной на возбуждение энергии.

Использование сверхпроводимости базируется на использовании не чистых металлов, а их сплавов. При этом сверхпроводники делят на :

Сверхпроводники I рода, это в основном однородные по структуре, химическому и физическому составу материалы. У них происходит полное вытеснение магнитного поля, как говорят они ведут себя как магнитный монолит. Однако для них существует понятие предельного, критического магнитного поля, при котором теряется свойство сверхпроводимости. Следовательно, для них существует понятие предельного тока, поскольку ток и магнитный поток неразрывно связаны.

Сверхпроводники II рода, они, как правило, образуются из сплавов, неоднородны по сечению, образуют в сечении нормальные и сверхпроводящие зоны. У них большая критическая величина магнитного поля ($0.5 - 2 \text{ кА/м}$). Сегодня лучшие сверхпроводники имеют критическую температуру $23 - 24^{\circ}\text{K}$ (сплав ниобия и германия), однако они пока не достигают температуры кипения жидкого азота (77.4°K), что усложняет их использование, поскольку требует двухступенчатой системы охлаждения – жидкий азот, жидкий гелий. Вместе с тем появляются сведения о создании сверхпроводников, попадающих в зону действия жидкого азота. Так появилось сведение, что в России создан сверхпроводящий (экспериментальный) кабель с $T_{кр} = 64 - 75^{\circ}\text{K}$ длиной 200 м напряжением 20 кВ, рассчитанный на ток 2000 А.

На основе сверхпроводников II рода уже создаются реальные провода, которые имеют сами по себе сложную конструкцию. Из проводов создают экспериментальные кабели, шинопроводы, электрические генераторы и другую аппаратуру. Рождается новое научное направление - сверхпроводниковая электротехника.

Одно из самых интересных и перспективных направлений это создание сверхпроводящих индуктивных накопителей (СПИНов). Такой накопитель представляет тороидальную катушку индуктивности, у которой все магнитное поле находится внутри катушки. Катушка сделана из

сверхпроводящих проводов, погруженных в жидкий гелий (две ступени охлаждения). При избытке мощности и электроэнергии в электрической системе она через преобразователи переменного трехфазного тока в постоянный загоняется в СПИН, где сохраняется произвольно долго, поскольку в катушке нет потерь.

При возникновении дефицита мощности и электроэнергии в электрической системе энергия, запасенная в СПИНе через преобразователи постоянного тока в трехфазный переменный ток выдается обратно в сеть. Несмотря на двухступенчатую систему охлаждения и соответствующие энергетические затраты, расчеты показали, что КПД такого СПИНа может достигать 97 – 98 %. В мире уже имеется ряд примеров использования таких устройств, в том числе в серийном варианте для сохранения устойчивой работы сверхмощных линий электропередачи, подверженных большим колебаниям передаваемой мощности.

Атомные станции теплоснабжения (АТС). Существует типовой проект такой станции теплоснабжения с реактором АТС-500, т.е. тепловой мощностью 500 МВт. По замыслу разработчиков такой реактор должен иметь повышенную надежность за счет снижения параметров теплоносителя. Действительно для теплоснабжения требуется температура воды до 150⁰С, что и позволяет обеспечить работу металла, оборудования при этих температурах с повышенной надежностью. Существуют проекты использования таких АТС около Архангельска, Нижнего Новгорода и других городов. Основное преимущество заключается в отсутствии вредных выбросов, связанных с сжиганием органического топлива. К недостаткам следует отнести все те проблемы, которые связаны и с АЭС, это хранение и переработка отработанного ядерного топлива.

Водородная энергетика. Сжигание водорода – процесс экологически чистый, в результате получается обыкновенная вода. Вопрос заключается в том, где этот водород брать? Есть перспективные проекты получения водорода в результате переработки отходов. Весьма перспективным может оказаться создание топливных (в том числе и водородных) элементов (ТЭ) для большой энергетики с КПД превышающим КПД ПГУ. Однако, пока работы не вышли за пределы экспериментов. Достигнутые результаты приведены в таблице:

Вид ТЭ	Срок службы, час.	КПД в %	Стоимость в Евро/кВт
С полимерными мембранами	<u>5000</u>	<u>27 – 31</u>	<u>2500</u>
	40000	35	1250
Фосфорно-кислые	<u>5000</u>	<u>40</u>	499?
	40000		
С расплавами карбонатов	<u>5000</u>	<u>47</u>	<u>6670</u>
	40000	50	1250
Твердо-оксидные	<u>12000</u>	<u>25 – 30</u>	<u>11000</u>
	40000	50	1250

В числителе данные за 2007 год, в знаменателе - на ближайшую перспективу.

Строительство АЭС с реакторами на быстрых нейтронах (РБН).

Существующее состояние дел описано в лекции 7. Существует мнение, что именно ректоры этого типа лягут в основу развития атомной энергетики. Приводятся следующие исторические и перспективные соображения. Первый РБН был пущен в США в 1951 году, В России первый РБН был пущен в 1972 году (БН-350). В 1980 году на Белоярской АЭС был пущен БН-600. На той же АЭС в 2012 году предполагается пустить реактор БН-800. Разрабатывается реактор БН-1800. Проектное технико-экономическое сравнение следующее:

Электростанция	АЭС, БН-1800	КЭС, уголь	ПГУ, газ
Удельные кап. вложения долл/кВт	1500 - 1800	1100 - 1300	700 - 900
Ежегодные затраты Долл/кВт	60 - 72	44 - 52	28 - 36
Срок службы, лет	50 - 60	30	30
Стоимость эл. энергии цент/кВтчас	5.1 – 5.8	5.0 – 6.1	5.8 – 7.5

Приведенные цифры говорят о конкурентноспособности АЭС с другими источниками электроэнергии. Всего в России предполагается следующий ввод электрических мощностей:

Новые мощности	2011 – 2015	2016 - 2020
Всего, млн. кВт	83.3/1118	68.4/90.2
ГЭС	7.7/8.3	14.3/18.5
АЭС	11.1/11.1	19.9/24.9
ТЭС, всего	65.4/92.4	35/46.8
Из них на газе	33.6/36	16.4/17.1
Из них на угле	30.9/56.4	17.9/30.4

В числителе – базовый вариант, в знаменателе – максимальный.

Энергия термоядерного синтеза. При слиянии легких ядер (водород и его изотопы, гелий, литий и некоторые другие) масса ядра после слияния получается меньше суммы масс отдельных ядер до слияния. В результате также получается дефект массы и, как следствие выделение энергии. Можно оценить величину выделяемой энергии. Пусть происходит слияние ядра дейтерия (изотоп водорода, у которого в ядре кроме протона имеется еще и один нейтрон) и ядра водорода. Они имеют массы:

Дейтерий ${}^2_1\text{D}$ 2.014102 аем, Водород ${}^1_1\text{H}$ 1.007825 аем.

После слияния этих двух атомов получается Гелий: ${}^2_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He}$ имеющий массу 3.016029 аем. Имеет место дефект массы: $\Delta M = (2.014102 + 1.007825) - 3.016029 = 3.021927 - 3.016029 = 0.005898$ аем.

Далее расчет произведем для 1 кг дейтерия и водорода (сумма их масс равна 1 кг: $mD + mH = 1$). Теперь нетрудно составить пропорцию и решить ее:

$$mD + mH - 1 \quad x = \frac{mHe}{mD + mH},$$

m_{He} - x

$$\text{и определить дефект массы: } \Delta M = 1 - \frac{m_{He}}{m_D + m_H}. \quad (14.1)$$

Получаем дефект массы при слиянии 1 кг дейтерия и водорода:

$$\Delta M_1 = 1 - \frac{3.016029}{3.021927} = 1 - 0.998048265 = 0.001951734 \text{ кг.}$$

Объем выделяемой энергии:

$$W = \Delta M \cdot c^2 = 0.001951734 \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 0.01756 \cdot 10^{16} \text{ Дж} = 175.6 \cdot 10^6 \text{ МДж.}$$

В лекции 2 было определено, что энергетический блок мощностью 1000 МВт за год выдает $3154 \cdot 10^6$ МДж электрической энергии. Отсюда следует, что 1 кг дейтерия и водорода хватит блоку на 0.557 года работы с полной мощностью. Этот расчет не точный, не учтены первичные затраты энергии, необходимые для сближения ядер для осуществления их слияния. и прочие потери. Но даже если предположить, что результирующий КПД будет порядка 50 %, то все равно выход энергии получается значительным.

Существуют два направления реализации проекта получения полезной энергии на основе реакции синтеза.

Первое направление связано с использованием тороидальной камеры, в которой магнитное поле сжимает ядра сливающихся элементов, нагретых до нескольких миллионов градусов. В целом устройство называется ТОКАМАК (расшифровывается как тороидальная камера с магнитными катушками). По этому пути идут европейские страны и Россия.

Второе направление использует лазеры для нагрева и сжатия ядер. Так проект NIF – 192, реализуемый в Ливерпульской национальной лаборатории в Калифорнии использует 192 лазера, которые расположены по окружности и своим одновременным излучением сжимает дейтерий и тритий (тритий - тяжелый водород, имеющий в ядре 2 нейтрона).

Результаты обнадеживающие, но не позволяющие сделать выводы о конкретных сроках получения ядерной энергии синтеза в практических целях.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ИСТОРИИ ЭНЕРГЕТИКИ

Гидро- и теплоэнергетика.

Есть сведения, что древние финикийцы около 4000 назад начали использовать парус, т.е. энергию ветра, древние греки использовали энергию пара для движения дверей храмов и других «чудес».

Греческий ученый Архимед (ок. 287 – 212 гг. до н.э.) сформулировал основные законы гидростатики, в частности знаменитый закон Архимеда. Кроме того, он ввел понятие «удельный вес».

Герон Александрийский (ок. 1 века н.э.) сформулировал правила сложения скоростей, дал описание многих простых машин. Сконструировал шар, который вращался под действием пара, выходящего из двух изогнутых трубок, прообраз паровых турбин.

Достоверно известно, что первое водяное колесо было запущено в г. Мозеле в 340 г. и быстро распространилось по всей Европе.

Первые ветряные мельницы появились на востоке, по некоторым сведениям в 644 году, в Европе в 1105 году.

Интересно, что первое упоминание (около 1150 года) о вечном двигателе нашли в санкристской рукописи «Синдханта сиромани», автор, индийский математик Бхаскар предлагает колесо с полостями, заполненными ртутью, которому необходимо дать первый толчек, далее оно будет вращаться вечно. Далее пошел поток предложений вечного двигателя.

В 1551 году Джираломо Кардано показал невозможность создания вечного двигателя, а в 1775 году Парижская академия наук приняла решение не рассматривать проекты вечного двигателя.

В 1601 году итальянский физик Джамбатиста дела Порта установил во сколько частей пара может превратиться одна часть воды.

В 1698 году Томас Севери (Англия) получил патент на изобретение паровой машины, в которой была использована конденсация пара. Однако в то же время появились претенденты на изобретение паровой машины: Вустер (Эдуард Сомерсет второй маркиз Вустерский), представитель Ирландии, Франции и Англии, Соломон де Ко (Франция) и Самюэль Морленд (Франция), который, кроме того, он пришел к выводу о необходимости получения количественных соотношений в использовании тепловой энергии.

Аббат Жан Татфейль в 1678 году стал под поршень класть немного пороха и поджигать его, в результате получил прообраз двигателя внутреннего сгорания.

Швейцарский ученый Д. Бернулли в 1738 году вывел и опубликовал уравнение движения идеальной жидкости (текущей без трения и не имеющей вязкости), которое в дальнейшем было уточнено и для не идеальной жидкости.

Русский изобретатель и механик Иван Ползунов в 1765 году создал свой вариант паровой машины, которая работала в Алтае до 1780 года.

Джеймс Уатт в 1769 году создал паровую машину, которая имела центробежный регулятор, систему автоматической подачи пара в цилиндры, для чего использовался параллелограмм, который в последствии стали называть параллелограммом Уатта.

Сади Карно (1796 – 1832) в 1824 году сформулировал положения 2го начала термодинамики, ввел понятие кругового процесса, пришел к выводу, что для действия тепловой машины нужен холодильник.

Роберт Майер в 1841 году пришел к выводу об эквиваленте тепла и механической энергии.

В 1847 году Герман Гельмгольц дал строгую математическую трактовку закона сохранения энергии и показал его всеобщность. Следует сказать, что к идеям сохранения энергии ранее подошли: датский ученый Л. Кольдинг, М. Фарадей, практически одновременно он был сформулирован Р. Майером и Д. Джоулем.

Немецкий физик Р. Клаузиус около 1865 года ввел понятие энтропии. К аналогичным выводам пришел английский физик У. Томсон (лорд Кельвин), который ввел понятие абсолютного нуля.

Американский физик У. Гиббс (1839 – 1903) теоретически обосновал термодинамику, ввел понятие термодинамических функций, т.е. функций, описывающих состояние термодинамической системы

Л. Больцман (1844 – 1906) австрийский физик создал теорию излучения и лучевого обмена энергией..

В 1884 – 1885 годах Ч. Парсонс построил первую паровую реактивную турбину, а К. Лаваль в 1889 году построил первую паровую турбину активного типа.

Первую практически пригодную гидравлическую турбину в 1827 году создал французский инженер Б. Фурнейрон. В 1849 году американский гидротехник Д. Френсис создал радиально-осевую гидравлическую турбину, а в 1912 году В. Каплан разработал поворотную-лопастную турбину. В дальнейшем Пелтоном была создана ковшовая турбина, работающая при больших напорах.

Век XX это век широкого применения основных теоретических положений теплоэнергетики и гидроэнергетики на практике. Мощности тепловых и гидравлических агрегатов увеличивались. Начали сооружаться паровые турбины мощностью 20, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 500, 800 Мвт на валу. Соответственно развивалось и котельное оборудование с переходом на сверхкритические параметры пара (24 МПа и 565⁰С). Гидроагрегаты также наращивали свою мощность: 12, 20, 43, 100, 200, 500 и 600 Мвт, а также множество промежуточных мощностей. Увеличивался используемый напор, например Сима – ГЭС, Норвегия имеет напор порядка 1100 м. В 1964 году по проекту ЦКТИ была пущена первая парогазовая установка (газовая турбина мощностью 4 МВт и паровая турбина мощностью 12 МВт). В настоящее время это направление получает все большее распространение.

Развитие электроэнергетики.

Явления электризации были известны человеку очень давно. также он сталкивался и с явлениями магнитными, которые проявлялись притягиванием или отталкиванием некоторых пород или притягиванием железных изделий.

В 1570 году английский ученый У. Гильберт выполнил описание этих явлений, однако он пришел к ошибочному выводу, что эти явления не имеют связи между собой.

Эту неточность исправил русский ученый Ф. Эпинус, который в 1758 году в докладе АН излагал идею «О родстве электрической силы и магнетизма».

Американский ученый Б. Франклин сумел понять, что существует два состояния наэлектризованных тел, которым он придал смысл двух различных зарядов (положительных и отрицательных).

1785 год ознаменовался значительным открытием французского ученого Ш. О. Кулона, который сформулировал закон взаимодействия двух электрически заряженных тел. Как говорят современные физики из этого закона можно вывести почти все другие законы электротехники.

В результате работ Л. Гальвани (около 1738 года) и А. Вольта (1799 год) был создан гальванический элемент, который сыграл значительную роль в изучении законов электротехники.

Датский ученый Х. К. Эрстед в 1819 году установил, что существует влияние электрического тока на магнитную стрелку компаса, а в 1920 году А. М. Ампер показал, что электрический ток создает точно такое же магнитное поле, как и постоянный магнит. Более того он определил силу взаимодействия между собой двух токов, протекающих по проводам.

Английский ученый М. Фарадей открыл закон электромагнитной индукции, один из основополагающих законов электротехники.

Русский ученый Э. Х. Ленц в 1833 году открыл правило, которое связывало направление магнитного поля, движение в нем проводника и направление тока в проводнике (или направление ЭДС в проводнике).

Русский изобретатель Якоби в 1834 году изобрел и применил первый практически пригодный электродвигатель.

Немецкий ученый Г. Р. Кирхгоф в 1847 году сформулировал законы электрических цепей.

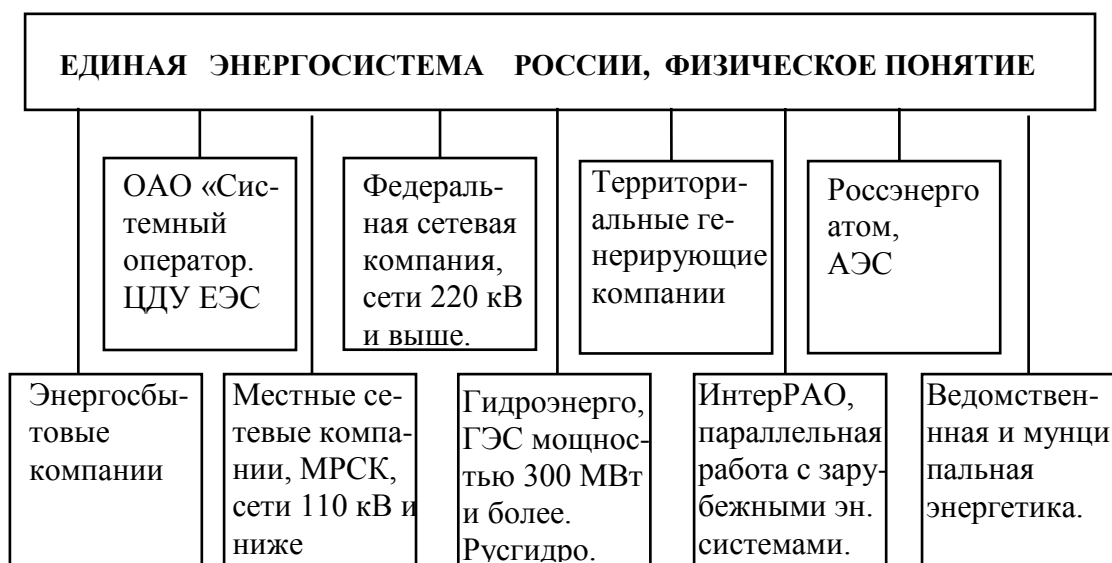
В 1873 году английский ученый Д. К. Максвелл обобщив все предыдущие знания создал обобщенную теорию электромагнитных явлений, которая была усовершенствована немецким ученым Генрихом Герцем, именно в его интерпретации эта теория излагается во всех учебниках.

В 1873 году русским изобретателем А. Н. Лодыгиным было сконструирована лампа накаливания с вольфрамовой нитью, запатентованная во многих странах. В 1880 году русским электротехником Д. А. Лачиновым была доказана возможность передачи электроэнергии на большие расстояния путем увеличения напряжения.

1888 год, российский инженер, работающий в Европе, теоретически доказал преимущества трехфазного переменного тока, а в 1891 году под его руководством была построена первая энергосистема трехфазного переменного тока. Она состояла из: трехфазного генератора, установленного на ГЭС, где до этого стоял генератор постоянного тока, трехфазного повысительного трансформатора, трехфазной линии электропередачи напряжением 14 кВ, трехфазного понизительного трансформатора и трехфазного асинхронного двигателя, который вращал насос фонтана очередной электротехнической выставки в немецком городе Франкфурте-на-Майне. Это был прообраз современной электроэнергетической системы. После этого трехфазный переменный ток разошелся по всему миру.

В России к 1913 году имела на электростанциях 1141 МВт установленной мощности. К 1930 году добавилось еще 1750 МВт. В дальнейшие годы регулярно вводились новые электрические мощности. Так в 1975 году было введено 12000 МВт электрических мощностей. Одновременно строились линии электропередачи все более высоких напряжений: 110, 220, 330, 500, 750 и 1150 кВ. Формировалась Единая энергетическая система.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ОБЩИЕ СХЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ



Данный блок – схема отражает связи, существующие в пределах Единой Энергосистемы России между всеми указанными подразделениями, но связи не в порядке административной подчиненности.

ОАО «Системный оператор ЕЭС России» осуществляет диспетчерское управление режимами в нормальных и аварийных ситуациях на всей территории ЕЭС самостоятельно или через свои филиалы, территориальные объединенные диспетчерские управления (ОДУ): Северо-Запада, Центра, Средней Волги, Юга, Урала, Сибири и Дальнего Востока. Кроме того, на каждой территории имеются региональные диспетчерские управления, зона действий которых приблизительно совпадает территорией области или республики.

Аналогично построена система ФСК, имеются территориальные филиалы с теми же названиями и региональные. Также построена система МРСК и генерирующих компаний.

Единая энергосистема России сегодня объединяет параллельной работой электростанции, электрические сети и потребителей, расположенных на территории европейской части, Урала, Сибири и до Читинской области. Объединенная энергосистема Дальнего Востока работает пока изолированно. Кроме того, изолированно пока работают энергосистемы: Чукотская, Камчатская, Якутская (республики СОХА), Магаданская, Сахалинская и Норильская.

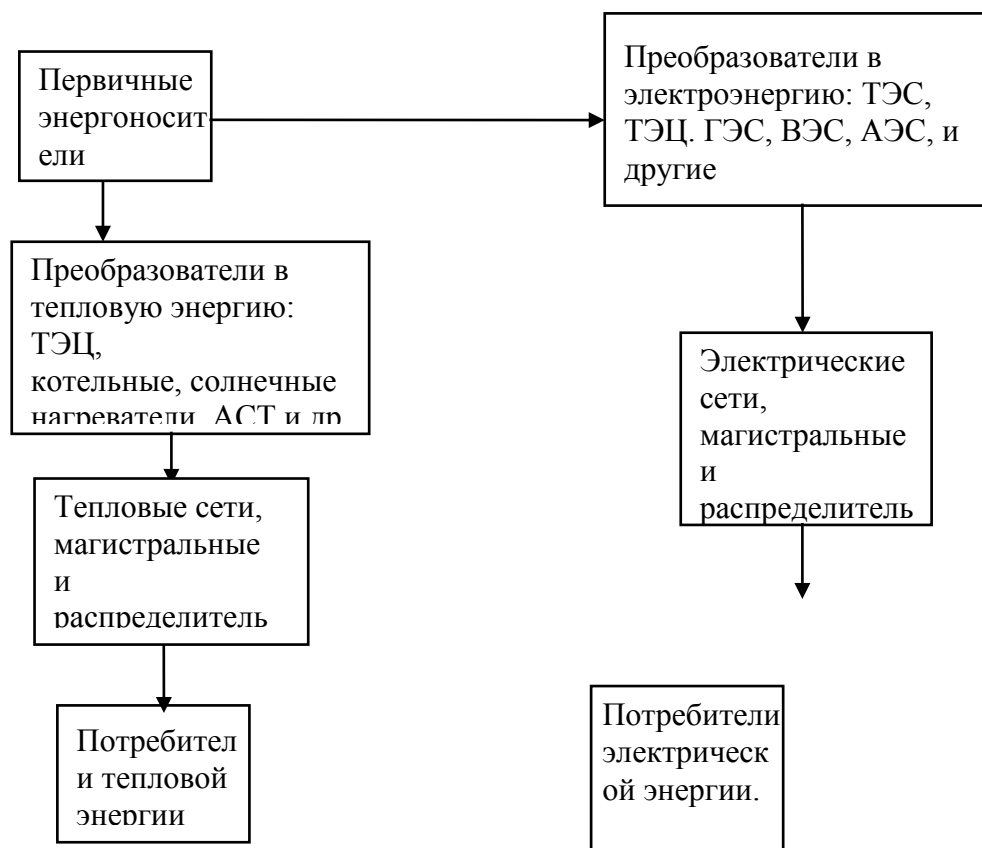
Основной задачей сетевых компаний является эксплуатация электрических сетей, обеспечение транспорта электрической энергии и доставка электрической энергии потребителям.

Ведомственная энергетика. В ее состав входят электростанции, в том числе блок – станции промышленных предприятий, электрические сети, принадлежащие частным или государственным образованиям. При этом они могут (и работают) параллельно с объединенной энергосистемой. Цель -

обеспечение собственного потребления тепловой и электрической энергией, поставка недостающей энергии.

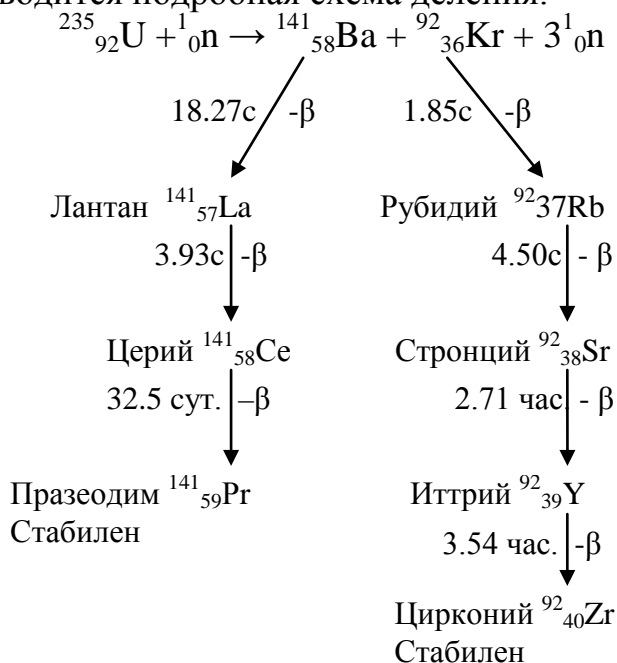
Муниципальная энергетика состоит из электрических сетей (как правило напряжением 35 кВ и ниже), небольших электростанций, котельных, тепловых и электрических сетей. Основное назначение – обеспечение тепловой энергией и поставка электрической энергии потребителям.

Физическая схема энергоснабжения.

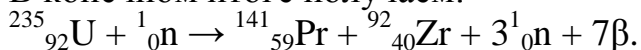


ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ПРИМЕР ПОЛНОЙ СХЕМЫ ДЕЛЕНИЯ УРАНА 235

Существует несколько вариантов деления урана 235 под действием тепловых нейтронов. Один из наиболее вероятных схем деления был приведен в лекции 2. Но промежуточные продукты деления являются неустойчивыми и подвержены спонтанному делению под влиянием β – распада (с испусканием электрона) до получения стабильных изотопов. Ниже приводится подробная схема деления.



В конечном итоге получаем:



Имеем массы в а.е.м: урана $m_U = 235.043915$, Празеодима $m_{Pr} = 140.907596$, Циркония $m_{Zr} = 91.905030$, нейтрона $m_n = 1.008664$. Массой электронов пренебрегаем.

Дефект массы: $\Delta M = m_U + m_n - m_{Pr} - m_{Zr} - 3m_n = m_U - m_{Pr} - m_{Zr} - 2m_n$.

Если принять, что масса урана 1 кг, то дефект массы в исчислении на 1 кг урана будет :

$$\begin{aligned}
 \Delta M_1 &= 1 - \frac{m_{Pr} + m_{Zr} + 2m_n}{m_U} = \\
 &= 1 - \frac{140.907596 + 91.905030 + 2 \cdot 1.008664}{235.043915} = 1 - 0.999089.
 \end{aligned}$$

Получили ту же величину дефекта массы, что и в лекции 2.

В результате деления ядер урана под действием тепловых нейтронов происходит следующее распределение выделяемой энергии между осколками:

Продукты деления	Доля в %
Осколки – атомы элементов, кинетическая энергия	84.0

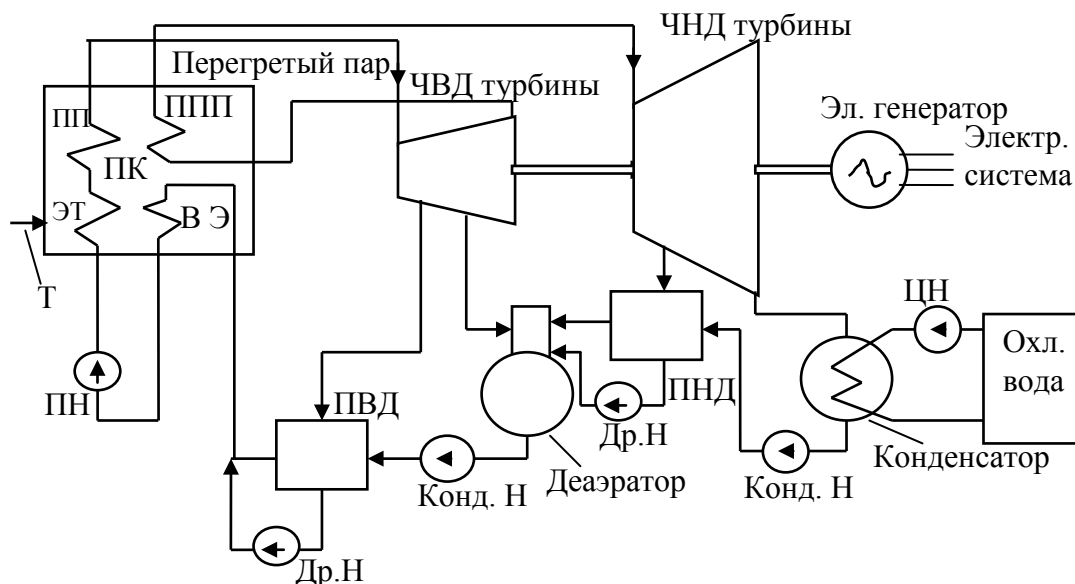
Нейтроны, кинетическая энергия	2.5
γ - кванты	6.0
Электроны, кинетическая энергия	2.5
Нейтрино	5.0

Расчеты и опыт показал, что на 100 делений урана получается 259 нейтронов. Из них 59 теряется в продуктах деления, конструкционных материалах реактора, просто утечка. Остальные 200 нейтронов после замедления обеспечивают непрерывную управляемую цепную реакцию.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Ниже приведены две с тепловые схемы тепловых электростанций. Схемы, конечно, не полные, но содержащие все основные элементы реальных схем.

Тепловая схема конденсационной электростанции.



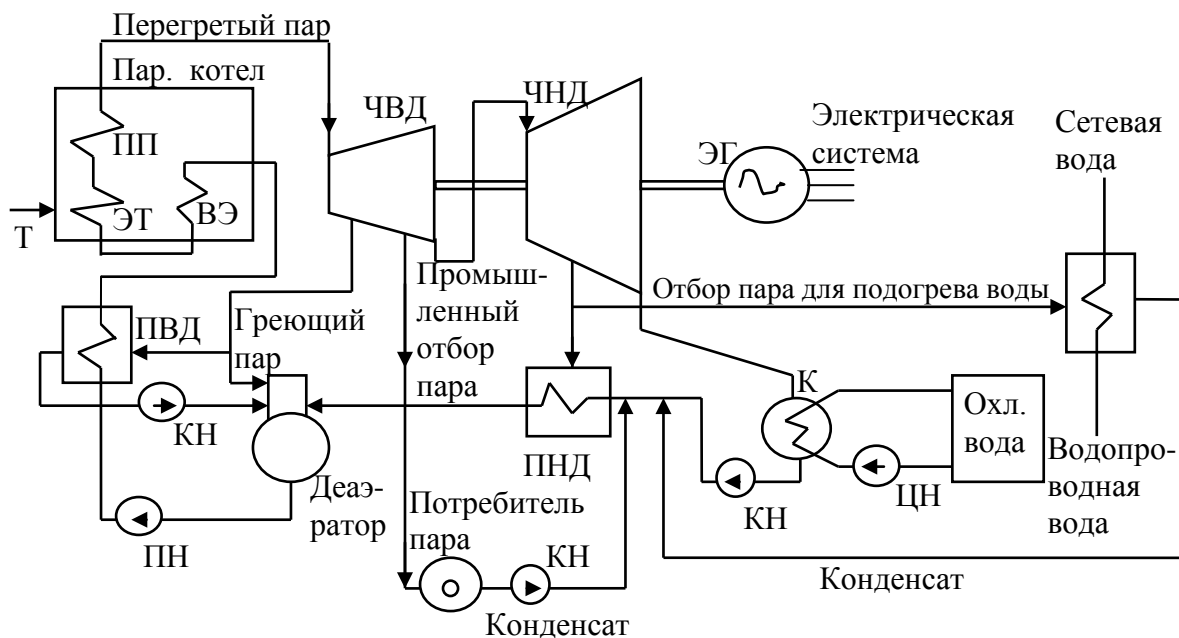
Обозначение и назначение элементов следующее.

Паровой котел, Т обозначена подача топлива, ЭТ – экранные трубы, где происходит нагрев питательной воды и ее испарение, ПП – пароперегреватель осуществляющий доведение пара до нужных параметров, ВЭ – водяной экономайзер, осуществляет окончательный подогрев питательной воды.

Паровая турбина состоит из двух частей, ЧВД – часть высокого давления, после прохождения которой пар поступает снова в котел для промежуточного перегрева на соответствующий пароперегреватель – ППП. От части высокого давления осуществляется два отбора пара. Первый идет на подогреватель высокого давления (ПВД) поверхностного типа, в котором теплота передается от пара к воде через стенки с хорошей теплопроводностью. Отдавая тепло пар конденсируется и в виде конденсата дренажным насосом добавляется к питательной воде. Возможно использование подогревателей смешивающего типа (пар смешивается с водой, конденсируется и повышает температуру воды), ПВД осуществляет регенеративный подогрев питательной воды, повышающий общий КПД установки. После промежуточного подогрева пара он становится снова сухим, ему добавляется некоторое количество теплоты и он поступает в часть низкого давления турбины. От части низкого давления также осуществляется отбор пара для предварительного регенеративного подогрева конденсата, который получается из отработанного пара в конденсаторе и подается

конденсатным насосом в подогреватель низкого давления (ПНД). Подогретая вода, вместе со сконденсированным паром, подогревающим ПНД поступает в деаэратор, в который одновременно подается греющий пар, в результате вода, нагретая до температуры кипения, избавляется от значительной части воздуха, в состав которого сходят агрессивные газы и прежде всего кислород. Обескислороженная вода конденсатным насосом подается в ПВД для осуществления следующей ступени подогрева. В конечном итоге подогретая до температуры $150 - 250^{\circ}\text{C}$ питательная вода питательным насосом подается на вход котла. Давление питательной воды передается пару, чем и осуществляется движение его в нужном направлении.

Тепловая схема ТЭЦ сложнее тепловой схемы конденсационной электростанции. Это связано с необходимостью дополнительных отборов пара для теплоснабжения потребителей и видно из несколько упрощенной схемы турбины ПТ – 60, т.е. турбины имеющей промышленный и теплофикационный отборы пара.



Из парового котла перегретый пар попадает в часть высокого давления паровой турбины, у которой есть два отбора. Первый отбор служит для регенеративного подогрева питательной воды и для получения греющего пара деаэратора. Второй отбор служит для поставки пара промышленным потребителям, которые обязаны возвращать конденсат, который конденсатным насосом добавляется к питательной воде. Из части низкого давления пар отбирается также для регенеративного подогрева питательной воды и для подогрева сетевой воды, подаваемой потребителям для целей отопления и горячего водоснабжения. Как видно из схемы турбина может работать как за счет отбора пара, так и на конденсатор (К) в любых пропорциях. Схема показывает, что используются подогреватели (теплообменники) поверхностного типа, поэтому отдавший тепло пар, превратившийся в конденсат, конденсатными насосами (КН) подается в систему питательной воды.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики / Г.Ф. Быстрицкий. – М.: ИНФРА-М, 2006.
2. Быстрицкий Г.Ф. Общая энергетика / Г.Ф. Быстрицкий. – М.: АКАДЕМИЯ, 2005.
3. Веников В.А. Введение в специальность: электроэнергетика: учебное пособие / В.А. Веников, Е.В. Путятин. – М.: Высшая школа, 1978.
4. Савин И.Г. Теоретические основы теплотехники в 2 Ч. / Ч. 1.: Техническая термодинамика; Ч. 2.: Теплопередача / И.Г. Савин. – Петрозаводск, 2008.
5. Коллиер Дж. Введение в ядерную энергетику / Дж. Коллиер, Дж. Хьюитт. – М., 1989.