

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА**

О. М. Осмонов

ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Учебное пособие

**Москва
Издательство РГАУ-МСХА
2015**

УДК 620.9+621.472 (076)

ББК 31.15+31.6я723

О-749

Осмонов О.М. Общая энергетика: Учебное пособие / О.М. Осмонов. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2015. 98 с.

Учебное пособие в форме лекций составлено в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению «Электроэнергетика и электротехника» и содержит сведения, касающиеся общих вопросов энергетики: энергетические ресурсы и их рациональное использование; основы технической термодинамики и теории теплообмена; технология производства тепловой и электрической энергии на различных видах электрических станций.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника» профиль «Электроснабжение». Ознакомление с лекциями будет полезно для студентов всех энергетических специальностей как с основной их узкой специализации.

Рекомендовано к изданию учебно-методической комиссией Энергетического факультета, протокол №6 от 18 февраля 2015 г.

Р е ц е н з е н т : доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник Всероссийского НИИ
электрификации сельского хозяйства
А.И. Учеваткин

ISBN

© Осмонов О.М., 2015

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА

имени К.А. Тимирязева, 2015

© Издательство РГАУ-МСХА, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Лекция 1. Энергоресурсы и их использование	5
Контрольные вопросы.....	10
Лекция 2. Невозобновляемые и возобновляемые источники энергии.....	11
Контрольные вопросы.....	18
Лекция 3. Основные понятия технической термодинамики.....	19
Контрольные вопросы.....	24
Лекция 4. Термодинамические процессы, используемые при производстве тепловой и электрической энергии.....	25
Контрольные вопросы.....	30
Лекция 5. Реальные газы. Водяной пар.....	31
Контрольные вопросы.....	40
Лекция 6. Основы теории теплообмена. Теплопроводность.....	41
Контрольные вопросы.....	45
Лекция 7. Конвективный и лучистый теплообмен.....	46
Контрольные вопросы.....	51
Лекция 8. Теплопередача и основы расчета теплообменных аппаратов энергетических установок	52
Контрольные вопросы.....	55
Лекция 9. Циклы основных тепловых электрических станций.....	56
Контрольные вопросы.....	63
Лекция 10. Гидроэлектростанции.....	64
Контрольные вопросы.....	71
Лекция 11. Ветроэнергетика и солнечная энергетика.....	72
Контрольные вопросы.....	77
Лекция 12. Основное оборудование тепловых электрических станций.....	78
Контрольные вопросы.....	83
Лекция 13. Системы теплоснабжения. Основное теплофикационное оборудование.....	84
Контрольные вопросы.....	88
Лекция 14. Современные направления развития энергетики.....	89
Контрольные вопросы.....	92
Приложения	93
Библиографический список.....	97

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что энергетика считается основой современной цивилизации. Можно без преувеличения сказать, что без тепловой и электрической энергии невозможна нормальная жизнь современного общества. Тепловая и электрическая энергия широко используется в промышленности для приведения в действие самых различных механизмов и непосредственно в технологических процессах, на транспорте, в быту.

Энергетика - отрасль народного хозяйства, охватывающая энергетические ресурсы, выработку, преобразование, передачу и использование различных видов энергии. Понятие энергетика включает в себя и научно-техническое направление, занимающееся изучением сути всех энергетических преобразований, а также созданием новых направлений использования энергии в интересах человека.

Темпы научно-технического прогресса, интенсификация общественного производства, улучшение условий труда и решение многих социальных проблем в значительной мере определяются уровнем использования энергетических ресурсов.

В учебных планах энергетических специальностей отсутствуют учебные дисциплины, охватывающие полный технологический цикл получения электрической и тепловой энергии, работу основного оборудования, что, в свою очередь, уменьшает общий уровень технической подготовки студентов.

Указанное обстоятельство предопределяет необходимость настоящего учебного пособия, в котором изложен материал, касающийся общих вопросов энергетики:

- энергетические ресурсы и их рациональное использование;
- основы технической термодинамики и теории теплообмена;
- технология производства тепловой и электрической энергии на различных видах электрических станций: тепловые электростанции (ТЭС) в виде конденсационных электростанций (КЭС) и теплоэлектроцентралей (ТЭЦ); гидроэлектростанций (ГЭС); атомных электростанций (АЭС) и др.;
- принципы работы и характеристики основного энергетического оборудования электростанций использующих традиционные и нетрадиционные источники энергии.

Лекции по этому курсу читаются автором на кафедре «Теплотехника, гидравлика и энергообеспечение предприятий» студентам профиля «Электроснабжение» по направлению «Электроэнергетика и электротехника».

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

Лекция 1.

ЭНЕРГОРЕСУРСЫ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Общество в целом и каждый человек в отдельности не может обходиться без потребления энергии. Источниками энергии могут служить вещества и системы, энергетический потенциал которых достаточен для последующего целенаправленного использования.

Энергия – это способность системы совершать работу. Различают множество форм энергии (кинетическая, потенциальная, тепловая, механическая, электрическая и т.д.). Основная единица измерения энергии Дж (Джоуль), но на практике используются и внесистемные единицы измерения энергии, например, кВт·ч ($1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \text{ МДж}$); калория ($1 \text{ кал} = 4,1868 \text{ Дж}$); электронвольт ($1 \text{ эВ} = 1,60219 \cdot 10^{19} \text{ Дж}$).

С понятием энергия тесно взаимосвязано другое, не менее важное понятие – **мощность**. Очень важно различать эти два понятия (энергия и мощность) и знать их физическое отличие. Мощность – это величина произведенной (или израсходованной) энергии в единицу времени, единица измерения мощности Ватт ($1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$).

Энергетический потенциал является параметром, оценивающим возможность использования источника энергии, выражается в единицах энергии – Джоулях или киловатт-часах.

Энергетические ресурсы — все доступные для промышленного и бытового использования источники механической, тепловой, химической, электрической, ядерной энергии.

Энергетические ресурсы можно разделить на:

первичные энергоресурсы, источник которых – природные ресурсы и природные явления;

вторичные (побочные) энергоресурсы (ВЭР) - это носители энергии, образующиеся в ходе производства, которые могут быть повторно использованы для получения энергии вне основного технологического процесса. К примеру, это промежуточные продукты обогащения и сортировки углей; гудроны, мазуты и другие остаточные продукты переработки нефти; щепки, пни, сучья при заготовке древесины; горючие газы; тепло уходящих газов; горячая вода из систем охлаждения; отработанный пар силовых промышленных установок.

Среди первичных энергоресурсов различают: традиционные и нетрадиционные, возобновляемые и невозобновляемые источники энергии.

Возобновляемые (воспроизводимые) источники энергии (ВИЭ) – это источники на основе постоянно существующих или периодически возникающих в окружающей среде потоков энергии. Типичный пример такого источника – солнечное излучение с характерным периодом повторения 24 ч. Возобновляемая энергия не является следствием целенаправленной деятельности человека, и это является ее отличительным признаком.

Невозобновляемые (невоспроизводимые, ископаемые, истощаемые) источники энергии – это природные запасы веществ и материалов, которые

могут быть использованы человеком для производства энергии. Например, ядерное топливо, уголь, нефть, газ. Энергия невозобновляемых источников в отличие от возобновляемых находится в природе в связанном состоянии и высвобождается в результате целенаправленных действий человека.

Понятия **традиционные** и **нетрадиционные** объясняются в основном сложившейся к настоящему времени структурой энергетической отрасли. Первыми источниками энергии для преобразовательной деятельности человека были ВИЭ – мускульная сила животных, ветер, реки, приливы. Затем в ход пошли запасы ископаемого топлива, в том числе ядерное горючее.

Структура мирового энергохозяйства на сегодня сложилась так, что 80% потребляемой электроэнергии получается при сжигании ископаемых видов топлива на тепловых электростанциях (ТЭС), где химическая энергия топлива превращается сначала в теплоту, теплота – в работу, а работа – в электрическую энергию. Около 15% потребляемой электроэнергии получается на гидравлических электростанциях (ГЭС), остальное энергопотребление (около 5%) покрывается другими источниками, в основном атомными электростанциями (АЭС).

Эффективность использования энергоресурсов определяется степенью преобразования их энергетического потенциала в конечную используемую продукцию или потребляемые конечные виды энергии (электрическая энергия, механическая энергия движения, теплота для систем отопления или технологических нужд и т.д.), что характеризуется **коэффициентом полезного использования энергоресурсов $\eta_{\text{эр}}$** :

$$\eta_{\text{эр}} = \eta_{\text{д}} \cdot \eta_{\text{п}} \cdot \eta_{\text{и}}, \quad (1.1)$$

где $\eta_{\text{д}}$ – коэффициент добычи, извлечения потенциального запаса энергоресурса (отношение добытого ко всему количеству ресурса);

$\eta_{\text{п}}$ – коэффициент преобразования (отношения полученной энергии ко всей подведенной энергоресурсом);

$\eta_{\text{и}}$ – коэффициент использования энергии (отношение использованной энергии к подведенной к потребителю).

Для нефти $\eta = 30 \dots 40\%$, для газа – 80%, угля – 40%.

Современные топочные устройства при получении тепловой энергии из химической путем сжигания топлив позволяют получить $\eta_{\text{п}} = 94 \dots 98\%$; при передаче теплоты потребителю через системы теплоснабжения $\eta_{\text{п}}$ снижается до 70...80%.

Если же из тепловой энергии продуктов сгорания получается механическая с целью выработки электроэнергии (на тепловых электростанциях – ТЭС), то $\eta_{\text{п}} = 30 \dots 40\%$; для двигателя внутреннего сгорания $\eta_{\text{п}} = 20 \dots 30\%$. Величина $\eta_{\text{и}}$ зависит от типа конкретного потребителя и условий эксплуатации (отопительные системы – 50%). В среднем $\eta_{\text{эр}} = 36\%$.

Быстрое развитие мировой энергетики в 20 веке опиралось на широкое использование углеводородного ископаемого топлива (нефти, природного газа и угля). Их добыча до середины 70-х г.г. была сравнительно недорогой и доля нефти и газа в мировом потреблении энергетических ресурсов

достигала 60% и доля угля — свыше 25% (в 1950г. доля угля составляла 50%). Следовательно, свыше 85% суммарного потребления энергетических ресурсов в мире в тот период приходилось на невозобновляемые ресурсы (органические топлива) и лишь около 15% — на возобновляемые ресурсы (гидроэнергия, дровяное топливо и др.).

С 70-х г.г., когда сложность и стоимость добычи нефти и газа стали резко увеличиваться в связи с исчерпанием их запасов в легкодоступных месторождениях, появилась необходимость их жёсткой экономии и строго ограниченного использования в качестве топлива. Главными областями применения ресурсов нефти и газа как ценнейшего технологического сырья стала химическая и нефтехимическая промышленность (производство синтетических материалов).

Важным первичным энергоресурсом для электроэнергетики становится в конце 20 века и в перспективе ядерная энергетика. В середине 80-х годов на атомных электростанциях мира было выработано свыше 12% всей электроэнергии, произведённой на планете, а в начале 21 века её доля в мировом электробалансе увеличится ещё в 2-2,5 раза.

Большая роль в производстве электроэнергии принадлежит гидроэнергетическим ресурсам, источником которых является постоянное течение рек; в середине 80-х гг. на долю гидроэлектростанций приходилось 23% всей электроэнергии, выработанной в мире.

Значительно возрастает роль таких возобновляемых нетрадиционных энергетических ресурсов, как: солнечная энергия; геотермальная энергия; тепловая энергия Мирового океана; энергия морских приливов и энергия волн; ветровая энергия; энергия биомассы. По прогнозам, доля возобновляемых энергоресурсов (гидроэнергетических и перечисленных нетрадиционных) достигнет в 1-й четверти 21 века примерно 7-9% в мировом суммарном использовании всех видов первичных энергоресурсов (свыше 20-23% будет приходиться на атомную ядерную энергию и около 70% сохранится за органическим топливом — углём, газом и нефтью).

В общем случае, потребности человека растут, людей становится все больше и это вызывает гигантские объёмы производства энергии и темпы роста ее потребления. В связи с этим энергетическая проблема была и остается одной из важнейших глобальных проблем современности.

Динамику роста потребления энергии показывает график потребления энергии в функции времени (рис. 1.1).

Из приведенного графика видно, что мировое потребление топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) удваивается каждые 25...30 лет. Прогноз предполагает дальнейшее увеличения потребления энергии в обозримом будущем, выраженное в потреблении количества условного топлива (условное топливо это некоторое абстрактное топливо, которое имеет теплоту сгорания 29,3 МДж/кг). Естественно, что при этом возникает множество вопросов связанных с истощением запасов ископаемых видов топлива (табл. 1.1), использованием возобновляемых источников энергии, охраной окружающей среды и т.п.



Рис. 1.1. Динамика роста потребления энергии в мире

Таблица 1.1.

Ориентировочные мировые запасы органического топлива

Вид топлива	Разведанные запасы		Извлекаемые запасы	
	млрд т у.т.	%	млрд т у.т.	%
Всего	12800	100	3800	100
В том числе: уголь	11200	87,4	2900	76
нефть	740	5,8	370	9,7
газ (природный)	630	4,9	500	13,3
прочие (торф, сланцы и т.п)	230	≈1,9	30	≈1,0

Уже сегодня ряд месторождений из-за истощения оказывается непригодным для промышленной разработки, и за нефтью и газом, например, приходится идти на труднодоступные, отдаленные территории, на океанские шельфы. Прогнозы показывают, что при сохранении нынешних темпов роста энергопотребления в 3...5% в год (а они без сомнения будут еще выше) запасы органических топлив полностью иссякнут через 70-150 лет.

Другим фактором, ограничивающим увеличение объемов выработки энергии за счет сжигания топлив, является возрастающее загрязнение окружающей среды отходами энергетического производства. Так, например, при производстве 10^6 кВт·ч электроэнергии на ТЭС (работающей на твердом топливе), в окружающую среду сбрасываются 14 т шлака, 80 т золы, 100 т диоксида углерода, 14 т диоксида серы, 4 т окислов азота, 100 т водяных паров, а также соединения фтора, мышьяка, ванадия и других элементов. А ведь количество вырабатываемой в год электроэнергии исчисляется тысячами миллиардов киловатт-часов! Вот откуда кислотные дожди, отравления сельхозугодий и водоемов. Природа уже не в состоянии

естественными физико-химическими и микробиологическими способами переработать эти загрязнения и самовосстановиться.

Не менее вредным является и тепловое загрязнение окружающей среды, способное привести к глобальным изменениям климата Земли, таянию ледников и повышению уровня мирового океана. Естественный тепловой баланс планеты определяется поступлением на землю солнечной радиации в количестве около 60×10^{23} Дж в год. За счет этого поддерживается средняя температура поверхности Земли. Функционирование традиционной энергетики приводит к выделению дополнительного к солнечной радиации тепла. Сегодня это дополнительное тепловыделение составляет около 4×10^{20} Дж в год, т.е. в 15000 раз меньше поступающей солнечной радиации. Пока антропогенное тепловыделение относительно мало и в глобальном масштабе планета с ним справляется. Но энергетика развивается бурными темпами, и, глядя вперед, об этом надо задумываться.

Здесь уместно остановиться на понятии «**парниковый эффект**». Парниковый эффект – это естественный физический эффект, заключающийся в том, что исходящее от поверхности Земли тепло сохраняется в слоях атмосферы, что приводит к увеличению температуры окружающей среды. Различают **естественный** (природный) и **антропогенный парниковые эффекты**. Благодаря естественному парниковому эффекту – возможна жизнь на Земле. Если бы отсутствовали так называемые парниковые газы, то планета Земля за ночь могла бы покрыться льдом. Парниковые газы играют важную роль, помогая сохранить часть энергии, излучаемой землей. Парниковые газы (углекислый газ, метан и др.), а также водяной пар препятствуют длинноволновому (инфракрасному) излучению в космос. Таким образом, происходит частичное сохранение энергии, что позволяет сохранить жизнь на Земле. Однако, в последнее время усилился антропогенный парниковый эффект, который является следствием прогресса в развитии человечества и увеличения потребления ископаемого топлива. В результате этого в атмосфере увеличилась концентрация CO_2 , CH_4 и других парниковых газов, что привело к нарушению радиационного баланса атмосферы, и как следствие к глобальному потеплению.

Существуют возможности создания более экономичных способов переработки урана, а также термоядерных преобразователей, которые должны позволить решить проблему снабжения человечества энергией на тысячелетия, но это не снимет проблем теплового загрязнения, проблем хранения отходов, проблем возможных аварий энергетических гигантов.

В свете изложенного выше все более актуальным становится широкое практическое использование источников возобновляемой энергии, природа которых определяется процессами на Солнце и в глубинах Земли, гравитационным взаимодействием Солнца, Земли и Луны (рис. 1.2).

В обозримом будущем основным источником энергии останутся углеводородные топлива и ядерное горючее. Но человечество уже приближается к такому пределу повышения суммарной мощности традиционных энергоустановок, преодоление которого неизбежно повлечет экологическую катастрофу. Поэтому современная «нетрадиционная»

энергетика – это тот резерв, который дает надежду и возможность преодолеть многие неразрешимые проблемы и обеспечить возрастающие потребности человека в будущем. По мере совершенствования технологий и масштабов практического использования часть «нетрадиционных» энергоустановок перейдет в разряд традиционной «большой» энергетики, другая часть найдет свою нишу в «малой» энергетике для энергообеспечения локальных объектов.

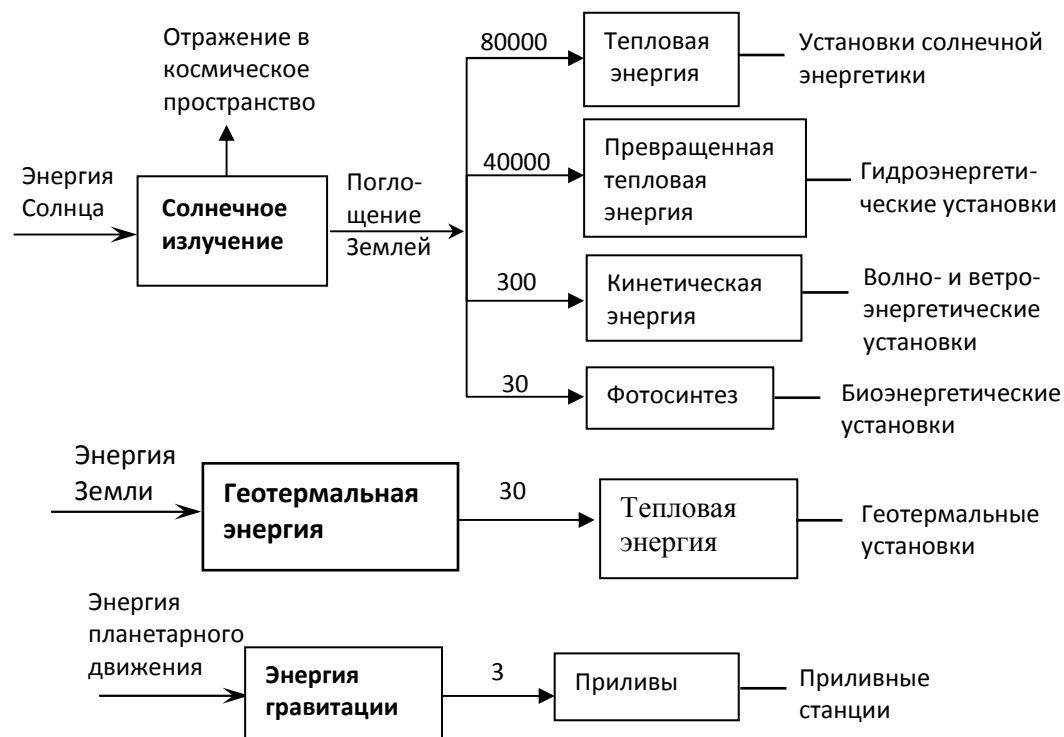


Рис. 1.2. Возобновляемые энергоресурсы и их использование.

Здесь, числа обозначают мощность источника в тераваттах (10^{12} Вт).

Следует обратить внимание на большое различие в мощности источников ($1:10^5$) и на доминирующую роль солнечного излучения.

Контрольные вопросы:

1. Что такое энергия, какие виды энергии вы знаете?
2. Какие единицы измерения энергии вы знаете, какие между ними соотношения? Чем отличается мощность от энергии?
3. Каким параметром оценивается возможность использования источника энергии?
4. Какие источники энергии называются возобновляемыми?
5. Назовите основные виды возобновляемых источников энергии.
6. Что характеризует коэффициент полезного использования энергоресурсов и каково среднее значение этого коэффициента?
7. Перечислите основные традиционные источники энергии.
8. Какие существуют проблемы в современной традиционной энергетике и какие причины этих проблем?
9. Что такое парниковый эффект?

Лекция 2. НЕВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

2.1. Общие понятия о характеристиках топлива

Те источники энергии, которые свою потенциальную энергию представляют в виде химической энергии и выделяют ее при сгорании, называют **топливом**.

Более 90% потребляемой энергии образуется при сжигании естественного органического топлива трех видов: твердое топливо (уголь, торф, сланцы); жидкое топливо (нефть и газоконденсаты); газообразное топливо (природный газ, попутный газ нефти).

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.

С этой точки зрения топливо бывает:

а) горючее – выделяет тепло при окислении (окислитель – обычно O_2 , N_2 , азотистая кислота, перекись водорода и пр.);

б) расщепляющееся или ядерное топливо (основа ядерной энергетики, обычно уран 235).

Горючее делят на **органическое** и **неорганическое**. Органическое горючее – углерод и углеводород. Горючее бывает **природное** (добытое в недрах земли) и **искусственное** (переработанное природное). Искусственное в свою очередь делится на **композиционное** (полученное механической переработкой естественного, бывает в виде гранул, эмульсий, брикетов) и **синтетическое** (произведенное путем термохимической переработки естественного - бензин, керосин, дизельное топливо, угольный газ и т.д.).

Общепринятое слово "горючее" - это топливо, предназначенное для сжигания (окисления). Обычно слово "топливо" и "горючее" воспринимаются как адекватные, т.к. чаще всего "топливо" и бывает представлено "горючим". Однако следует знать и другие разновидности топлива. Так, металлы алюминий, магний, железо и др. при окислении так же могут выделять много теплоты. Окислителем вообще могут быть кислород воздуха, чистый кислород и его модификации (атомарный, озон), азотная кислота, перекись водорода и т.д.

Сейчас в основном используется ископаемое органическое горючее с окислителем - кислородом воздуха.

Состав твердого и жидкого топлива выражается в % по массе, при этом за 100% принята рабочая масса - используемая непосредственно для сжигания. Органическое топливо состоит из следующих составляющих: горючая составляющая (органические ингредиенты - C, H, O, N, S) и негорючая составляющая (состоит из влаги W, минеральной части A):

$$C^p + H^p + S^p + N^p + A^p + W^p = 100 \quad (2.1)$$

Основной элемент, выделяющий теплоту при окислении - это углерод C, менее - водород H. Особое внимание следует уделять сере S. Она заключена как в горючей, так и в минеральной части топлива. При сжигании сера влияет

на коррозионную активность продуктов сгорания, поэтому это - нежелательный элемент.

Влага W в продуктах сгорания представлена внешней ("мокрое" топливо), кристаллогидратной, образованной при окислении водорода. Минеральная часть A - это различные окислы, соли и другие соединения, образующие при сжигании золу.

Состав топлива необходим для определения важнейшей характеристики топлива – теплоты сгорания топлива (теплотворная способность топлива).

Теплота сгорания топлива – это количество тепловой энергии, которая может выделяться в ходе химических реакций окисления горючих компонентов топлива с газообразным кислородом, измеряется в Дж/кг для твердого и жидкого, в Дж/м³ – для газообразного топлива.

Различают высшую удельную теплоту сгорания Q_B^p – 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 Q_H^p определяется в предположении, что теплота, затраченная на превращение воды в пар, не возвращается.

2.2. Невозобновляемые энергоресурсы

К невозобновляемым (невоспроизводимым, ископаемым, истощаемым) источникам энергии относят те, которые имеют ограниченный запас, и возобновление этих запасов не происходит или происходит достаточно медленно.

К ним относятся:

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

Более 90% потребляемой энергии образуется при сжигании естественного органического топлива 3 видов:

- ♦ твердое топливо (уголь, торф, сланцы).
- ♦ жидкое топливо (нефть и газоконденсаты).
- ♦ газообразное топливо (природный газ, CH_4 , попутный газ нефти).

Уголь. С точки зрения энергетической ценности, главной характеристикой углеводородных видов топлива является теплота сгорания. Наряду с теплотой сгорания, важной характеристикой, влияющей на процесс горения угля, является выход летучих веществ (убыль массы топлива при нагреве его без кислорода при 850 °С в течение 7 мин). По этому признаку угли делят на бурые (выход летучих более 40%), каменные (10...40%), антрациты (менее 10%). Воспламеняемость антрацитов поэтому хуже, но теплота сгорания выше.

Таблица 2.1.

Техническая характеристика различных видов угля

Уголь	Состав в %					Выход летучих в %	Теплота сгорания, МДж/кг
	С	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

Мировой запас угля оценивается в 9...11 трлн.т. (условного топлива) при добыче более 4,2 млрд./год.

Наибольшие разведанные месторождения находятся на территории США, СНГ, ФРГ, Австралии.

Общегеологические запасы угля на территории СНГ составляют 6 трлн.т. (50% мировых), в т.ч. каменные угли 4,7 и бурые угли – 2,1 трлн.т. Ежегодная добыча угля – более 700 млн.т., из них 40% открытым способом.

Таблица 2.2.

Разведанные и извлекаемые запасы угля

Разведанные запасы угля, млрд. тонн							
Мировые							909
России							200
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

Нефть.

Мировые запасы нефти около 840 млрд. тонн условного топлива, из них 10% - достоверные и 90% - вероятные запасы.

Запасы нефти в Российской Федерации около 6,3 млрд. тонн. Добыча составляет около 300 млн. тонн.

Основной поставщик нефти на мировой рынок – страны Ближнего и Среднего Востока. Они располагают 66% мировых запасов нефти, Северная Америка – 4%, Россия – 8...10%.

Отсутствуют месторождения нефти в Японии, ФРГ, Франции и многих других развитых странах.

Нефть в сыром виде редко используется как топливо, чаще всего для этой цели идут продукты переработки нефти.

В зависимости от температуры перегонки нефтепродукты делят на фракции:

бензиновые (200...225°C); керосиновые (140...300°C); дизельные (190...350°C); соляровые (300...400°C); мазутные (более 350°C).

Из продуктов переработки нефти для энергетики используют дизельное топливо и мазут (в котлах котельных и электростанций обычно сжигается мазут, в бытовых отопительных установках - печное бытовое – смесь средних фракций). Характеристика используемых в энергетических установках нефтепродуктов представлена в табл. 2.3.

Таблица 2.3.
Характеристика продуктов переработки нефти используемых в энергетических установках

Топливо	Состав в %				Теплота сгорания, МДж/кг
	С	Н	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.

Газы.

Различают газ природный и искусственный. К природным газам относится газ, добываемый из чисто газовых месторождений, газ конденсатных месторождений, шахтный метан и др.

Основной компонент природного газа – метан (CH₄). В энергетике используется природный газ, концентрация CH₄ в котором выше 30% (за пределами взрывоопасности).

Искусственные горючие газы - результат технологических процессов переработки нефти и других горючих ископаемых (нефтезаводские газы, коксовый и доменный газы, сжиженные газы, газы подземной газификации угля и др.).

Таблица 2.4.
Характеристика газообразных видов топлива

Вид 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 природного газа оцениваются в 300...500 трлн м³, ежегодная добыча около 598 млрд. м³. Отсюда следует, что разведанных запасов хватит приблизительно на 80 лет. Однако, есть надежда, что будут открыты новые запасы природного газа.

Другие виды топлива. Кроме вышерассмотренных видов углеводородного топлива, к настоящему времени находят применение следующие виды топлива:

Таблица 2.5.

Характеристика видов топлива

Топливо	Состав в %					Выход летучих, %	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

2.3. Расчет теплоты сгорания топлива

Формулы Д.И. Менделеева для расчета удельной теплоты сгорания выглядят следующим образом (в этих формулах коэффициенты пропорциональности приняты такие, чтобы в результате получить размерность кДж/кг):

Для твердого и жидкого топлива:

$$Q_B = 338 \cdot C + 1249 \cdot H - 108,5 \cdot (O - S), \quad (2.2)$$

$$Q_H = 338 \cdot C + 1025 \cdot H - 108,5 \cdot (O - S) - 25 \cdot W. \quad (2.3)$$

Для сухого газообразного топлива:

$$Q_H = 127 \cdot CO + 108 \cdot H_2 + 358 \cdot CH_4 + 591 \cdot C_2H_6 + 911 \cdot C_3H_8 + 234 \cdot H_2S. \quad (2.4)$$

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 – табл. 2.1) имеет состав:

углерод $C = 75 \%$,

сера $S = 5 \%$,

водород $H = 5 \%$,

кислород $O = 15 \%$.

Теплота сгорания бурого угля согласно формуле (2.2):

$$Q_B = 338 \cdot 75 + 1249 \cdot 5 - 108,5 \cdot (15 - 5) = 30510 \text{ кДж/кг} = 30,51 \text{ МДж/кг},$$

что близко совпадает с данными таблицы 2.1.

Второй пример – природный газ:

Состав газа: $CO = 0$, $H_2 = 0$, $CH_4 = 94,9$, $C_nH_m = 3,8$, $H_2S = 0$,

Теплота сгорания природного газа согласно формуле (2.4):

$$Q_H = 127 \cdot 0 + 108 \cdot 0 + 358 \cdot 94,9 + [(591+911)/2] \cdot 3,8 = 36,8 \text{ МДж/кг}.$$

Для сопоставления тепловой ценности различных видов топливно-энергетических ресурсов используется расчётная единица, называемая **условным топливом (условное топливо)**, имеющее теплоту сгорания 29338 кДж/кг или 7000 ккал/кг).

Для пересчета реального топлива в условное топливо используется тепловой эквивалент:

$$K = \frac{Q_p}{29308}, \quad (2.5)$$

Величина теплового эквивалента для угля в среднем – 0,718; газа природного – 1,24; нефти – 1,43; мазут – 1,3; торфа – 0,4; дров – 0,25.

2.4. Краткая характеристика возобновляемых источников энергии

К возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) относят источники, которые функционируют и будут функционировать в течение времени на много порядков больше, чем время существования человеческой цивилизации. К ним относят:

- ✓ электромагнитную энергию солнца;
- ✓ энергию ветра;
- ✓ гидроэнергию;
- ✓ геотермальную энергию;
- ✓ энергию морских и океанических приливов, отливов и волн;
- ✓ энергию биомассы;
- ✓ энергию торфа при условии, что время рекультивации болот будет достаточно для возобновления запасов торфа.

Солнечная энергия.

Источник солнечной энергии – звезда по имени Солнце. Вследствие термоядерных реакций в активном ядре Солнца достигаются температуры до 10^7 К, а во внешних неактивных слоях до 6000 К, в результате Солнце непрерывно излучает (выделяет) огромную энергию.

Солнечное излучение распространяется со скоростью 3×10^5 км/сек, и уже через 8 минут достигает земной атмосферы в виде направленного потока излучения, состоящего из видимых световых, невидимых ультрафиолетовых и инфракрасных лучей.

Приблизительно 7% всей солнечной радиации приходится на ультрафиолетовое излучение с длиной волны $\lambda = 10 \dots 380$ нм, около 47,3% находится в спектре видимого света ($\lambda = 380 \dots 750$ нм) и 45,7% приходится на спектр инфракрасного и теплового излучения ($\lambda = 750$ нм ... 1 мм).

В верхней части атмосферы земли мощность излучения от солнца составляет 1353 Вт/м^2 (эта величина называется солнечной постоянной).

Нетрудно посчитать общую мощность излучения солнца.

Существует связь энергии (W , Дж) с массой, выражаемая формулой:

$$W = m \cdot c^2, \quad (2.6)$$

где m – масса материального тела, кг; c – скорость света в вакууме, равная $299792458 \text{ м/с} \approx 300000 \text{ км/с} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

Радиус земной орбиты составляет $R = 150 \text{ млн км} (1,5 \cdot 10^{11} \text{ м})$.

Площадь поверхности шара с этим радиусом составит:

$$S = 4 \cdot \pi \cdot R^2 = 4 \cdot 3,14 \cdot (1,5 \cdot 10^{11})^2 = 2,826 \cdot 10^{23} \text{ м}^2.$$

Мощность излучения солнца с учетом величины солнечной постоянной:

$$P_c = 1353 \cdot 2,826 \cdot 10^{23} = 3,846 \cdot 10^{26} \text{ Вт}.$$

Теперь можно определить количество вещества солнца расходуемого на излучение, используя формулу (2.6) в исчислении на мощность:

$$P_c = m' \cdot c^2, \quad (2.6)$$

где m' – секундный расход вещества солнца, кг/с.

Отсюда следует:

$$m' = P_c / c^2 = (3,846 \cdot 10^{26}) / (3 \cdot 10^8)^2 = 4,27 \cdot 10^9 \text{ кг/с} = 4,27 \cdot 10^6 \text{ т/с}.$$

Далее нетрудно проверить, что за 1 млрд лет ($31,32 \cdot 10^{15} \text{ с}$) будет израсходовано $13,31 \cdot 10^{25} \text{ кг}$, что при массе солнца $1,985 \cdot 10^{30} \text{ кг}$ составит всего 0,006 %. Отсюда можно сделать вывод, что солнце можно действительно считать возобновляемым источником энергии.

Энергия ветра.

Ветер представляет собой движение воздуха в атмосфере. Причиной возникновения ветра является солнечное излучение, приводящее к неравномерному нагреву воздуха и появлению конвективных течений. На это термическое явление накладывается эффект вращения Земли. Кроме этих синоптических закономерностей имеют значения местные географические особенности. Определенную роль играет загрязнение атмосферы, приводящее к дополнительным течениям воздушной среды (вблизи крупных промышленных центров).

Фактически энергия ветра, по сути, преобразованная энергия солнца. Общий объем циркулирующей ветровой энергии оценивается около $3 \cdot 10^{15} \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ в год, что соответствует среднегодовой мощности $3,42 \cdot 10^8 \text{ МВт}$. 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.

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

Мировой гидроэнергетический потенциал рек оценивается в размере около $33 \cdot 10^3 \text{ ТВт} \cdot \text{часов}$ в год $= 33 \cdot 10^{12} \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ в год. Это соответствует средней мощности $1,45 \cdot 10^9 \text{ кВт} = 1,45 \cdot 10^6 \text{ МВт}$, что эквивалентно 1450 миллионным блокам.

Российский гидроэнергетический потенциал рек оценивается мощностью в 450000 МВт, или в 450 миллионных блока. Техно-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 приливов-отливов оценивается в размере около 16 тыс МВт. Однако, следует отметить, что технико-экономическая доступность весьма мала.

Понятие о качестве источников энергии.

При выборе источников энергии следует иметь в виду их качество. Последнее оценивается долей энергии источника, которая может быть превращена в механическую работу.

Электроэнергия обладает высоким качеством. С помощью электродвигателя более 95% ее можно превратить в механическую работу.

Качество тепловой энергии, получаемой в результате сжигания топлива на тепловых электростанциях, довольно низкое - около 30%.

Возобновляемые источники энергии по их качеству условно делят на три группы:

1. Источники механической энергии, обладающие довольно высоким качеством: ветроэнергетические установки - порядка 30%, гидроустановки - 60%, волновые и приливные станции - 75%.

2. Источники тепловой энергии: прямое или рассеянное солнечное излучение, биотопливо, обладающее качеством не более 35%.

3. Источники энергии, использующие фотосинтез и фотоэлектрические явления, имеют различное качество на разных частотах излучения; в среднем КПД фотопреобразователей составляет порядка 15%.

Контрольные вопросы:

1. Что такое топливо, какие виды топлива вы знаете?
2. Из каких основных компонентов состоит органическое топливо?
3. Что называется теплотой сгорания топлива, низшей и высшей теплотой сгорания?
4. Перечислите основные виды невозобновляемых энергоресурсов.
5. Какие виды углей вы знаете и по какому признаку они (угли) делятся?
6. Какие продукты переработки нефти вы знаете, и какие из них используются в энергетике?
7. Назовите основные виды газообразного топлива.
8. Что называется условным топливом и тепловым эквивалентом?
9. Что является причиной появления солнечного излучения?
10. Какая величина называется солнечной постоянной?
11. Чем оценивается качество источника энергии, качество электроэнергии выше или тепловой энергии?
12. Как разделяются возобновляемые источники энергии по их качеству?

Лекция 3.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

Техническая термодинамика изучает закономерности взаимного превращения тепловой и механической энергии. На ее основе осуществляют расчет и проектирование всех тепловых двигателей – паровых и газовых турбин, реактивных и ракетных двигателей, двигателей внутреннего сгорания, а также всевозможного технологического оборудования – компрессорных машин, сушильных и холодильных установок и т.д.

Нас будут интересовать некоторые разделы технической термодинамики, применительно к изучению вопросов электро- и теплоэнергетики.

В термодинамике используются молекулярно-кинетические представления о структуре вещества. Основные положения молекулярно-кинетической теории: а) все тела в природе состоят из молекул; б) молекулы находятся в непрерывном хаотическом движении; в) молекулы взаимодействуют между собой.

Термодинамическая система – совокупность материальных тел, находящихся в механическом и тепловом взаимодействиях друг с другом и с окружающими систему внешними телами. Тела, не входящие в систему называют окружающей средой. Систему отделяют от окружающей среды контрольной поверхностью (оболочкой).

Пример простейшей системы: газ, заключенный в тонком цилиндре под поршнем (рис. 3.1). Внешней средой является окружающий воздух, контрольными поверхностями служат стенки цилиндра и поршень.

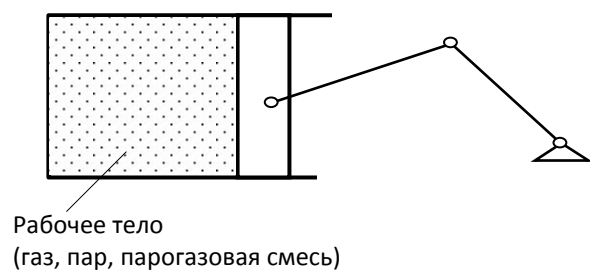


Рис. 3.1. Простейшая термодинамическая система

В технической термодинамике изучаются системы, осуществляющие взаимное превращение теплоты и работы. Обычно это газы и пары. Их называют рабочими телами.

Параметры состояния рабочего тела – величины, характеризующие тело в данном состоянии: давление (p , Па), термодинамическая температура (T , К), удельный объем (v , м³/кг), внутренняя энергия (u , Дж), энтальпия (h , Дж) и энтропия (s , Дж/К).

Давление p обусловлено взаимодействием молекул рабочего тела с поверхностью и численно равно силе, действующей на единицу площади поверхности тела по нормали к последней. В Международной системе единиц (СИ) p измеряют в паскалях (1Па = 1 Н/м²). Поскольку эта единица

мала ($1 \text{ кгс/см}^2 = 1 \text{ ат} = 98066,5 \text{ Па}$) на практике применяются различные внесистемные единицы измерения (табл. 3.1).

Таблица 3.1.

Соотношения между единицами измерения давления

Единица измерения	Па	бар	мм рт.ст.	мм. вод. ст.	кгс/см ²
Паскаль	1	10^{-5}	$7,5024 \cdot 10^{-3}$	0,102	$1,02 \cdot 10^{-5}$
Бар	10^5	1	$7,5 \cdot 10^2$	$1,02 \cdot 10^4$	1,02
Миллиметр ртутного столба	133,322	$1,33 \cdot 10^{-2}$	1	13,6	$1,36 \cdot 10^{-3}$
Миллиметр водяного столба	9,8067	$9,8 \cdot 10^{-5}$	$7,35 \cdot 10^{-2}$	1	10^{-4}
Килограмм-сила на см ²	$9,8 \cdot 10^4$	0,98	$7,35 \cdot 10^2$	10^4	1

Атмосферное давление ($p_{\text{атм}}$) измеряют барометрами, давление выше атмосферного измеряют манометрами, ниже атмосферного – вакуумметрами. Показания манометров дают избыток давления измеряемой среды над атмосферным давлением – избыточное давление ($p_{\text{ман}}$), показания вакуумметров – величину разрежения ($p_{\text{вак}}$).

В термодинамике параметром состояния рабочего тела является только **абсолютное давление** ($p_{\text{абс}}$).

В случае избыточного давления: $p_{\text{абс}} = p_{\text{ман}} + p_{\text{атм}}$.

В случае разрежения (вакуума): $p_{\text{абс}} = p_{\text{атм}} - p_{\text{вак}}$.

Температура – мера интенсивности теплового движения молекул. Параметром состояния рабочего тела является **абсолютная температура**, обозначаемая символом T и измеренная в кельвинах (К). Температура в градусах Цельсия определяется выражением $t = T - 273,15$.

Удельный объем (v , м³/кг) – объем единицы массы вещества. Величина, обратная удельному объему, представляет собой массу единицы объема и называется **плотностью**:

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{M}{V}, \text{ кг/м}^3. \text{ Отсюда следует, что } v\rho = 1.$$

Для сравнения величин, характеризующих системы в одинаковых состояниях, введено понятие «**нормальные условия**»: физические нормальные условия ($p = 760 \text{ мм рт.ст.} = 101,325 \text{ кПа}$; $t = 0^\circ\text{C}$) и технические ($p = 735,6 \text{ мм рт.ст.} = 98 \text{ кПа}$; $t = 15^\circ\text{C}$). В технической термодинамике для расчетов используют физические нормальные условия.

Если все термодинамические параметры постоянны во времени и одинаковы во всех точках системы, то такое состояние системы называют **равновесным**. Если между различными точками в системе существуют разности температур, давлений и т.д., то она является **неравновесной**. В такой системе под действием градиентов параметров возникают потоки теплоты, вещества и т.д., стремящиеся вернуть ее в состояние равновесия. Изолированная система с течением времени всегда приходит в состояние равновесия и никогда самопроизвольно выйти из него не может.

В термодинамике используется понятие «идеальный газ» – воображаемый газ, в котором отсутствуют силы притяжения между молекулами, а собственный объем молекул мал по сравнению с объемом межмолекулярного пространства. Реальные газы при низких давлениях близки к идеальным, ибо в этих условиях силами межмолекулярного взаимодействия и объемом молекул можно пренебречь.

Внутренняя энергия – это сумма внутренней кинетической и потенциальной энергии тела.

Внутренняя кинетическая энергия газов зависит от скорости движения и массы молекул, т.е. включает в себя энергию поступательного и вращательного их движения, а также энергию колебательного движения атомов в самих молекулах. Согласно молекулярно-кинетической теории кинетическая энергия зависит только от температуры тела.

Внутренняя потенциальная энергия обусловлена силами взаимодействия между молекулами и зависит от расстояния между ними. Следовательно, внутренняя энергия реального газа зависит от основных параметров его состояния: p , v , T . Внутренняя энергия идеального газа равна внутренней кинетической энергии из-за отсутствия сил взаимодействия между молекулами.

Уравнение состояния идеального газа.

Уравнение состояния идеального газа связывает между собой основные параметры состояния – давление, объем и температуру и для 1 кг газа записывается в виде:

$$p \cdot v = R \cdot T \quad (3.1)$$

где p – давление газа, Па;

v – удельный объем газа, м³/кг;

R – газовая постоянная (конкретного рассматриваемого газа), Дж/(кг·К);

T – термодинамическая температура, К.

Уравнение (3.1) было выведено в 1834 году французским физиком Клапейроном и названо его именем.

Для произвольной массы газа (для M кг газа) уравнение состояния следующее:

$$p \cdot V = M \cdot R \cdot T \quad (3.2)$$

где V – объем газа, м³; M – масса газа, кг.

Уравнение состояния для 1 киломоля газа:

$$p \cdot V_{\mu} = \mu \cdot R \cdot T \quad (3.3)$$

где V_{μ} – объем 1 кмоля газа, м³/кмоль; μ – молекулярная масса газа, кг/кмоль;

$\mu \cdot R = R_y$ – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К). Численное значение универсальной газовой постоянной равно $R_y = 8314$ Дж/(кмоль·К).

Законы (начала) термодинамики.

Существует три закона, из которых первые два играют принципиальную роль в создании и описании работы тепловых машин и других преобразовательных устройств.

Первый закон термодинамики. 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 – q . До этого момента это рабочее тело обладало внутренней энергией u , в результате появилось приращение этой внутренней энергии Δu . Рабочее тело при расширении и взаимодействии с внешней средой, которое на тело оказывает давление, производит механическую работу l . Между ними существует взаимосвязь:

$$q = \Delta u + l \quad (3.4)$$

Уравнение (3.4) является математическим выражением первого закона термодинамики. Формулировка первого закона термодинамики: Теплота, подведенная к рабочему телу, расходуется на изменение внутренней энергии рабочего тела и на совершение внешней работы.

Второй закон (начало) термодинамики. Существует несколько формулировок этого закона. Например:

1) В круговом процессе подводимая теплота не может быть полностью превращена в работу.

2) Теплота не может сама собой переходить от тел с низшей температурой к телам с более высокой температурой.

3) 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 опыты 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.

Третий закон (начало) термодинамики гласит, что нельзя достигнуть температуры рабочего тела, равной абсолютному нулю (по современным данным это минус $273,15^\circ\text{C}$) путем отнятия от тела теплоты. Другими словами нельзя создать такую тепловую машину, которая отняла бы все тепло от тела.

Понятие о теплоемкости, энтальпии и энтропии

Теплоемкостью называется количество теплоты, которое требуется для изменения температуры единичного количества вещества на 1 градус.

В соответствии с выражением единичного количества вещества в килограммах, кубических метрах или киломолях существует три вида теплоемкости: массовая, объемная и мольная.

Мы будем использовать только массовую теплоемкость, представляющую собой теплоемкость 1 кг вещества. Массовая теплоемкость обозначается буквой c и измеряется в Дж/(кг·К).

Для газов различают:

- теплоемкость при постоянном давлении (изобарную), обозначают c_p ;
 - теплоемкость при постоянном объеме (изохорную), обозначают c_v ;
 - среднюю теплоемкость для данного интервала температур $c_{\text{ср}}$,
- практически в таблицах дается значение этой теплоемкости для интервала температур $0 - t$ °С.

Изобарная теплоемкость газа больше его изохорной теплоемкости на величину газовой постоянной (уравнение Майера):

$$c_p - c_v = R. \quad (3.5)$$

Отношение изобарной теплоемкости газа к его изохорной теплоемкости называется показателем адиабаты и обозначается буквой k :

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (3.6)$$

Для случая нагрева вещества массой m от температуры t_1 до температуры t_2 справедливо следующее уравнение теплоемкости:

$$Q = m \cdot c \cdot (t_2 - t_1), \text{ Дж.} \quad (3.7)$$

Энтальпия (теплосодержание) представляет собой сумму внутренней энергии рабочего тела и произведения абсолютного давления системы на ее объем:

$$H = U + p \cdot V, \quad (3.8)$$

где H – энтальпия, Дж;

U – внутренняя энергия, Дж;

p – давление, Па;

V – объем, м³.

Единица измерения энтальпии – джоуль, 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.

Энтропия. 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 (1865 г.), оно имеет количественное определение:

$$ds = \frac{dQ}{T}, \quad (3.9)$$

где s – значение энтропии, Дж/К.

Как физическую величину энтропию непосредственно измерить нельзя, однако, это понятие оказалось полезным при описании различных тепловых процессов. В частности, понятие энтропии позволяет воспользоваться в термодинамических исследованиях T , s – координатами, или диаграммы температура – энтропия (T, s -диаграмма), в которых теплота термодинамического процесса изображается площадью фигуры с высотой T и основанием ds .

Рассмотрим другие примеры использования энтропии. Из (3.9) следует:

$$s = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = s_2 - s_1 = \frac{q_2}{T_2} - \frac{q_1}{T_1} \quad (3.10)$$

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 $T \rightarrow 0 \quad \lim s = 0$, то для статического состояния i – го тела формулу (3.10) можно записать в виде:

$$s_i = \frac{q_i}{T_i} \quad (3.11)$$

Например, пусть два тела имеют параметры: $T_1 = 500\text{K}$, $q_1 = 100$ МДж, $T_2 = 300\text{K}$, $q_2 = 50$ МДж. Эти два тела объединяются (смешиваются). До смешения каждое из них обладало энтропией:

$$s_1 = 100/500 = 0,24; \quad s_2 = 50/300 = 0,16.$$

После объединения этих двух тел температура объединенного тела будет находиться в пределах: $T_1 \leq 499\text{K}$, $T_2 \geq 301\text{K}$, а количество теплоты составит: $q = q_1 + q_2 = 100 + 50 = 150$ МДж. Энтропия объединенного тела будет находиться в пределах: $s' = 150/499 = 0,300$; $s'' = 150/301 = 0,498$.

Вывод, после объединения двух тел энтропия объединенного тела гарантированно 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.

Контрольные вопросы:

1. Что изучает техническая термодинамика?
2. Что называется термодинамической системой?
3. Назовите основные параметры состояния рабочего тела.
4. Напишите уравнение состояния идеального газа для 1 кг, произвольной массы газа, 1 кмоль.
5. Чему равно численное значение универсальной газовой постоянной, как выражается через нее газовая постоянная того или иного газа?
6. Сформулируйте первый закон термодинамики.
7. Какие вы знаете формулировки второго закона термодинамики?
8. Что называется теплоемкостью? Дайте определение массовой теплоемкости, напишите его обозначение и размерность.
9. Напишите уравнение Майера и уравнение теплоемкости.
10. Дайте определения внутренней энергии, энтальпии и энтропии.

ЛЕКЦИЯ 4.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Любое изменение термодинамического состояния системы во времени называется термодинамическим процессом. Так, при перемещении поршня в цилиндре объем, а с ним давление и температура находящегося внутри газа будут изменяться, будет совершаться процесс расширения или сжатия газа.

Все термодинамические процессы базируются на трех законах 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.

Основные термодинамические процессы.

Все изложенные ниже термодинамические процессы являются идеализацией реальных тепловых процессов, 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 приемлемую теорию. Принято процессы изображать в виде диаграмм с координатами: давление – удельный объем (p, v -диаграмма) и температура – энтропия (T, s -диаграмма).

Основными термодинамическими процессами являются:

- изохорный, протекающий при постоянном объеме;
- изобарный, протекающий при постоянном давлении;
- изотермический, происходящий при постоянной температуре;
- адиабатный – процесс, при котором отсутствует теплообмен с окружающей средой.

Метод исследования **основных термодинамических процессов**, не зависящий от их особенностей и являющийся общим, состоит в следующем:

- 1) запись уравнения процесса;
- 2) изображение процесса в p, v – и T, s -диаграммах;
- 3) определение взаимосвязи основных параметров состояния в процессе;
- 4) определение изменения внутренней энергии Δu ;
- 5) определение внешней работы, совершаемой в процессе l ;
- 6) определение теплоты, участвующей в процессе q ;
- 7) определение изменения удельной энтропии Δs .

Изохорный процесс. Изохорные процессы обычно связаны с подводом теплоты к газу, заключенному в жесткий (недеформируемый) объем. Изохорные процессы происходят в камерах сгорания двигателей внутреннего сгорания с искровым зажиганием, некоторых газотурбинных установок и т.д.

Уравнение изохорного процесса: $v = \text{const}$, т.е. $dv = 0$.

Диаграммы изохорного процесса изображены на рис. 4.1.

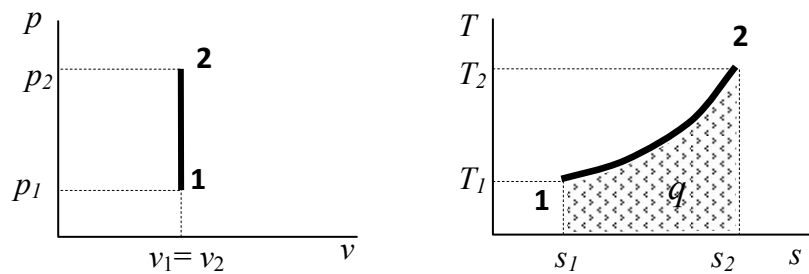


Рис. 4.1. p, v – и T, s – диаграммы изохорного процесса.

Поскольку объем тела постоянен, то вертикальная линия на первой диаграмме объяснима.

Для изохорного процесса изменение давлений прямо пропорционально изменению абсолютных температур (закон Шарля):

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (4.1)$$

Изменение внутренней энергии для всех основных термодинамических процессов определяется как:

$$\Delta u = c_v \cdot dT = c_v \cdot (T_2 - T_1) \quad (4.2)$$

Для изохорного процесса внешняя работа $l = 0$, так как изменения объема не происходит, т.е. $dv = 0$.

В таком случае уравнение (3.4) первого закона термодинамики для изохорного процесса имеет вид:

$$q = \Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1) \quad (4.3)$$

Уравнение (4.3) показывает, что в изохорном процессе вся подводимая к газу теплота идет на изменение (увеличение) его внутренней энергии, т.е. на повышение температуры; внешняя работа не совершается.

При подводе тепла к рабочему телу происходит изменение его температуры: $dq = c_v \cdot dT$.

С другой стороны из выражения (3.9) следует, что изменение удельной энтропии Δs определяется как:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_{q_1}^{q_2} \frac{dq}{T} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_v \cdot dT}{T} = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v (\ln T_2 - \ln T_1) \quad (4.4)$$

Эта зависимость изображена на T, s –диаграмме (рис. 4.1) в виде логарифмической кривой, которая называется изохорой. Площадь, заключенная под изохорой на T, s –диаграмме отражает величину теплоты, участвующей в процессе q .

Изобарный процесс происходит при постоянном давлении ($p = \text{const}$). К примеру, это процессы, протекающие в камерах сгорания газотурбинных двигателей и в теплообменниках, сгорание топлива в дизельных двигателях с самовоспламенением.

Площадь, заключенная под изобарой на p, v – диаграмме (рис. 4.2) отражает величину работы l , совершаемой в рассматриваемом процессе.

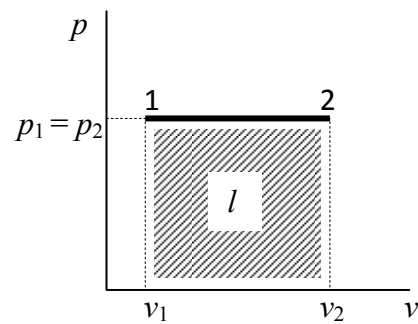


Рис. 4.2. p, v – диаграмма изобарного процесса

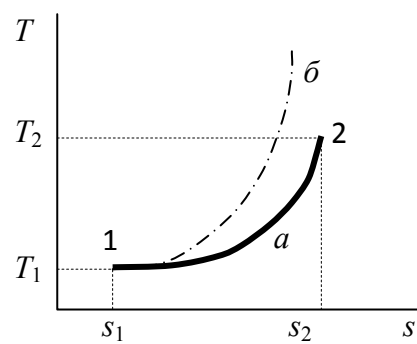


Рис. 4.3. T, s –диаграмма изобарного процесса:
 a – изобара, $б$ – изохора.

Поскольку значение теплоемкости газа при постоянном давлении больше его теплоемкости при постоянном объеме ($c_p > c_v$), то изобара менее крутая (рис. 4.3).

Взаимосвязь параметров состояния газа для изобарного процесса выражается законом Гей-Люссака:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (4.5)$$

Работа, совершаемая в изобарном процессе, определяется по формуле:

$$l = p (v_2 - v_1) = R (T_2 - T_1). \quad (4.6)$$

Теплота, участвующая в процессе согласно уравнениям (3.4), (4.2) и уравнению Майера:

$$q = \Delta u + l = c_v (T_2 - T_1) + R (T_2 - T_1) = c_p (T_2 - T_1) \quad (4.7)$$

Уравнение для определения изменения энтропии Δs аналогично уравнению (4.4), в котором изохорную теплоемкость рабочего тела

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

$$\Delta s = \int_{q_1}^{q_2} \frac{dq}{T} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = c_p (\ln T_2 - \ln T_1) \quad (4.8)$$

Изотермический процесс. В энергетических установках, рабочее тело которых по свойствам близко к идеальному газу, изотермические процессы практически отсутствуют. Однако даже приближенная их реализация позволяет значительно повысить эффективность многих энергетических установок, поэтому расчет процессов при $T = \text{const}$ представляет интерес как предельно достижимый.

Поскольку температура при этом процессе постоянная, уравнение изотермического процесса имеет вид:

$$p \cdot v = \text{const} \quad (4.9)$$

Диаграммы изотермического процесса изображены на рис. 4.4.

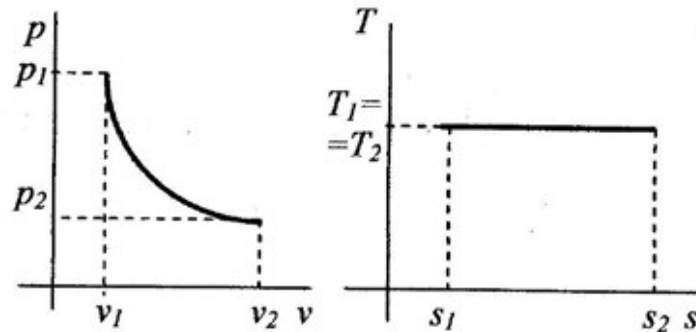


Рис. 4.4. p, v – и T, s –диаграммы изотермического процесса.

Соотношение параметров изотермического процесса определяется законом Бойля-Мариотта:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad (4.10)$$

Поскольку температура при этом процессе постоянная, следует:

$$p \cdot v = R \cdot T. \quad (4.11)$$

Отсюда уравнение кривой первой диаграммы (гиперболы) на рис.4.4 :

$$p = \frac{R \cdot T}{v}. \quad (4.12)$$

В изотермическом процессе изменения внутренней энергии не происходит, т.е.:

$$\Delta u = c_v (T_2 - T_1) = 0, \text{ так как } T = \text{const}.$$

Работа, совершаемая в изотермическом процессе:

$$l = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2}. \quad (4.13)$$

Теплота, участвующая в изотермическом процессе согласно первому закону термодинамики:

$$q = l = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (4.14)$$

Уравнение для определения Δs в изотермическом процессе:

$$\Delta s = R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (4.15)$$

Существует два варианта реализации изотермического процесса, имеющие практическое значение. 1) Изотермическое сжатие. От рабочего тела (газа) отводится теплота в количестве равном работе сжатия. 2) Изотермическое расширение. Изотермическое расширение связано с подводом теплоты, которая совершает работу, равную подведенной энергии.

Адиабатный процесс – это процесс, совершающийся без теплообмена между рабочим телом и окружающей его средой ($q = 0$ и $dq = 0$). На практике «абсолютно адиабатных» процессов не наблюдается, но процессы, достаточно близкие к адиабатным, распространены широко: газы, обладающие свойствами идеальных, сжимаются в поршневых двигателях и компрессорах, расширяются в турбинах почти адиабатно.

Уравнение адиабатного процесса имеет вид:

$$p \cdot v^k = \text{const} \quad (4.16)$$

где k – показатель адиабаты, $k = c_p / c_v$.

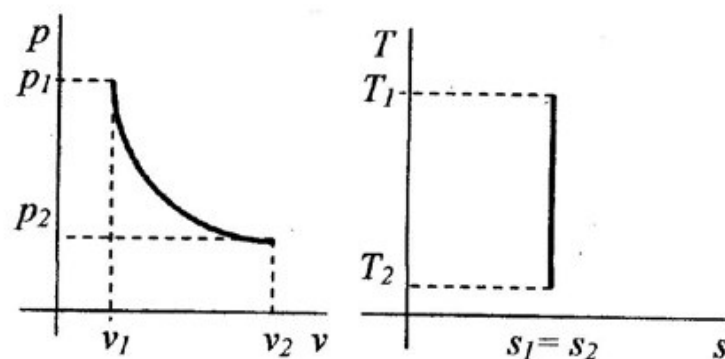


Рис. 4.5. p, v – и T, s –диаграммы адиабатного процесса.

Уравнения взаимосвязи между параметрами состояния в адиабатном процессе:

1) между давлением и удельным объемом

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k \quad (4.17)$$

2) между температурой и удельным объемом

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \quad (4.18)$$

3) между температурой и давлением

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (4.19)$$

Для адиабатного процесса, из первого закона термодинамики следует, что: $q = \Delta u + l = 0$, т.е. работа совершается за счет изменения внутренней энергии рабочего тела:

$$l = -\Delta u = -c_v(T_2 - T_1) = c_v(T_1 - T_2) \quad (4.20)$$

С учетом взаимосвязей величин c_v, R, k можно записать:

$$l = \frac{R}{k-1}(T_1 - T_2) = \frac{1}{k-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2) \quad (4.21)$$

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 энтропии следует:

$$\Delta s = \int \frac{dQ}{T} + C = C = const, \quad (4.22)$$

что и изображено на правой диаграмме рис. 4.5.

Все вышеупомянутые процессы могут быть обобщены в виде так называемых политропных процессов, однако их изучение выходит за рамки дисциплины «Общая энергетика».

Контрольные вопросы:

1. Дать определения основных термодинамических процессов.
2. Какой термодинамический процесс называют адиабатным?
3. Написать уравнения основных термодинамических процессов.
4. Как графически изображаются на p, v -диаграмме изохора, изобара, изотерма и адиабата?
5. Напишите формулы соотношений между параметрами p, v и T для каждого из основных термодинамических процессов.
6. По какой формуле рассчитывается изменение внутренней энергии в термодинамических процессах?
7. Напишите выражения для вычисления подведенной теплоты, работы расширения газа в различных термодинамических процессах.
8. Объяснить увеличение температуры при расширении газа в изобарном процессе.
9. Почему в адиабатном процессе расширения тела температура убывает, а при сжатии увеличивается?
10. По каким уравнениям вычисляется изменение энтропии в изохорном, изобарном, изотермном и адиабатном процессах?

Лекция 5.

РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ. ВОДЯНОЙ ПАР.

Во всех областях промышленного производства получили большое применение реальные газы в виде пара различных веществ: воды, аммиака, углекислоты и др. Из них наибольшее распространение в энергетических установках получил водяной пар.

Водяной пар широко используется как рабочее тело в паровых турбинах, паровых машинах, в атомных установках, а также как теплоноситель в различных теплообменниках.

Из курса физики известно, что все вещества в зависимости от температуры и давления могут находиться в твердом, жидком или газообразном состоянии.

Процесс парообразования. Основные понятия и определения.

Процесс превращения вещества из жидкого состояния в газообразное называется **парообразованием**.

Испарением называется парообразование, которое происходит всегда при любой температуре со свободной поверхности жидкости или твердого тела. Интенсивность испарения зависит от свойств жидкости и возрастает с увеличением ее температуры.

Процесс **кипения** заключается в том, что если к жидкости подвести теплоту, то при некоторой температуре, зависящей от физических свойств рабочего тела и давления, наступает процесс парообразования как на свободной поверхности, так и внутри ее, т.е. **кипение** — это парообразование, происходящее по всему объему жидкости при определенной температуре, зависящей от давления.

Переход вещества из газообразного состояния в жидкое или твердое называется **конденсацией**. Процесс конденсации, так же как и процесс парообразования протекает при постоянной температуре, если при этом давление не меняется. Жидкость, полученную при конденсации пара, называют **конденсатом**.

p, v – диаграмма водяного пара. Рассмотрим процесс получения пара в закрытой емкости. Будем изображать процесс парообразования, т.е. процесс превращения вещества из жидкого состояния в газообразное в p, v – диаграмме (рисунок 5.1).

Начальное состояние воды, находящейся под давлением p и имеющей температуру 0°C , изобразится на диаграмме точкой a_0 . При подводе теплоты к воде ее температура постепенно повышается до тех пор, пока не достигнет температуры кипения t_s , соответствующей данному давлению. При этом удельный объем жидкости сначала уменьшается, достигает минимального значения при $t = 4^\circ\text{C}$, а затем начинает возрастать. Состояние жидкости, доведенной до температуры кипения, изображается на диаграмме точкой a' .

При дальнейшем подводе теплоты начинается кипение воды с сильным увеличением объема. В закрытой емкости теперь находится двухфазная среда – смесь воды и пара, называемая влажным насыщенным паром. По мере подвода теплоты количество жидкой фазы уменьшается, а паровой – растет. Температура смеси

при этом остается неизменной и равной t_s , так как вся теплота расходуется на испарение жидкой фазы. Следовательно, процесс парообразования на этой стадии является изобарно – изотермическим. Наконец, в некоторый момент времени последняя капля воды превращается в пар, и цилиндр оказывается заполненным только паром, который называется сухим насыщенным. Состояние его изображается точкой a'' .

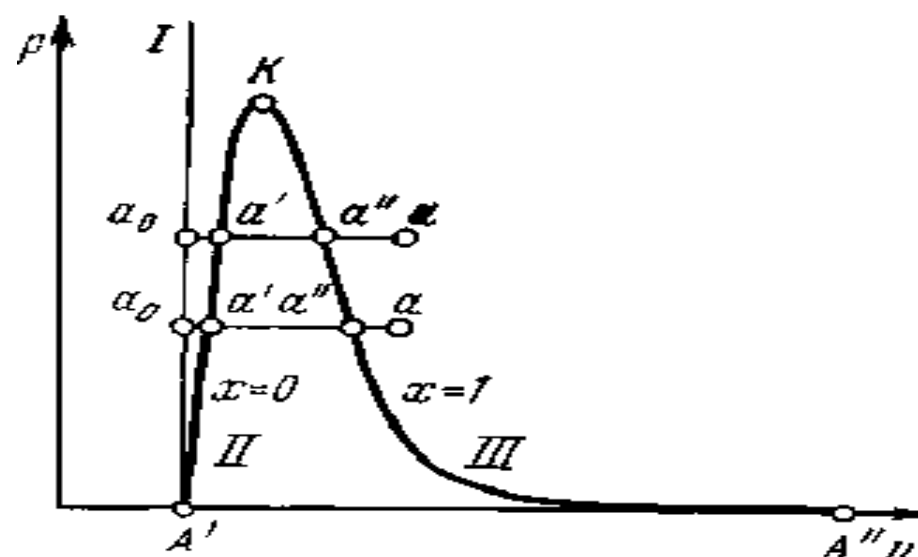


Рис. 5.1. p, v – диаграмма водяного пара.

Если парообразование жидкости происходит в закрытом сосуде, то вылетающие из жидкости молекулы заполняют свободное пространство над ней, при этом часть молекул, движущихся в паровом пространстве над поверхностью, возвращается обратно в жидкость. В некоторый момент между парообразованием и обратным переходом молекул из пара в жидкость может наступить равенство, при котором число молекул, вылетающих из жидкости, равно числу молекул, возвращающихся обратно в жидкость. Наступает термодинамическое равновесие, и пар в этом состоянии принимает максимальную плотность при данной температуре и называется **насыщенным**.

С изменением температуры жидкости равновесие нарушается, вызывая соответствующее изменение плотности и давления насыщенного пара.

Насыщенный пар, в котором отсутствуют взвешенные высокодисперсные (мельчайшие) частицы жидкой фазы, называется **сухим насыщенным паром**. Состояние сухого насыщенного пара определяется только одним параметром – давлением, или температурой, или удельным объемом.

Насыщенный пар, в котором содержатся взвешенные высокодисперсные частицы жидкой фазы, равномерно распределенные по всей массе пара, называется **влажным насыщенным паром**.

Отношение массы сухого насыщенного пара к суммарной массе влажного насыщенного пара называется **степенью сухости** или

паросодержанием и обозначается x . Для кипящей жидкости при температуре насыщения $x=0$, а для сухого насыщенного пара $x=1$, следовательно степень сухости может меняться только в пределах от 0 до 1. Состояние влажного пара определяется двумя величинами: температурой или давлением и каким либо другим параметром, например степенью сухости пара.

Если сухому насыщенному пару сообщить некоторое количество теплоты при постоянном давлении, то температура его будет возрастать. Пар, получаемый в этом процессе, называется **перегретым**. Точка a изображает состояние перегретого пара и в зависимости от температуры пара может лежать на разных расстояниях от точки a'' . Таким образом, перегретым называется пар, температура которого превышает температуру насыщенного пара того же давления.

Критической точкой в p, v – диаграмме (рис. 5.1), называется точка K , в которой удельные объемы жидкости и пара сравниваются. Так как все различия между газом и жидкостью связаны с разницей в плотности (или удельном объеме), то в критической точке свойства жидкости и газа становятся одинаковыми. Для воды параметры критической точки K составляют:

$$p_{кр} = 221,29 \cdot 10^5 \text{ Па}, t_{кр} = 374,15^\circ\text{C}, v_{кр} = 0,00326 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Под тройной точкой понимается то единственное состояние, в котором могут одновременно находиться в равновесии пар, вода и лед (точка A' на рисунке 5.1). Параметры тройной точки для воды: $p_0 = 611 \text{ Па}$, $t_0 = 0,01^\circ\text{C}$, $v_0 = 0,001 \text{ м}^3/\text{кг}$.

В p, v – диаграмме все точки горизонталей между кривыми II и III соответствуют состояниям влажного насыщенного пара, точки кривой II определяют состояния кипящей воды, точки кривой III – состояния сухого насыщенного пара. Влево от кривой II до нулевой изотермы лежит область не-кипящей однофазной жидкости, вправо от кривой III – область перегретого пара. Таким образом, кривые II и III определяют область насыщенного пара, отделяя ее от области воды и перегретого пара, и поэтому называются пограничными.

Перегретый пар по своим физическим свойствам приближается к идеальному газу и тем ближе, чем выше степень перегрева, соответственно он подчиняется уравнению Клапейрона:

$$p \cdot v = R \cdot T, \quad (5.1)$$

где p – абсолютное давление, Па; v – удельный объем, $\text{м}^3/\text{кг}$; R – газовая постоянная, Дж/(кг·К); T – абсолютная температура, К.

В действительных процессах при высоких давлениях водяной пар следует рассматривать как реальный газ. Молекулы реального газа в отличие от идеального имеют конечный объем и взаимодействуют между собой. Из уравнений состояний реального газа наиболее простым является уравнение Ван дер Ваальса, предложенное им в 1873 г.:

$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) \cdot (v - b) = R \cdot T, \quad (5.2)$$

где a – коэффициент, зависящий от сил сцепления;

b – величина, учитывающая собственный объем молекул;

v – удельный объем.

Использование уравнения состояния реальных газов в практических расчетах связано с большими трудностями. Поэтому для определения

параметров начального и конечного состояния водяного пара в термодинамических процессах используют таблицы и энтальпийные диаграммы водяного пара.

Методы исследования процессов водяного пара.

В задачах, связанных с термодинамическими процессами в области насыщенных и перегретых паров обычно определяются:

- начальные и конечные параметры пара;
- изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии;
- работа и количество теплоты, участвующей в процессе.

При использовании таблиц для расчетов процессов водяного пара все необходимые исходные данные, а также параметры пара в конечном состоянии берутся из таблиц теплофизических свойств воды и водяного пара с учетом условий протекания процесса ($p = \text{const}$, $V = \text{const}$, $S = \text{const}$).

В этих таблицах термодинамические величины с одним штрихом относятся к воде, нагретой до температуры кипения, а величины с двумя штрихами – к сухому насыщенному пару.

За нулевое состояние, от которого отсчитываются величины h' , h'' , s' , s'' принято состояние воды в тройной точке.

Так как состояние кипящей воды и сухого насыщенного пара определяется только одним параметром, то по известному давлению или температуре из таблиц воды и водяного пара берутся значения v' , v'' , h' , h'' , s' , s'' , r .

Параметры влажного пара в этом случае вычисляются на основании табличных данных по приведенным ниже формулам.

$$V_1 = V' + (V'' - V') \cdot x, \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (5.3)$$

$$h_1 = h' + (h'' - h') \cdot x, \text{ кДж/кг} \quad (5.4)$$

$$S_1 = S' + (S'' - S') \cdot x, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)} \quad (5.5)$$

Метод расчета процессов по таблицам воды и водяного пара является наиболее точным и применяется во всех случаях, когда нужно получить точные величины. Однако при этом приходится затрачивать дополнительное время на нахождение нужных величин по таблицам, а также на вычислительные операции.

Более простым и наглядным, но менее точным является графический метод расчета процессов по энтальпийным диаграммам водяного пара, на которых изображаются состояния и процессы водяного пара. Этот метод позволяет следить за изменением агрегатного состояния пара в любом процессе, не прибегая к формулам. Наиболее распространенными являются Ts -диаграмма водяного пара (рис. 5.2) и hs -диаграмма (рис. 5.3).

Ts -диаграмма водяного пара.

Изменение энтропии воды в изобарном процессе графически на Ts -диаграмме представляется величиной S' (в процессе AB) (рис. 5.2). Площадь под кривой процесса AB будет в некотором масштабе определять с небольшим допущением энтальпию кипящей воды i' .

После нагрева воды до температуры кипения начинается процесс парообразования при постоянном давлении и неизменной температуре T_n (линия BC).

Количество теплоты, подведенное при парообразовании и равное r , графически определяется площадью под прямой BC :

$$(S'' - S') \cdot T_n = r. \quad (5.6)$$

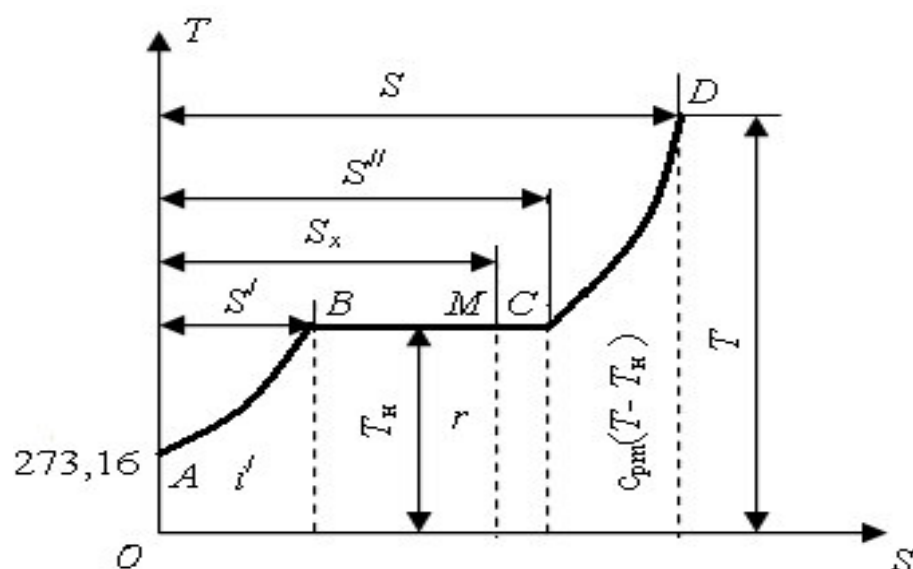


Рис. 5.2. Ts -диаграмма водяного пара

Точка C изображает завершение процесса парообразования (состояние сухого насыщенного пара). Если в конце испарения получается влажный пар со степенью сухости x , например точка M , то количество подведенной теплоты будет определяться меньшей площадью. Изменение энтропии в процессе перегрева пара графически изображается кривой CD . Площадь под кривой CD изображает теплоту перегрева пара (рис. 5.2).

В технике Ts -диаграмма широко используется при исследовании термодинамических процессов и циклов, так как позволяет видеть изменение температуры рабочего тела и находить количество теплоты, участвующее в процессе. Некоторым неудобством данной диаграммы является то, что при определении количества теплоты приходится измерять соответствующие площади фигур неправильной формы, что усложняет определение необходимых величин.

hs -диаграмма водяного пара.

Обычно всю hs -диаграмму для водяного пара (рис. 5.3) не выполняют, а строят только ее верхнюю часть, наиболее употребительную в практике расчетов. Это дает возможность изображать ее в более крупном масштабе. Для любой точки на этой диаграмме можно найти p, v, t, h, s, x .

Большое достоинство hs -диаграммы состоит в том, что количества теплоты (при $p = \text{const}$) изображаются отрезками, а не площадями, как в T, s – диаграмме, поэтому h, s – диаграмма исключительно широко используется при проведении тепловых расчетов.

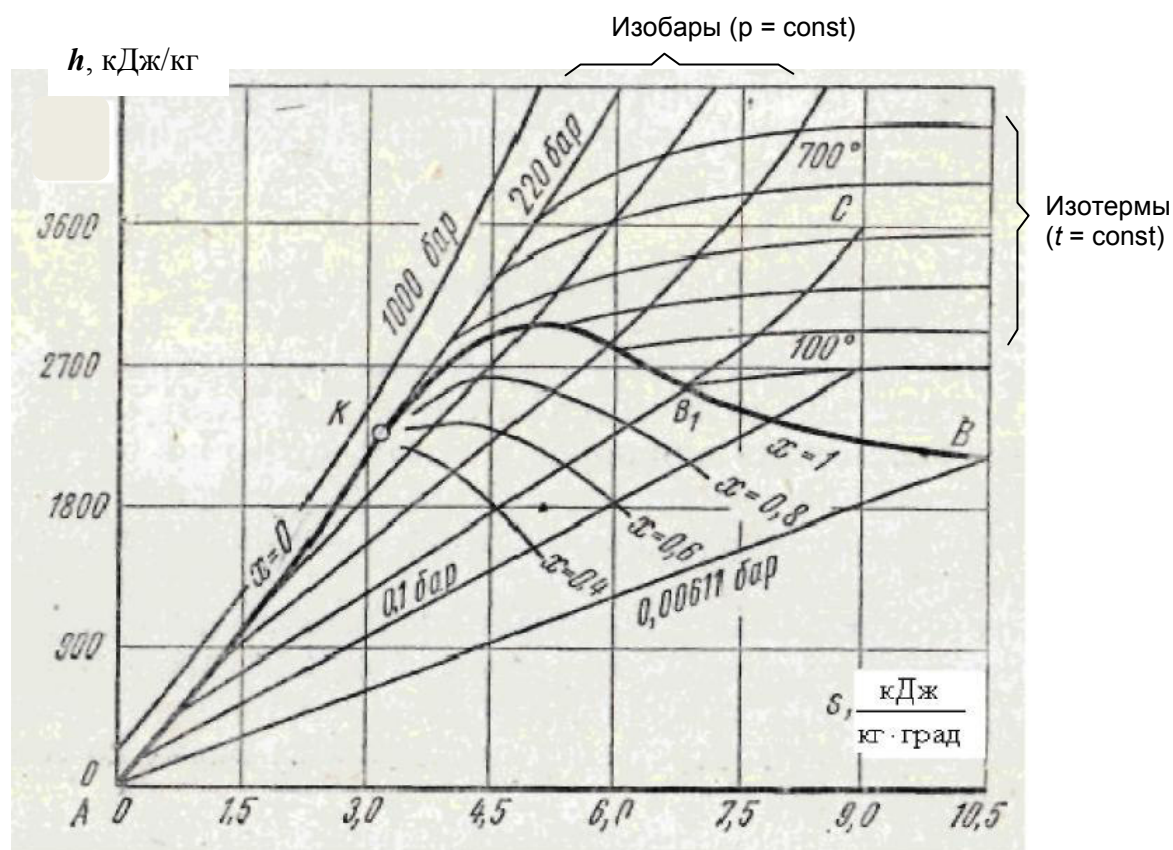


Рис. 5.3. hs -диаграмма водяного пара.

Расчет процессов водяного пара.

Первая точка (начало процессов) задается давлением p_1 и степенью сухости x_1 . Конец изобарного, изохорного, адиабатного процессов (рис. 5.4, 5.5 и 5.6) ограничивается температурой t_2 .

1. Определение начальных и конечных параметров пара в процессах по таблицам водяного пара. Данные для точки 1н выбираются из таблицы «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (аргумент — давление)», а для точек 2_p , 2_v , 2_s выбираются из таблицы «Термодинамические свойства воды и перегретого пара» и заносятся в таблицу 5.1.

2. Определение начальных и конечных параметров пара в процессах по hs -диаграмме

Общий метод расчета по hs -диаграмме состоит в следующем. Наносится начальное состояние пара по известным параметрам. Проводится линия процесса, определяются параметры пара в конечной точке и заносятся в таблицу 5.2. Далее вычисляется изменение внутренней энергии, определяются количества теплоты и работы в заданном процессе.

Изобарный процесс (рис. 5.4). Задано состояние пара 1 (p_1 и x_1). Конечное состояние его характеризуется температурой t_2 . Из точки 1 идем по изобаре P_1 до точки 2 ее пересечения с изотермой t_2 . В этом процессе при сообщении тепла влажному пару уменьшается его влажность, и он переходит

в сухой насыщенный, причем температура его остается постоянной и равной $t_1=t_H$. При дальнейшем подводе тепла пар перегревается. При отводе тепла процесс идет в обратном направлении.

Таблица 5.1.

К расчету процессов водяного пара.			
Точка 1н:	p_1 , бар	x	t_1 , °C
	v' , м³/кг	i' , кДж/кг	s' , кДж/(кг·K)
$x'=0$:			
	v'' , м³/кг	i'' , кДж/кг	s'' , кДж/(кг·K)
$x''=1$:			
$v_1 = v' + (v'' - v') \cdot x$, м³/кг; $h_1 = h' + (h'' - h') \cdot x$, кДж/кг; $s_1 = s' + (s'' - s') \cdot x$, кДж/(кг·K)			
Точка 2p	$p_1 = p_2$, бар		t_2 , °C
	v' , м³/кг	h' , кДж/кг	s' , кДж/(кг·K)
$p' < p_1$			
	v'' , м³/кг	h'' , кДж/кг	s'' , кДж/(кг·K)
$p'' > p_1$			
$\alpha = (p_1 - p') / (p'' - p')$			
$v_{2p} = v' + (v'' - v') \cdot \alpha$, м³/кг; $h_{2p} = h' + (h'' - h') \cdot \alpha$, кДж/кг; $s_{2p} = s' + (s'' - s') \cdot \alpha$, кДж/(кг·K)			
Точка 2v	$v_1 = v_2$, м³/кг		t_2 , °C
$v' > v_1$			
p' , бар	v' , м³/кг	h' , кДж/кг	s' , кДж/(кг·K)
$v'' < v_1$			
p'' , бар	v'' , м³/кг	h'' , кДж/кг	s'' , кДж/(кг·K)
$\alpha = (v_1 - v') / (v'' - v')$			
$p_{2v} = p' + (p'' - p') \cdot \alpha$, бар; $h_{2v} = h' + (h'' - h') \cdot \alpha$, кДж/кг; $s_{2v} = s' + (s'' - s') \cdot \alpha$, кДж/(кг·K)			
Точка 2s	$s_1 = s_2$, кДж/(кг·K)		t_2 , °C
$s' > s_1$:			
p' , бар	v' , м³/кг	h' , кДж/кг	s' , кДж/(кг·K)
$s'' < s_1$			
p'' , бар	v'' , м³/кг	h'' , кДж/кг	s'' , кДж/(кг·K)
$\alpha = (s_1 - s') / (s'' - s')$			
$p_{2s} = p' + (p'' - p') \cdot \alpha$, бар; $h_{2s} = h' + (h'' - h') \cdot \alpha$, кДж/кг·K; $v_{2s} = v' + (v'' - v') \cdot \alpha$, м³/кг			

Примечание: Поскольку в области влажного пара невозможно протабулировать все величины, характеризующие его состояние, их значения находят методом интерполяции по значениям в состоянии насыщения, т.е. при $x'=0$ и $x''=1$, α – коэффициент интерполяции.

Таблица 5.2

Параметры водяного пара

Точка 1н:	p_1 , бар	x	v_1 , м ³ /кг	h_1 , кДж/кг	s_1 , кДж/(кг·К)
Точка 2 _p :	$p_1=p_2$, бар	t_2 , °С	v_{2p} , м ³ /кг	h_{2p} , кДж/кг	s_{2p} , кДж/(кг·К)
Точка 2 _v :	$v_1=v_2$, м ³ /кг	t_2 , °С	p_{2v} , бар	h_{2v} , кДж/кг	s_{2v} , кДж/(кг·К)
Точка 2 _s :	$s_1=s_2$, кДж/(кг·К)	t_2 , °С	P_{2s} , бар	h_{2s} , кДж/кг	s_{2s} , м ³ /кг

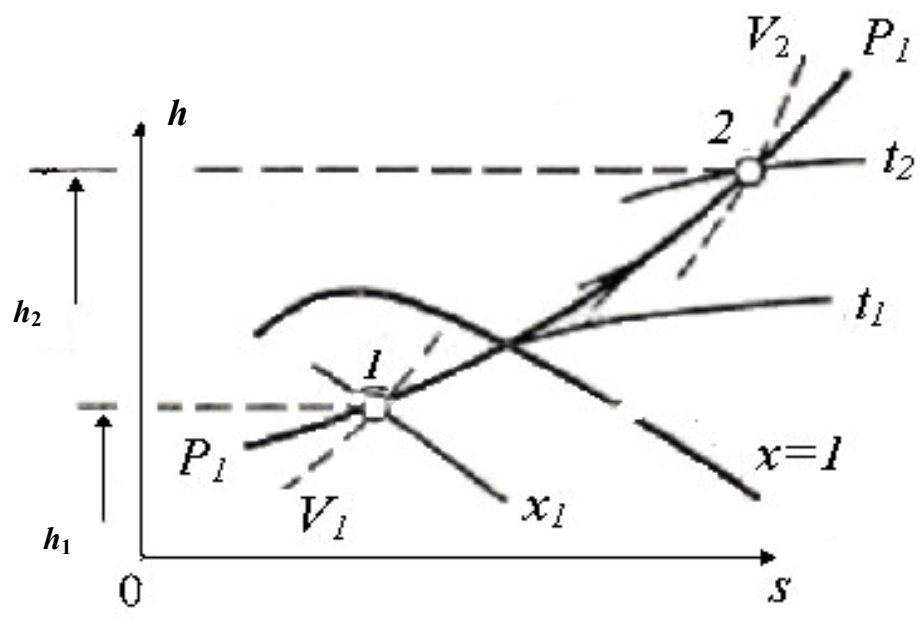


Рис. 5.4. Изобарный процесс водяного пара.

Изохорный процесс (рис. 5.5). При заданном состоянии пара (p_1 и x_1) соответствующем точке 1, требуется изохорным процессом довести пар до температуры t_2 . Для этого из точки 1 идем по изохоре V_1 до ее пересечения с изотермой t_2 в точке 2. В изохорном процессе при сообщении тепла влажному пару повышаются его давление и температура. При этом влажность пара уменьшается, и он превращается в сухой насыщенный, а затем в перегретый. При отводе тепла от перегретого пара процесс идет в обратном направлении.

Адиабатный процесс (рис. 5.6). Задано состояние пара (p_1 и x_1) соответствующем точке 1. Адиабатный процесс протекает при постоянном значении энтропии, поэтому он изображается вертикалью, из точки 1 до пересечения с изотермой t_2 в точке 2.

При адиабатном расширении давление и температура пара понижаются. Перегретый пар при этом переходит обычно в сухой насыщенный и затем во влажный. При сжатии влажного пара процесс идет в обратном направлении.

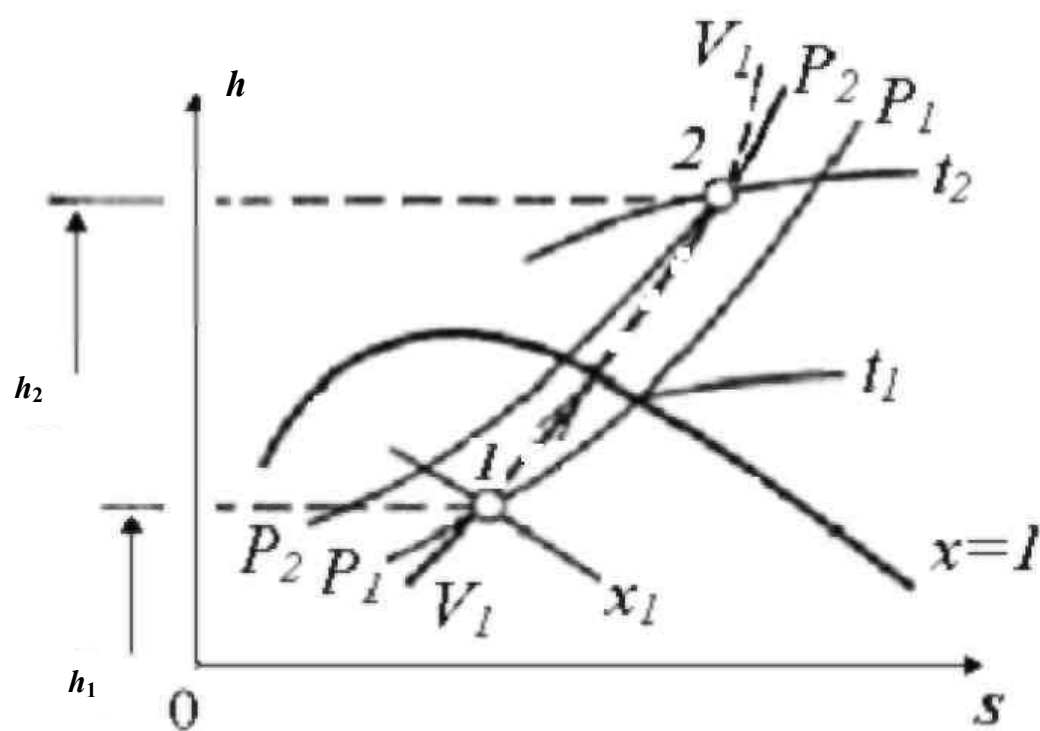


Рис. 5.5. Изохорный процесс водяного пара.

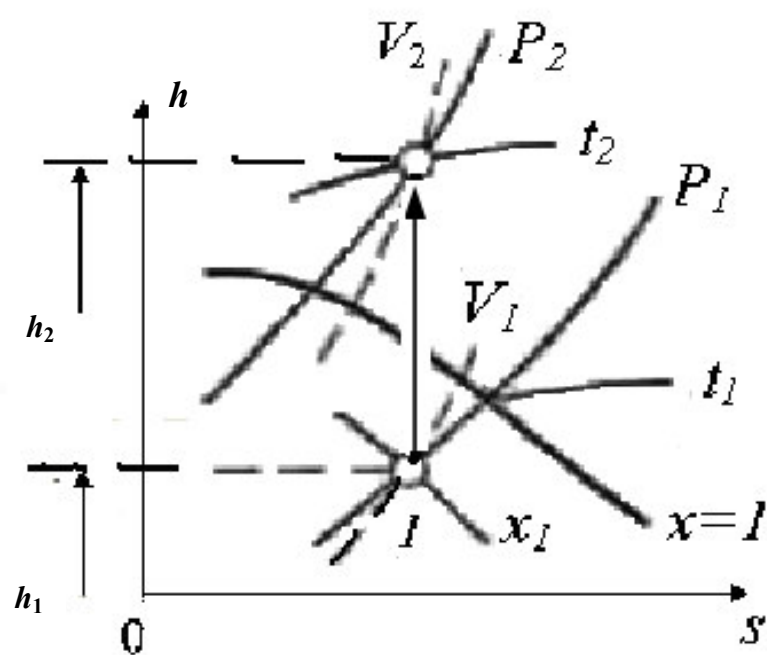


Рис. 5.6. Адиабатный процесс водяного пара.

3. Определение изменение внутренней энергии, теплоты и работы водяного пара

Изменение удельной внутренней энергии вычисляется по общему уравнению для всех процессов (все величины должны быть выражены в системе СИ):

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (h_2 - p_2 v_2) - (h_1 - p_1 v_1) \quad (5.7)$$

Определяется удельное количество теплоты:

в изохорном процессе

$$q_v = u_2 - u_1 = \Delta u_v \quad (5.8)$$

в изобарном процессе:

$$q_p = h_2 - h_1 \quad (5.9)$$

в адиабатном процессе $q_s = 0$

Вычисляется удельная внешняя работа по общему уравнению для всех процессов:

$$l = q - \Delta u \quad (5.10)$$

Результаты расчета по обоим методам сводятся в таблицу 5.3.

Таблица 5.3

Результаты расчетов процессов водяного пара

Процессы	Δu , кДж/кг		q , кДж/кг		h , кДж/кг	
	табл.	диагр.	табл.	диагр.	табл.	диагр.
Изобарный						
Изохорный						
Адиабатный						

Контрольные вопросы:

1. Чем реальные газы отличаются от идеальных?
2. Что называется кипением, испарением, конденсацией?
3. Изобразите и объясните p, v -диаграмму водяного пара.
4. Какие точки располагаются на пограничных кривых жидкости и пара?
5. Что такое критическая точка, чему равны её параметры для водяного пара?
6. Какой пар называется влажным насыщенным, сухим насыщенным, перегретым?
7. Что такое степень сухости?
8. Изобразите и объясните T, s -диаграмму водяного пара.
9. Что такое теплота жидкости, теплота парообразования?
10. Объясните h, s -диаграмму водяного пара.
11. Напишите уравнение Ван-дер-Ваальса и объясните физический смысл входящих в неё констант.

Лекция 6.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕПЛООБМЕНА. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ.

Согласно второму закону термодинамики самопроизвольный процесс переноса теплоты в пространстве возникает под действием разности температур и направлен в сторону уменьшения температуры. Закономерности переноса теплоты и количественные характеристики этого процесса являются предметом исследования теории теплообмена.

Основные понятия и определения.

Теплообмен – это самопроизвольный необратимый процесс переноса теплоты в пространстве с неоднородным распределением температуры. Перенос теплоты в пространстве осуществляется тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением. Каждый из них имеет свой механизм переноса и свои законы для математического описания процесса:

Теплопроводность – это молекулярный перенос теплоты в сплошной среде, обусловленный наличием градиента температуры;

Конвекция представляет собой перенос теплоты в среде с неоднородным распределением температуры, осуществляемый макроскопическими объемами среды при их перемещении;

Теплообмен излучением – это теплообмен, обусловленный превращением внутренней энергии одного вещества (излучателя) в энергию излучения, переносом излучения в пространстве и его поглощением другим веществом.

Важнейшими количественными характеристиками переноса теплоты являются тепловой поток и плотность теплового потока.

Количество теплоты, передаваемое в единицу времени через произвольную поверхность F , в теории теплообмена принято называть мощностью теплового потока, или просто тепловым потоком, и обозначается буквой Q . Единица измерения теплового потока Дж/с, т.е. Вт.

Интенсивность переноса теплоты характеризуется плотностью теплового потока, т.е. количеством теплоты, передаваемой в единицу времени через единичную площадь поверхности. Эта величина измеряется в Вт/м² и обычно обозначается q :

$$q = Q/F. \quad (6.1)$$

Теплопроводность. Различают стационарную и нестационарную теплопроводность. При стационарной теплопроводности в различных точках тела температура может быть одинаковой или разной, но она не изменяется во времени. При нестационарной теплопроводности температура точек тела изменяется во времени.

Если соединить все точки тела с одинаковой температурой, получим изотермические поверхности тела.

Так как в одной и той же точке пространства одновременно не может быть двух различных температур, то изотермические поверхности друг с другом не пересекаются, все они, или замыкаются на себя, или кончаются на границах тела. Следовательно, изменение состояние тела и температуры в

теле наблюдается лишь в направлениях, пересекающих изотермические поверхности (например, направление x , рисунок 6.1).

При этом наиболее резкое изменение температуры получается в направлении нормали n к изотермической поверхности.

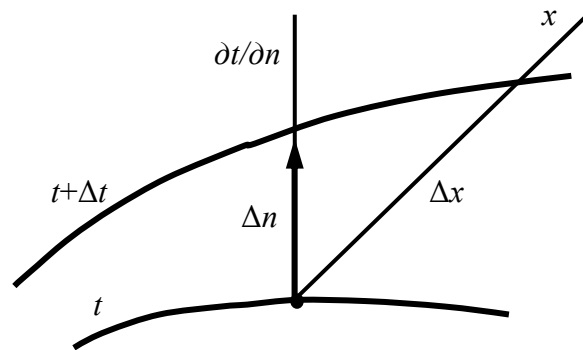


Рис. 6.1. К определению температурного градиента.

Предел отношения изменения температуры Δt к расстоянию между изотермами по нормали Δn называется **градиентом температуры** и обозначается $grad\ t$:

$$grad\ t = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n}, \text{ К/м.} \quad (6.2)$$

Температурный градиент является вектором, направленным по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры, его размерность К/м.

Перенос теплоты теплопроводностью в твердом теле и в неподвижной жидкости (газе) описывается **законом Фурье**.

Закон Фурье: Вектор плотности теплового потока пропорционален вектору градиента температуры и направлен в противоположную сторону:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot grad\ t, \quad (6.3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, характеризующий способность тел проводить внутри себя теплоту, Вт/(м·К).

Вектор плотности теплового потока \vec{q} направлен по нормали к изотермической поверхности в сторону понижения температур. Таким образом, векторы q и $grad\ t$ лежат на одной прямой, но направлены в разные стороны. Этим и объясняется знак "минус" в правой части закона Фурье.

Расчетные уравнения теплопроводности через плоскую стенку.

Рассмотрим однородную стенку толщиной δ (рис. 6.2), коэффициент теплопроводности которой постоянен и равен λ . На наружных поверхностях стенки поддерживаются постоянные температуры t_1 и t_2 . Температура изменяется только в направлении оси x . В этом случае температурное поле одномерно, изотермические поверхности плоские и располагаются перпендикулярно оси x .

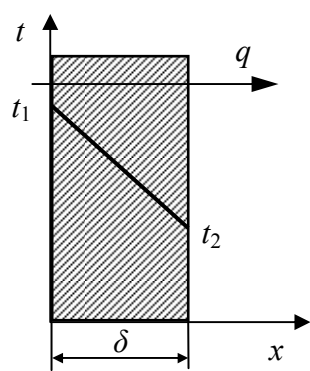


Рис. 6.2. Теплопроводность однородной плоской стенки.

Согласно закону Фурье, плотность теплового потока прямо пропорционально коэффициенту теплопроводности λ и разности температур наружных поверхностей Δt и обратно пропорционально толщине стены δ :

$$q = \lambda \frac{\Delta t}{\delta} = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta} = \frac{t_1 - t_2}{\delta / \lambda}. \quad (6.4)$$

Это уравнение является расчетной формулой теплопроводности однослойной плоской стенки, которая связывает между собой четыре величины: q , λ , δ и Δt . Зная из них любые три, можно найти четвертую.

Отношение λ / δ называется тепловой проводимостью стенки [Вт/(м²·К)], а обратная величина δ / λ – ее термическим сопротивлением [м²·К/Вт].

Многослойная стенка.

Стенки, состоящие из нескольких однородных слоев, называются многослойными. Именно такими являются, например, стены жилых домов, в которых на основном кирпичном слое с одной стороны имеется внутренняя штукатурка, с другой – внешняя облицовка. Обмуровка печей, котлов и других тепловых устройств также обычно состоят из нескольких слоев.

Пусть стенка состоит из трех разнородных, но плотно прилегающих друг к другу слоев (рис. 6.3).

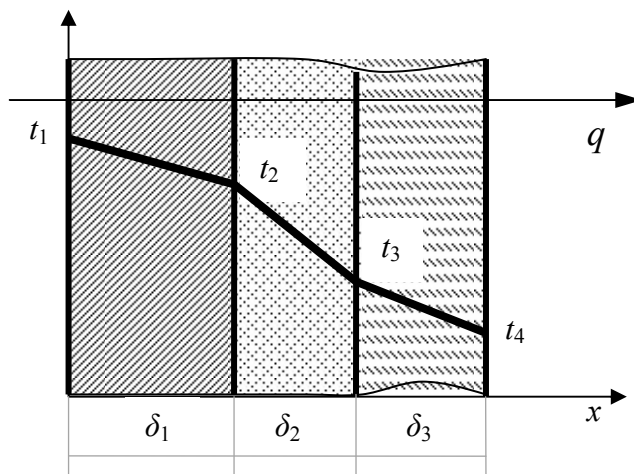


Рис. 6.3. Теплопроводность многослойной плоской стенки

Толщина первого слоя равна δ_1 , второго – δ_2 и третьего – δ_3 . Соответственно коэффициенты теплопроводности слоев равны $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$. Кроме этого, известны температуры наружных поверхностей стенки t_1 и t_4 . Тепловой контакт между поверхностями предполагается идеальным, температуру в местах контакта мы обозначим через t_2 и t_3 .

При стационарном режиме плотность потока q постоянна и для всех слоев одинакова. Поэтому на основании закона Фурье можно написать следующую формулу для расчета плотности теплового потока (q , Вт/м²) через плоскую стенку, содержащую n слоев:

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}, \quad (6.5)$$

где δ_i – толщина слоев стенки, м;

λ_i – коэффициент теплопроводности материалов стенки, Вт/(м·К).

Температура на границе соприкосновения двух соседних слоев определяется как:

$$t_{i+1} = t_i - q \frac{\delta_i}{\lambda_i}. \quad (6.6)$$

3) Тепловой поток Q , Вт, проходящий через стенку площадью F определяется по формуле:

$$Q = q \cdot F. \quad (6.7)$$

По аналогии с изложенным, можно сразу написать расчетные формулы для расчета теплопроводности n – слойной цилиндрической стенки.

Расчетные уравнения стационарной теплопроводности через цилиндрическую стенку:

Количество тепла, проходящее через цилиндрическую стенку в виде трубы, может быть отнесено к единице длины l , при этом:

1) **Линейная плотность** теплового потока (q_l , Вт/м) через цилиндрическую стенку, содержащую n слоев:

$$q_l = \frac{2\pi(t_1 - t_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}, \quad (6.8)$$

где d_i, d_{i+1} – внутренний и наружный диаметры i -го слоя, м.

2) Температура на границе соприкосновения двух соседних слоев:

$$t_{i+1} = t_i - \frac{q_l}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}. \quad (6.9)$$

3) Соотношение размеров:

$$d_{i+1} = d_i + 2\delta_i. \quad (6.10)$$

4) Тепловой поток Q , Вт, проходящий через стенку длиной l :

$$Q = q_l l. \quad (6.11)$$

Некоторые сведения о коэффициенте теплопроводности веществ различной структуры.

Коэффициент теплопроводности λ характеризует способность данного вещества проводить теплоту. Коэффициент теплопроводности λ в общем случае зависит от температуры, плотности материала, рода вещества и, в случае газов, от давления.

Твердые тела. Их можно разделить на три группы:

1) $\lambda = 5 \dots 420 \text{ Вт/(м·К)}$ – с высокой теплопроводностью (металлы и сплавы); 2) $\lambda = 0,5 \dots 5 \text{ Вт/(м·К)}$ – с малой теплопроводностью (керамика, огнеупоры); 3) $\lambda = 0,001 \dots 0,5 \text{ Вт/(м·К)}$ – материалы с очень низкой теплопроводностью (теплоизоляционные материалы).

для диэлектриков: $\lambda = 0,023 \dots 2,9 \text{ Вт/(м·К)}$;

для жидкостей: $\lambda = 0,07 \dots 0,7 \text{ Вт/(м·К)}$;

для газов: $\lambda = 0,006 \dots 0,6 \text{ Вт/(м·К)}$.

Материалы с низким значением λ [меньше $0,2 \text{ Вт/(м·К)}$] применяют для тепловой изоляции и называют *теплоизоляционными*.

С увеличением температуры коэффициент теплопроводности большинства твердых тел возрастает, что объясняется увеличением коэффициента теплопроводности газов в порах этих материалов и увеличением теплопередачи излучением в порах. Для упрощения принимается линейная зависимость.

Теплопроводность в газах с увеличением температуры газа возрастает. Наибольшую теплопроводность имеют газы с малой массой молекул (водород, гелий) поскольку эти молекулы имеют самую высокую скорость перемещения.

Для большинства жидкостей с увеличением температуры силы взаимодействия между частицами жидкости ослабевают и λ жидкостей падает. Исключения составляют вода и глицерин, у которых λ возрастает.

Теплопроводность пористых материалов сильно зависит от их влажности. Для влажного материала коэффициент теплопроводности значительно больше, чем для сухого и воды в отдельности.

Например, для сухого кирпича $\lambda = 0,35 \text{ Вт/(м·К)}$, для воды $\lambda = 0,60 \text{ Вт/(м·К)}$, а для влажного кирпича $\lambda = 1,0 \text{ Вт/(м·К)}$.

Контрольные вопросы:

1. Какими способами теплота распространяется в пространстве? Охарактеризуйте их.

2. Что такое тепловой поток и плотность теплового потока?

3. Дайте определение понятию «градиент температуры», какую размерность имеет градиент температуры?

4. Сформулируйте закон теплопроводности Фурье и дайте его математическое выражение.

5. Напишите и объясните формулы для вычисления теплового потока через плоскую и цилиндрическую стенки (однослойную и многослойную).

Лекция 7.

КОНВЕКТИВНЫЙ И ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Конвективный теплообмен - перенос теплоты в движущейся среде (жидкости или газе) за счет совместного действия двух механизмов – конвекции и теплопроводности.

Конвекция представляет собой перенос теплоты в среде с неоднородным распределением температуры, осуществляемый макроскопическими объемами среды при их перемещении.

Различают свободную (естественную) и вынужденную конвекцию.

Свободная (естественная) конвекция – перенос теплоты из-за разности плотностей в газовой среде. Например, движение воздуха в помещении, обогреваемом горячими батареями.

Вынужденная конвекция – перенос теплоты при вынужденном движении газов за счет внешних сил (вентилятор, компрессор и т.д.). Например, движение газов в рабочем пространстве печи за счет струй, вытекающих из горелок.

Для практики представляет интерес конвективная теплоотдача. Теплоотдачей называется процесс конвективного теплообмена между потоком газа (движущейся средой) и твердой поверхностью (твердым телом - стенкой). Например, воздух в помещении греется от горячих приборов отопления и т.д.

Для практических расчетов конвективную теплоотдачу определяют по закону Ньютона-Рихмана, в котором плотность теплового потока пропорциональна разности температур газа и стенки:

$$q = \alpha \cdot (t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}}), \text{ Вт/м}^2, \quad (7.1)$$

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

$t_{\text{ж}}$, $t_{\text{ст}}$ – температуры, соответственно, теплоносителя (жидкости) и стенки, °С.

Коэффициент теплоотдачи представляет собой количество теплоты, передаваемое 1 м² твердой поверхности в единицу времени при разности температур газа и поверхности в 1 градус.

На коэффициент теплоотдачи влияют разнообразные факторы: скорость потока жидкости, характер сил, вызывающих ее движение, физические свойства самой жидкости (плотность, вязкость, коэффициент теплопроводности) и прежде всего режим течения жидкости.

Как установил О. Рейнольдс в своих опытах (1884 г.), следует различать два режима движения жидкости: ламинарный и турбулентный, описываемые различными уравнениями.

В потоке ламинарного движения все частицы жидкости движутся по параллельным траекториям и частицы жидкости не перемешиваются друг с другом. При этом передача теплоты от струйки к другой происходит только теплопроводностью, а так как коэффициент теплопроводности жидкостей (капельных и газов) невелик, то и распространение теплоты по всей массе жидкости в ламинарном потоке происходит медленно.

В потоке турбулентного режима частицы жидкости движутся беспорядочно: каждая частица перемещается вдоль канала с некоторой скоростью, а кроме того, совершает движения перпендикулярно стенкам канала. При этом происходит перемешивание частиц жидкости и перенос теплоты из области с более высокими температурами в область с менее высокими температурами, т.е. перенос теплоты конвекцией.

Коэффициент теплоотдачи определяется экспериментальным путем и, обычно, обобщается в виде критериальных зависимостей вида:

$$Nu = f(Re, Pr, Gr), \quad (7.2)$$

где Nu – критерий Нуссельта; Re – критерий Рейнольдса; Gr – критерий Грасгофа; Pr – критерий Прандтля.

Критерий Нуссельта (критерий теплового подобия) характеризует условия теплообмена на границе между стенкой и теплоносителем:

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}, \quad (7.3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м К); d – определяющий (характерный) линейный размер поверхности теплообмена, м.

Критерий Рейнольдса (критерий гидродинамического подобия) характеризует гидродинамический режим вынужденного движения теплоносителя:

$$Re = \frac{w \cdot l}{\nu}, \quad (7.4)$$

где w – скорость движения теплоносителя, м/с; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м²/с; l – определяющий (характерный) линейный размер поверхности теплообмена, м.

Критерий Грасгофа (критерий гидродинамического подобия) характеризует гидродинамический режим свободного движения теплоносителя:

$$Gr = \frac{g \beta d^3 (t_c - t_j)}{\nu^2}, \quad (7.5)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; β – температурный коэффициент объемного расширения жидкости, 1/К.

Критерий Прандтля характеризует теплофизические свойства теплоносителя:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (\text{или} \quad \frac{\mu c_p}{\lambda}) \quad (7.6)$$

где a – коэффициент температуропроводности, м²/с; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; c_p – изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К).

Параметры теплоносителя, входящие в критерии подобия берут из справочников для данного теплоносителя при средней температуре между температурами поверхности и теплоносителя: $t_{cp} = 0,5 (t_c + t_j)$.

Используя взятую из литературы зависимость для соответствующего случая такого рода теплообмена, вычисляют значение Nu , и определяют коэффициент теплоотдачи α по формуле:

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{l}. \quad (7.7)$$

Порядок решения задач по конвективному теплообмену:

- 1) Определить вид движения жидкости (свободное или вынужденное).
- 2) Выбрать определяющий размер (Обычно для труб определяющим размером является диаметр, для плоских поверхностей – линейный размер в направлении движения жидкости).
- 3) Рассчитать определяющую (среднюю) температуру как среднеарифметическую температуру между температурами поверхности и теплоносителя (жидкости): $t_{cp} = 0,5 (t_c + t_{ж})$.
- 4) По величине определяющей температуры по справочникам найти основные теплофизические свойства жидкости (λ, ν, Pr).
- 5) Вычислить определяющие критерии: $Pr \cdot Gr$ для свободного движения жидкости, Re для вынужденного движения жидкости.
- 6) По критериям $Pr \cdot Gr$ или Re определить режим движения жидкости (ламинарный, турбулентный или переходный).
- 7) В зависимости от вида и режима движения жидкости с учетом особенностей теплообмена (движение жидкости в трубе, омывание трубы или пучка труб и т.д.) выбрать расчетное уравнение для определения числа Нуссельта и рассчитать число Nu .
- 8) Из числа Нуссельта определить коэффициент теплоотдачи.
- 9) По уравнению теплоотдачи рассчитать тепловой поток Q .

Для расчета коэффициента теплоотдачи в условиях естественной конвекции в большом объеме теплоносителя используется критериальная зависимость вида:

$$Nu_{жс} = c \cdot (Pr \cdot Gr)^n \cdot \epsilon. \tag{7.8}$$

В этом уравнении определяющей температурой является средняя температура жидкости в пограничном слое, величины коэффициентов c, n и ϵ определяют по таблице 7.1.

Таблица 7.1

Значения коэффициентов c, n и ϵ в критериальной зависимости (7.8)

Условия теплоотдачи	c	n	ϵ	Определяющий размер
Вертикальная пластина и вертикальная труба: ламинарный пограничный слой $Gr \cdot Pr = 10^3 \dots 10^9$ турбулентный пограничный слой $Gr \cdot Pr > 10^9$	0,80 0,15	0,250 0,330	$\left[1 + \left(1 + 1/\sqrt{Pr} \right)^2 \right]$ 1	Длина трубы, пластины
Горизонтальная труба: $10^{-3} \leq Gr \cdot Pr \leq 10^3$ $10^3 \leq Gr \cdot Pr \leq 10^8$	0,18 0,50	0,125 0,250	1 1	Диаметр трубы
Горизонтальная пластина, охлаждаемая сверху: ламинарный режим течения турбулентный режим течения	0,54 0,14	0,250 0,330	1 1	Короткая сторона пластины
Горизонтальная пластина, охлаждаемая снизу, ламинарный режим	0,27	0,250	1	

Теплоотдача при вынужденном движении жидкости

Теплоотдача при продольном омывании плоской поверхности (определяющий размер – линейный размер в направлении движения жидкости):

а) ламинарный режим движения жидкости ($Re \leq 5 \cdot 10^5$; $0,6 < Pr < 15$)

$$Nu = 0,664 Pr^{0,33} Re^{0,5} \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}, \text{ для воздуха } Nu = 0,57 Re^{0,5}; \quad (7.9)$$

б) турбулентный режим движения жидкости ($Re > 5 \cdot 10^5$)

$$Nu = 0,037 Pr^{0,43} Re^{0,8} \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}, \text{ для воздуха } Nu = 0,032 Re^{0,8}. \quad (7.10)$$

2) Теплоотдача при движении жидкости в трубах (здесь определяющий размер – внутренний диаметр трубы):

а) ламинарный режим движения жидкости ($Re < 2300$)

$$Nu_{ж} = 0,17 Pr^{0,43} Gr^{0,1} Re^{0,33} \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25} \varepsilon_l \quad (7.11)$$

(здесь поправку ε_l выбирают из таблицы 7.2 в зависимости от соотношения между длиной и диаметром трубы).

Таблица 7.2

Значения коэффициента ε_l в критериальной зависимости (7.11)

L/d	1	2	5	10	15	20	30	40	50
ε_l	1,90	1,70	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,00

б) переходный режим движения жидкости ($2300 < Re < 10^4$)

$$Nu = k_0 Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (7.12)$$

(коэффициент k_0 выбирают из таблицы 7.3 в зависимости от числа Re).

Таблица 7.3

Значения коэффициента k_0 в критериальной зависимости (7.12)

$Re \cdot 10^{-3}$	2,2	2,3	2,5	3,0	3,5	4	5	6	7	8	9	10
k_0	2,2	3,6	4,9	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30	33

в) турбулентный режим движения жидкости

при $10^4 < Re < 5 \cdot 10^6$, $0,6 < Pr < 2,5 \cdot 10^3$

$$Nu = 0,021 Pr^{0,43} Re^{0,8} \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25} \varepsilon_l' \varepsilon_R. \quad (7.13)$$

Поправки ε_l' и ε_R определяют по формулам:

$$\varepsilon_l' = 1 + \sqrt[3]{\frac{2700}{Re}} e^{-0,08l/d_s}, \quad (7.14)$$

где l – длина трубы, d_s – диаметр трубы;

$$\varepsilon_R = 1 + 1,77 d_s / R, \quad (7.15)$$

где R – радиус кривизны для изогнутых труб (для прямых труб $\varepsilon_R = 1$).

Теплообмен излучением

Тепловое излучение представляет распространение электромагнитных волн в интервале длин от $\lambda_1 = 0,4$ мкм до $\lambda_2 = 400$ мкм. Тепловое излучение можно рассматривать и как поток фотонов или квантов, летящих со скоростью света. При попадании тепловых лучей (волн) на другое тело их энергия частично поглощается им, снова прекращаясь во внутреннюю. Так осуществляется лучистый теплообмен между телами.

При температурах, с какими обычно имеют дело в технике, основное количество энергии излучается при λ от 0,8 до 80 мкм. Эти лучи принято называть тепловыми (инфракрасными). Большую длину имеют радиоволны, меньшую – волны видимого (светового) излучения (0,4 – 0,8 мкм).

Тепловой поток, излучаемый на всех длинах волн с единицы поверхности тела по всем направлениям, называется поверхностной плотностью потока интегрального излучения E , Вт/м². Излучательная способность определяется природой данного тела и его температурой. Это – собственное излучение тела.

Падающая лучистая энергия частично поглощается твердой поверхностью, частично отражается от поверхности и частично проходит через тело.

Тепловой баланс для падающего излучения $Q_{\text{пад}}$ запишется в виде

$$Q_{\text{погл}} + Q_{\text{отр}} + Q_{\text{проп}} = Q_{\text{пад}} \quad (7.16)$$

или

$$A + R + D = 1, \quad (7.17)$$

где $A = Q_{\text{погл}} / Q_{\text{пад}}$ – поглощательная способность тела; $R = Q_{\text{отр}} / Q_{\text{пад}}$ – отражательная способность тела; $D = Q_{\text{проп}} / Q_{\text{пад}}$ – пропускательная способность тела. У твердых тел $D_{\text{т}} = 0$, тогда $R_{\text{т}} = 1 - A_{\text{т}}$.

Абсолютно черное тело обладает максимальной поглощательной способностью. Оно полностью (на 100 %) поглощает падающие на тело лучи с длиной волны от $\lambda = 0$ до $\lambda = \infty$.

Существует закон Стефана-Больцмана, характеризующий излучение реального тела:

$$E = \sigma \left(\frac{T}{100} \right)^4 = \varepsilon \cdot \sigma_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (7.18)$$

где E – поверхностная плотность потока излучения [Вт/м²];

σ – коэффициент излучения реального тела, Вт/(м²·К⁴);

ε – степень черноты реального тела ($\varepsilon = \sigma / \sigma_0 = 0 \dots 1$);

$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Существует закон М. Планка для абсолютно черного тела, описывающий зависимость плотности теплового потока излучения от длины волны излучения (для различных температур тела показаны на рис. 7.1).

Из диаграммы (рис. 7.1) видно, что максимум плотности потока излучения падает на инфракрасное излучение (точнее даже на часть этого диапазона). Эти же зависимости выражаются формулой:

$$I_{0\lambda} = \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1}, \quad (7.19)$$

где $I_{0\lambda}$ – плотность теплового потока излучения, Вт/(м²·мкм);
 λ – длина волны излучения, мкм; T – температура излучающего тела, К;
 коэффициенты: $C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$ [Вт/м²], $C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$, (м·К).

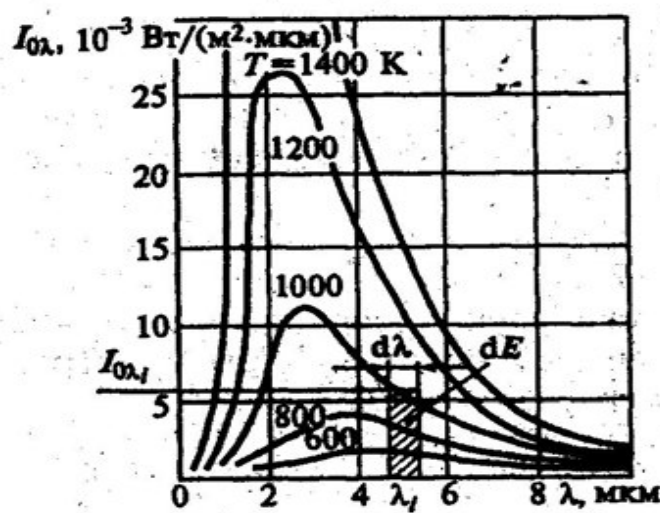


Рис. 7.1. Зависимость плотности потока излучения от длины волны излучения (закон Планка)

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

$$T \cdot \lambda = 2,8988 \cdot 10^{-3} = \text{const.} \quad (7.20)$$

Контрольные вопросы:

1. Что такое свободная и вынужденная конвекция? Дайте определение понятий конвективный теплообмен и теплоотдача.
2. Напишите уравнение теплоотдачи Ньютона-Рихмана и объясните его.
3. Какой физический смысл коэффициента теплоотдачи, от чего он зависит?
4. Что такое числа (критерии) подобия, как их обозначают и какие из них используются для определения коэффициента теплоотдачи?
5. Каков порядок решения задач по конвективному теплообмену, изложите его?
6. Какие существуют режимы течения жидкости (газа) в трубах? При каких условиях они возникают? Какого вида уравнениями описывается теплоотдача при движении жидкости в трубах при различных режимах течения?
7. Какую природу имеет перенос излучения в пространстве?
8. В каком диапазоне длин волн электромагнитное излучение считают тепловым?
9. Что такое «абсолютно черное тело», степень черноты?
10. Сформулируйте и запишите закон Стефана-Больцмана.

Лекция 8.

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА. РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ.

Теплопередача – это процесс теплообмена между двумя средами через разделяющую их стенку или через поверхность раздела фаз между ними.

Путем теплопередачи осуществляется теплообмен в специальных устройствах, предназначенных для передачи теплоты от одной среды к другой (теплообменные аппараты); теплообмен воздуха помещений с наружным воздухом через ограждающие конструкции этих помещений, теплообмен в системах отопления зданий и сооружений.

Теплообменный аппарат (теплообменник) – это устройство, в котором осуществляется процесс передачи тепла от одного теплоносителя к другому.

По принципу действия теплообменные аппараты могут быть разделены на рекуперативные, регенеративные и смешительные.

Рекуперативными называются такие аппараты, в которых тепло от горячего теплоносителя к холодному передается через разделяющую их стенку. Примером таких аппаратов являются паровые котлы, подогреватели, конденсаторы, радиаторы и др.

Регенеративными называются такие аппараты, в которых одна и та же поверхность нагрева омывается то горячим, то холодным теплоносителем. При протекании горячей жидкости тепло воспринимается стенками аппарата и в них аккумулируется, при протекании холодной жидкости это аккумулированное тепло ею воспринимается. Примером таких аппаратов являются регенераторы мартеновских и стеклоплавильных печей, воздухоподогреватели доменных печей и др.

В смешительных аппаратах процесс теплопередачи происходит путем непосредственного соприкосновения и смешения горячего и холодного теплоносителей. В этом случае теплопередача протекает одновременно с материальным обменом. Примером таких теплообменников являются башенные охладители (градирни), скрубберы и др.

В сельскохозяйственном производстве широко распространены рекуперативные теплообменные аппараты. В поверхностных рекуперативных теплообменных аппаратах нагревающая и нагреваемая жидкости могут двигаться по различным схемам, показанным на рисунке 8.1.

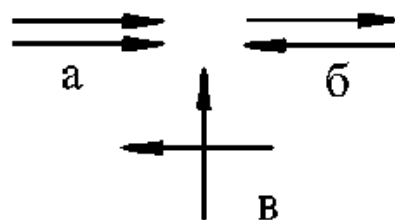


Рис. 8.1. Схемы движения нагревающейся и нагреваемой жидкостей в теплообменных аппаратах:
а) прямоток; б) противоток; в) перекрестный ток

На этом рисунке направления движения жидкостей показаны стрелками. Так, схема на рисунке 8.1,а относится к случаю, когда нагревающая и нагреваемая жидкости движутся в одном направлении. Такое движение жидкости называется прямотоком. На рисунке 8.1,б показан противоток, когда нагревающая и нагреваемая жидкости движутся в противоположных направлениях. В некоторых аппаратах одна из жидкостей движется по трубкам, омываемым поперечным потоком другой жидкости. Такое движение называется перекрестным током (рисунок 8.1 в).

Несмотря на различия в принципе действия и конструктивном устройстве, основы теплового расчета одинаковы для всех рекуперативных теплообменных аппаратов.

Тепловой расчет теплообменных аппаратов (ТОА).

Тепловой расчет теплообменного аппарата может быть конструкторским, целью которого является определение поверхности теплообмена, и поверочным, при котором устанавливается режим работы аппарата и определяются конечные температуры теплоносителей.

В основу теплового расчета рекуперативного теплообменного аппарата положены: уравнение теплового баланса и уравнение теплопередачи.

Необходимую поверхность теплопередачи определяют путем совместного решения уравнения теплопередачи и уравнения теплового баланса для одного из теплоносителей (когда агрегатное состояние теплоносителя не меняется).

Тепловой поток (Φ , Вт), отдаваемый горячим теплоносителем (при неизменном агрегатном состоянии):

$$\Phi = M_1 \cdot c_{p1} \cdot (t_1' - t_1''). \quad (8.1)$$

Тепловой поток (Φ , Вт), воспринимаемый холодным теплоносителем (при неизменном его агрегатном состоянии):

$$\Phi = M_2 \cdot c_{p2} (t_2' - t_2''). \quad (8.2)$$

Уравнение теплопередачи для всего теплообменного аппарата:

$$\Phi = k A \Delta t_{cp}, \quad (8.3)$$

где c_{p1} и c_{p2} – массовые теплоемкости греющего и нагреваемого теплоносителей, Дж/(кг·К);

M_1 и M_2 – соответственно, массовые расходы греющего и нагреваемого теплоносителей, кг/с;

t_1' и t_1'' – температуры греющего теплоносителя на входе и выходе из теплообменника, °С;

t_2' и t_2'' – температуры нагреваемого теплоносителя на входе в теплообменник и выходе из него, °С;

k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);

A – площадь поверхности теплообмена, м²;

Δt_{cp} – средняя разность температур теплоносителей, град.

Формула для вычисления коэффициента теплопередачи плоской стенки имеет вид:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (8.4)$$

Формула для вычисления коэффициента теплопередачи цилиндрической стенки имеет вид:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{\delta_c}{2 \lambda_c} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}} \quad (8.5)$$

В формулах (8.4) и (8.5) обозначения:

α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи, Вт/(м²·К);

δ_c – толщина слоев стенки, м;

λ_c – коэффициент теплопроводности материалов стенки, Вт/(м·К);

d_1, d_2 – внутренний и наружный диаметры цилиндрической стенки, м.

Сравнение формул (8.4) и (8.5) показывает, что цилиндрическую стенку можно заменить в расчетах плоской лишь в том случае, если диаметры d_2, d_1 близки к 1 м, или отношение d_2/d_1 близко к единице (обычно когда $(d_2/d_1) < 2$).

Определение средней разности температур (Δt_{cp}).

Среднюю разность температур нагревающей и нагреваемой жидкостей (средний температурный напор) определяют как среднюю логарифмическую разность температур с учетом графика изменения температур теплоносителей при прямоточной и противоточной схемах движения теплоносителей (рис. 8.2):

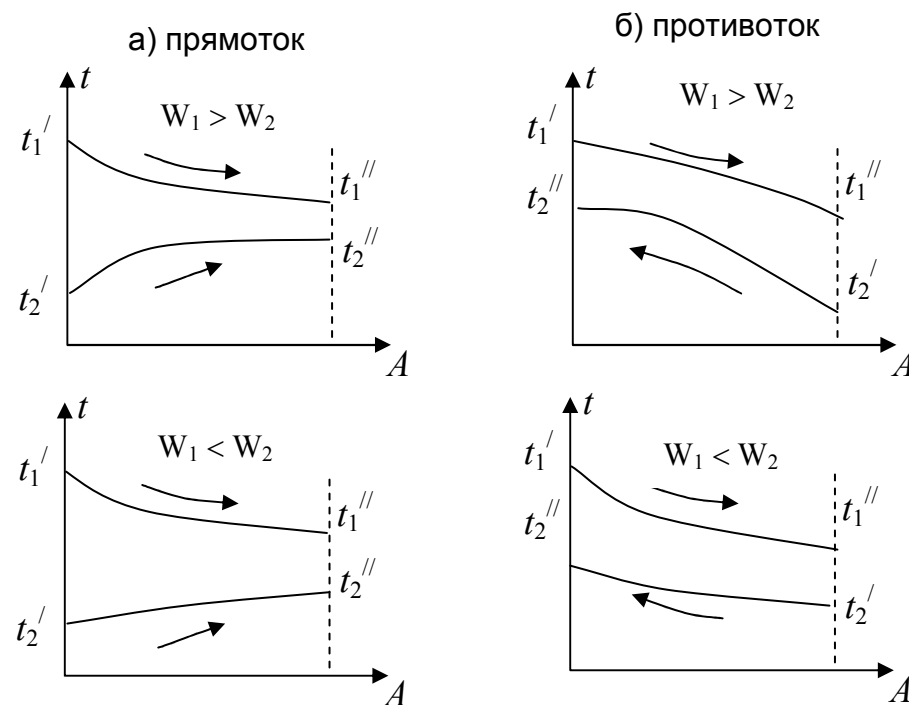


Рис. 8.2. График изменения температур теплоносителей при различных соотношениях их условных эквивалентов.

Среднеарифметический температурный напор при прямоточной схеме определяется по формуле:

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{(t_1' - t_2') - (t_1'' - t_2'')}{\ln \frac{(t_1' - t_2')}{(t_1'' - t_2'')}} \quad (8.6)$$

При противоточной схеме среднелогарифмический температурный напор определяется по формуле:

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln \frac{(t_1' - t_2'')}{(t_1'' - t_2')}} \quad (8.7)$$

где Δt_{δ} и $\Delta t_{\text{м}}$ – разности температур теплоносителей (температурные напоры) в начале и конце поверхности теплообмена теплообменника, °С.

В тепловых расчетах имеется понятие о так называемом водяном эквиваленте теплоносителя (W , Вт/К), численная величина которого определяет собой количество воды, которое по теплоемкости пропорционально теплоемкости массового расхода рассматриваемого теплоносителя в единицу времени:

$$W = m \cdot c, \quad (8.8)$$

где $m = \rho \cdot w \cdot F$ – массовый расход теплоносителя, кг/с; c – теплоемкость теплоносителей, Дж/(кг·К); ρ – плотность теплоносителя, кг/м³; w – скорость теплоносителя, м/с; F – сечение канала, м².

Интенсификация теплообмена. Для уменьшения габаритов теплообменного аппарата и его материалоемкости необходимо интенсифицировать процесс теплообмена в нем. В соответствии с формулой (8.3) этого можно достичь увеличением либо среднего температурного напора Δt_{cp} , либо коэффициента теплопередачи k . Первый способ обычно имеет технологические ограничения, поэтому, как правило, применяют второй способ. При этом, из зависимости (8.4) видно, что коэффициент теплопередачи k меньше меньшего из коэффициентов теплоотдачи α_1 и α_2 , поэтому для увеличения коэффициента теплопередачи необходимо интенсифицировать теплоотдачу со стороны того теплоносителя, коэффициент теплоотдачи которого имеет меньшее значение.

Контрольные вопросы:

1. Что называется теплопередачей? В каких устройствах энергетических установок теплообмен осуществляется теплопередачей?
2. Какие типы теплообменных аппаратов вы знаете? Поясните как они устроены.
3. Какой порядок теплового расчета теплообменного аппарата? Какие параметры при этом подлежат определению?
4. Как рассчитать средний температурный напор для прямотока и противотока?
5. Как найти тепловой поток, передаваемый холодному теплоносителю, если он не изменяет своего агрегатного состояния?

Лекция 9.

ТИПЫ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ. ЦИКЛЫ ОСНОВНЫХ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ.

Основные типы электростанций.

Электрическая станция – предприятие или установка, вырабатывающая электроэнергию путем преобразования других видов энергии.

Электрические станции вырабатывают электрическую и тепловую энергию для нужд народного хозяйства страны и коммунально-бытового обслуживания. В зависимости от источника энергии различают:

- тепловые электростанции (ТЭС);
- гидроэлектрические станции (ГЭС);
- атомные станции (АЭС) и др.

Тепловые электрические станции. К тепловым электрическим станциям относятся конденсационные электростанции (КЭС) и теплоэлектроцентрали (ТЭЦ). В состав государственных районных электростанций (ГРЭС), обслуживающих крупные промышленные районы, как правило входят конденсационные электростанции, используется органическое топливо и не вырабатывается тепловой энергии наряду с электрической. ТЭЦ работают также на органическом топливе, но в отличие от КЭС наряду с электроэнергией производят горячую воду и пар для нужд теплофикации.

Гидроэлектростанции. ГЭС часто относят к энергоустановкам, использующим возобновляемые источники энергии. Однако по сравнению с другими видами природных ресурсов преобразование гидроэнергии в электричество приводит к значительным воздействиям на окружающую среду. Для ГЭС необходимо сооружать значительные водохранилища в верхнем бьефе перед плотиной, что приводит к существенному затоплению прилегающей территории и влияет на рельеф побережья в зоне станции.

В своё время бывший СССР занимал второе место в мире по уровню развития гидроэнергетики.

Одной из основных экономических особенностей эксплуатации ГЭС является высокая производительность труда. Затраты труда на единицу мощности на них почти в 10 раз меньше, чем на ТЭС (с учётом затрат труда на добычу топлива и его транспорт).

Гидроэлектростанции сооружались каскадами, тогда полнее используются энергетические ресурсы. В России крупнейшими каскадами ГЭС являются Ангарский и Енисейский.

Атомные электрические станции. Атомные электростанции не выбрасывают в атмосферу вредных веществ, вызывающих парниковый эффект или кислотные дожди, поэтому некоторые специалисты поспешили объявить ядерную энергетику экологически чистой. Чернобыльская катастрофа заставила пересмотреть планы развития атомной энергетики во многих государствах. Так, в США были аннулированы заказы на 173 новых блока АЭС, в Германии на 27, в Англии на 13, во Франции на 12.

В настоящее время в мире работает 425 атомных реакторов. В 1993г. Франция получала от АЭС 72,9% электроэнергии, Бельгия – 65%, Швеция – 45%, ФРГ – 30,1%, Япония – 37,7%, Украина – 25%, США – 22,3%, Канада – 15,2%.

Циклы тепловых электростанций.

Основу современной тепловой и атомной энергетики составляют паротурбинные установки, рабочим телом которых служит водяной пар. До настоящего времени ТЭС производят основную часть вырабатываемой энергии. По существующим оценкам ТЭС потребляют свыше трети добываемого в мире топлива. На этих станциях могут применяться различные виды топливных ресурсов: твёрдые: угли и горючие сланцы, жидкие: мазут, дизельное и газотурбинное топливо и газообразные: природный газ – наиболее экологически чистое энергетическое топливо.

Изучение тепловых электростанций начинается с простейшей схемы, реализующей так называемый цикл Ренкина, названный именем шотландского физика и инженера, предложившего аналогичный цикл. Схема такого цикла показана на рис. 9.1.

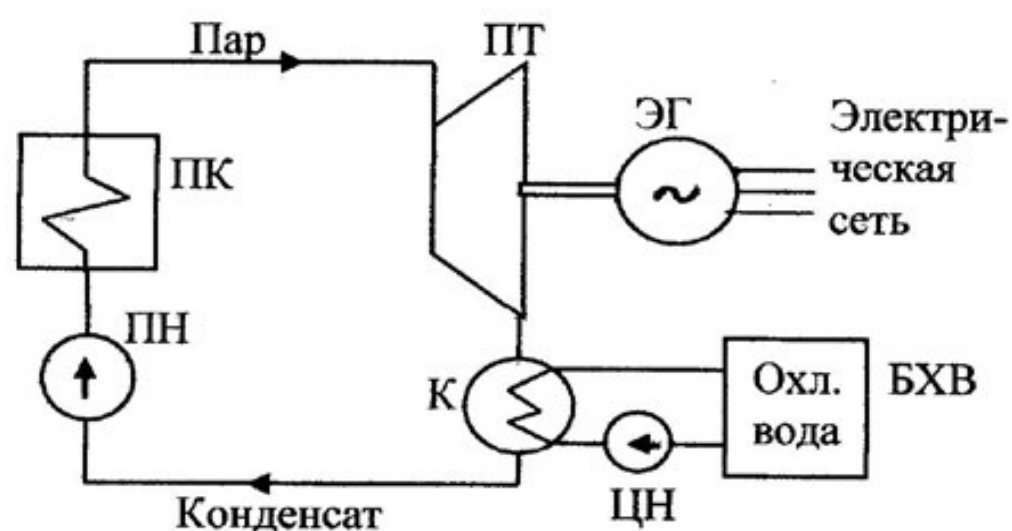


Рис. 9.1. Схема ТЭС на основе цикла Ренкина.

Здесь обозначения:

ПК – паровой котел, преобразующий химическую энергию топлива в тепловую энергию водяного пара;

ПТ – паровая турбина, преобразующая тепловую энергию пара в механическую энергию, передаваемую через вал электрогенератору (ЭГ);

К – конденсатор, в котором отработанный пар конденсируется;

БХВ – бассейн холодной воды, которая подается в конденсатор циркуляционным насосом (ЦН);

ПН – питательный насос, подающий воду в паровой котел.

На рис. 9.2 изображены процессы преобразования энергии в цикле Ренкина в виде $p\nu$ и TS диаграмм.

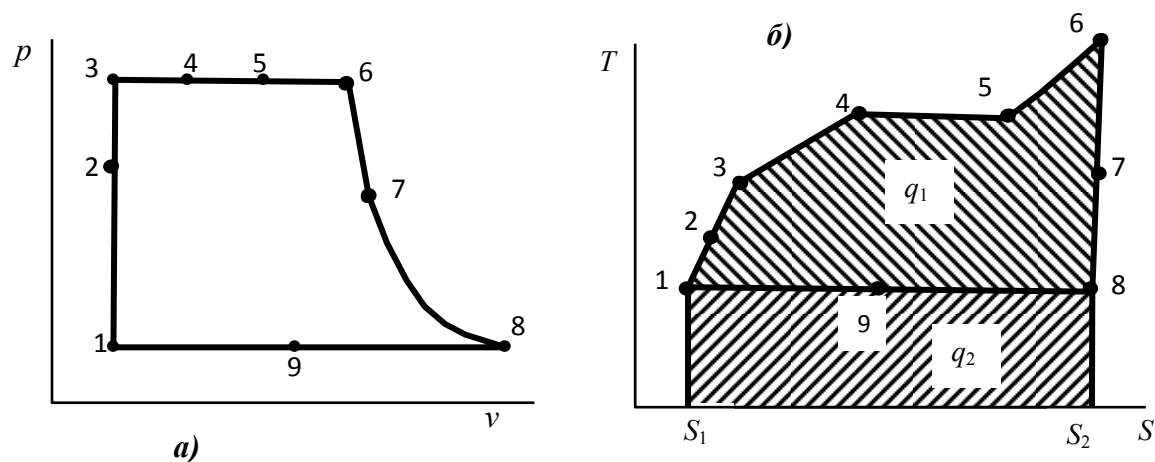


Рис. 9.2. Цикл Ренкина:
а) $p\nu$ – диаграмма; б) TS – диаграмма

Процессы цикла Ренкина описываются следующим образом.

1-2-3 – питательный насос (ПН) закачивает воду в паровой котел (ПК), поднимая давление. 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, определив 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. 9.2 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:

$$\eta_T = \frac{q_{\text{ц}} - q_2}{q_{\text{ц}}} = \frac{q_1}{q_1 + q_2} \quad (9.1)$$

Здесь $q_{\text{ц}} = q_1 + q_2$ – количество теплоты цикла. Если в нашем прикидочном расчете принять для водяного пара среднюю теплоемкость, количество теплоты в формуле (9.1) можно выразить следующим образом:

$$q_{\text{ц}} = c_{\text{п}} \cdot T_1 \cdot D; \quad q_2 = c_{\text{п}} \cdot T_2 \cdot D \quad (9.2),$$

где $c_{\text{п}}$ – средняя теплоемкость пара, T_1 – температура пара на входе турбины, T_2 – температура пара на выходе турбины, D – расход пара через турбину.

Подстановка (9.2) в уравнение (9.1) дает:

$$\eta_T = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\% \quad (9.3)$$

Для численного примера примем параметры пара близкие к реальным, например:

$t_1 = 500^\circ\text{C}$, $T_1 = 500 + 273 = 772 \text{ K}$, $t_2 = 100^\circ\text{C}$, $T_2 = 110 + 273 = 383 \text{ K}$. Температура T_2 не может быть ниже 100 градусов по Цельсию, чтобы не допустить конденсацию пара в турбине. Подстановка чисел в (9.3) дает:

$$\eta_T = \frac{772 - 383}{772} \cdot 100 = 50,38\%$$

Если учесть КПД других элементов схемы (рис. 9.1), то можно определить КПД всей энергетической установки:

$$\eta_y = \eta_K \cdot \eta_T \cdot \eta_{\text{ТМ}} \cdot \eta_{\text{Г}} \quad (9.4)$$

Здесь $\eta_K = 0,9$ – КПД котла; $\eta_{\text{ТМ}} = 0,98$ – механический КПД турбины; $\eta_{\text{Г}} = 0,98$ – 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 электростанции, называется **КПД нетто**, который ниже КПД брутто. Если принять потребление собственных нужд около 6% , то можно определить КПД нетто:

$$\eta_{\text{ун}} = 0,4321 \cdot (1 - 0,06) = 0,4061 = 40,61\%.$$

Все изложенное относится к конденсационным циклам, используемым на конденсационных электростанциях (КЭС). Конечно, реальные тепловые схемы КЭС гораздо сложнее. Гораздо сложнее получаются и диаграммы, описывающие тепловые процессы. Надо сказать, что при расчете КПД не все потери были учтены (например, потери в проточной части турбины), однако более сложные, более совершенные схемы позволяют повысить КПД энергоустановки (например использование регенеративного подогрева питательной воды). Примеры тепловой схемы КЭС, приближающейся к реальной, показаны в специальной литературе. Однако подробное изучение таких схем уже входит в программы специальных курсов.

Кроме конденсационных электростанций широко используются тепловые электростанции с комбинированной выработкой и тепловой

энергии и электрической. Их называют **теплоэлектроцентралями**, сокращенно **ТЭЦ**.

Они (ТЭЦ) предназначены, в частности, для централизованного теплоснабжения, отсюда и название.

Простейшая схема ТЭЦ показана на рис. 9.3. Тепловая схема ТЭЦ всегда сложнее схемы КЭС благодаря наличию элементов, обеспечивающих снабжение тепловой энергией.

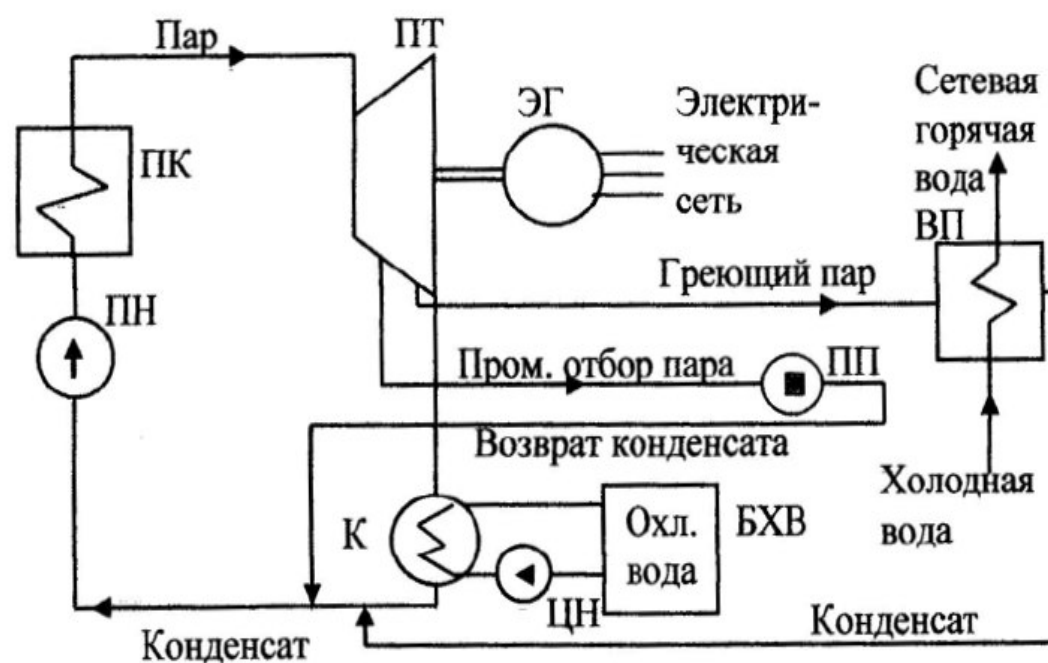


Рис. 9.3. Простейшая тепловая схема ТЭЦ.

На тепловой схеме (рис. 9.3) приняты следующие обозначения.

ПК – паровой котел, дающий на выходе пар с требуемыми параметрами;

ПТ – паровая турбина позволяющая отбирать часть пара в процессе его движения в проточной части турбины. Отбор возможен для двух целей: промышленный отбор пара с параметрами 1...2 МПа для обеспечения промышленных потребителей и отбор теплофикационный с параметрами 0,1...0,2 МПа для подогрева воды, используемой для целей отопления и горячего водоснабжения;

ВП – водоподогреватель, используемый для подогрева холодной воды в последующим использованием подогретой воды для отопления и горячего водоснабжения;

ПП – промышленный потребитель пара, который обязан возвращать конденсат, который образуется после использования пара;

К – конденсатор, в котором отработанный пар турбины конденсируется;

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.

На протяжении многих лет наблюдался рост мощностей тепловых электростанций по экологическим соображениям. При увеличении мощности электростанции значительно снижаются удельные затраты на сооружение водоснабжения, на железнодорожные пути и автодороги, на подсобно-вспомогательные сооружения. Большое значение имеет также увеличение единичной мощности агрегатов электростанций.

Наиболее эффективным техническим средством для достижения высоких экономических показателей ТЭС является повышение параметров пара. Экономическую эффективность мощных энергоблоков с высокими параметрами пара можно проиллюстрировать такими данными: электростанции с блоками по 300 МВт на 240атм обеспечивают экономию топлива почти на 44% по сравнению с электростанциями, соорудившимися по плану ГОЭЛРО с агрегатами по 10...16 МВт на 16...18атм.

ТЭС оказывают отрицательное влияние на окружающую среду, осуществляя выбросы продуктов сгорания, золы тепловые сбросы, выбросы загрязненных сточных вод.

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 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 РБМК позволяет создать одноконтурную схему электростанции, показанную на рис. 9.4. Для таких схем предъявляются повышенные требования к чистоте воды, циркулирующей между ректором и турбиной. Вода должны быть дистиллированной, 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.

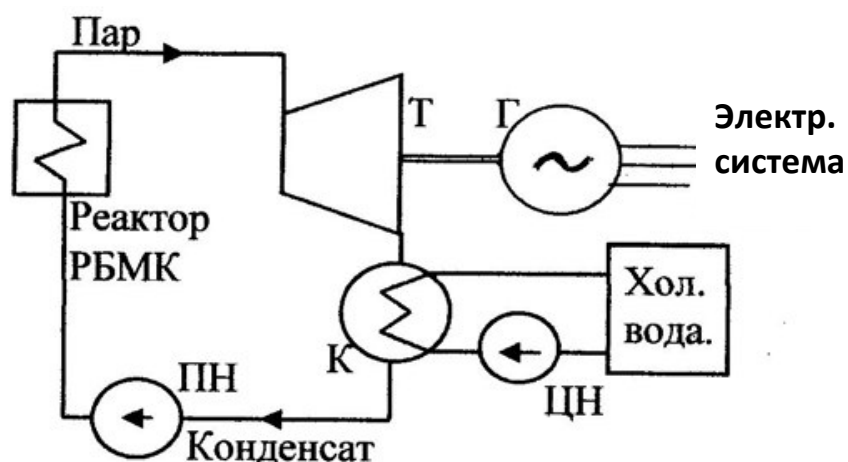


Рис. 9.4. Цикл АЭС с реактором типа РБМК.

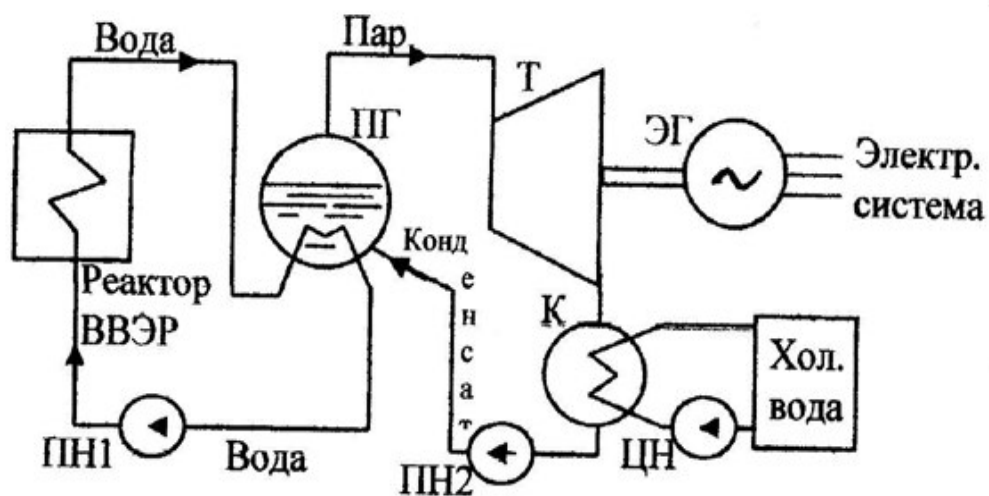


Рис. 9.5. Цикл АЭС с реактором типа ВВЭР.

Второй вариант атомных реакторов (рис. 9.5) 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 реактором ВВЭР показана на рис. 9.5. 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 контура, приняв тепло от воды первого контура, испаряется, и из парогенератора (ПГ) поступает в турбину (Т). Отработанный пар поступает в конденсатор (К), далее в виде конденсата подается питательным насосом (ПН2) в парогенератор. Реакторы типа ВВЭР характеризуются повышенной надежностью и безопасностью. Максимальная электрическая мощность таких реакторов достигает 1000 МВт.

Тепловую мощность реактора АЭС определяют по количеству теплоты, передаваемой теплоносителем в парогенератор из уравнения:

$$Q_{\text{АЭС}} = m \cdot (h_{2\text{T}} - h_{1\text{T}}), \quad (9.5)$$

где $Q_{\text{АЭС}}$ – тепловая мощность реактора АЭС, Вт; m – массовый расход теплоносителя через парогенератор, кг/с; $h_{2\text{T}}$ – удельная энтальпия теплоносителя на выходе из парогенератора, Дж/кг; $h_{1\text{T}}$ – удельная энтальпия теплоносителя при входе в парогенератор, Дж/кг.

Наибольшее влияние на общий КПД АЭС (достигает 17...36%) оказывает термический КПД парового цикла, который в настоящее время не имеет высоких значений.

Контрольные вопросы:

1. Как классифицируют электростанции в зависимости от источника энергии?
2. Какие типовые электростанции вы знаете?
3. Изобразите цикл Ренкина на перегретом паре в виде p - v и T - S диаграмм. Как можно повысить его термический КПД?
4. Каково влияние начальной температуры и начального давления пара на термический КПД цикла Ренкина?
5. Что дает теплофикационный цикл работы тепловых электростанций по сравнению с конденсационным циклом?
6. Изобразите принципиальную тепловую схему КЭС и ТЭЦ.
7. Какие энергетические показатели эффективности тепловых электростанций вы знаете? Расскажите о них.
8. Какие вещества применяются в реакторах АЭС для получения ядерной энергии?
9. Когда и где была построена первая атомная электростанция, какова у нее электрическая мощность?
10. Какие вещества применяются в реакторах АЭС в качестве теплоносителей?

Лекция 10.

ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ.

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.).

Состав ГЭС. В состав ГЭС входят:

1) 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 прохода ее через турбину, сброс воды помимо турбин при образовании ее излишков.

2) Далее в составе ГЭС выделяют гидромеханическое оборудование, состоящее из гидравлических турбин, спиральных камер, систем регулирования.

3) Наконец выделяют электрическую часть ГЭС, состоящую из электрических генераторов, как правило, расположенных на одном валу с турбиной, распределительных устройств.

По компоновке ГЭС делят на приплотинные, русловые и деривационные. Различают также горизонтальное расположение турбин и генераторов и вертикальное.

Рассмотрим ГЭС приплотинного типа, общий вид которой показан на рис. 10.1, а разрез одного из вариантов показан на рис. 10.2.

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:

$$H = \text{УВБ} - \text{УНБ} \quad (10.1)$$

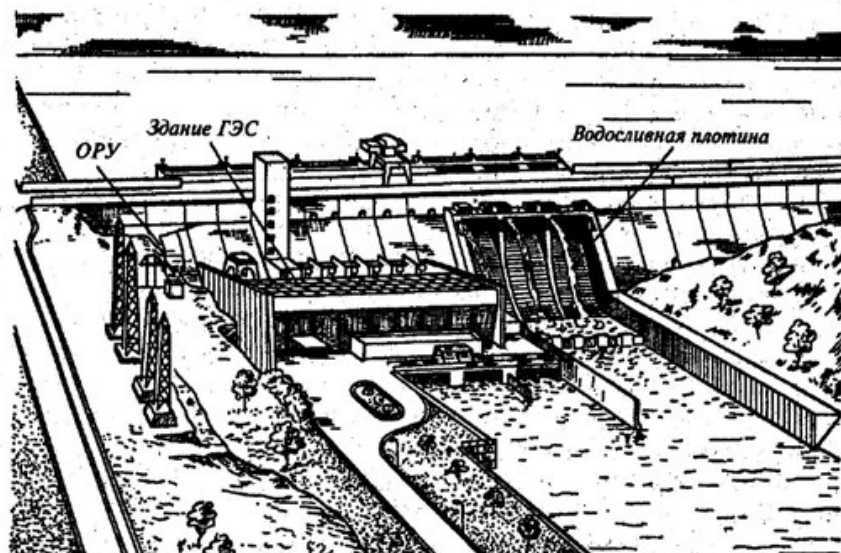


Рис. 10.1. Общий вид ГЭС приплотинного типа

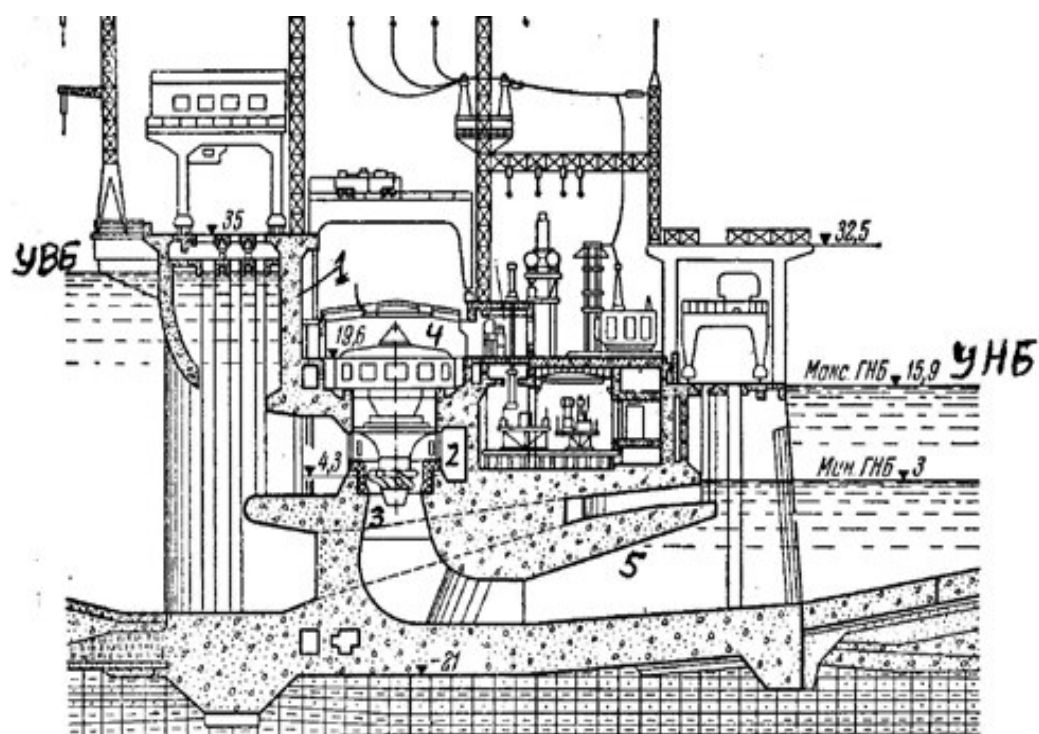


Рис. 10.2. Разрез гидроэлектростанции

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:

$$P = g \cdot Q \cdot \rho \cdot H \cdot \eta \quad (10.2)$$

где $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, Q – расход воды через турбину, $\text{м}^3/\text{с}$; ρ – плотность воды, кг/м^3 ; η – КПД турбины.

Например, $H = 28 \text{ м}$, $Q = 100 \text{ м}^3/\text{с}$, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\eta = 0.92$. Согласно формуле (10.2) получаем мощность ГЭС:

$$P = 9,81 \cdot 100 \cdot 1000 \cdot 28 \cdot 0,92 = 25270000 \text{ Вт} = 25,27 \text{ МВт}.$$

Формула (10.2) справедлива для расчета мощности ГЭС любых вариантов, приплотинных деривационных, ГАЭС и т.д.

Формула (10.2) следует из известного уравнения Д. Бернулли, которое описывает движение идеальной жидкости (жидкости, движущейся без трения, с небольшим допущением за таковую можно принять воду):

$$p + \frac{\rho \cdot v^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z = \text{const} . \quad (10.3)$$

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 (10.3) разделить на $\rho \cdot g$ и умножить на $\rho \cdot g \cdot W$, где W – объем воды в м^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:

$$\mathcal{E}_1 = \rho \cdot g \cdot W \cdot \left(\frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1 \right), \quad \mathcal{E}_2 = \rho \cdot g \cdot W \cdot \left(\frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + z_2 \right). \quad (10.4)$$

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

$$\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = \rho \cdot g \cdot W \cdot \left(z_1 - z_2 + \frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot g} \right). \quad (10.5)$$

При свободном движении воды статическое давление одинаковое ($p_1 = p_2$), также можно пренебречь разностью скоростей, тогда формула (10.5) упростится:

$$\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = \rho \cdot g \cdot W \cdot (z_1 - z_2) = \rho \cdot g \cdot W \cdot H . \quad (10.6)$$

Разделив обе части равенства (10.6) на время осуществим переход к расходу воды и соответственно к мощности. Если ввести еще величину КПД установки, то получим формулу (10.2).

Вода для ГЭС собирается в пределах водосбросного бассейна, именно он характеризует общий сток воды. При этом определяют расход воды в $\text{м}^3/\text{с}$. 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):

$$Q(t) = \sum_{i=1}^{i=N} q_i(t), \quad W = \int_{t_1}^{t_2} Q(t), \quad t_2 - t_1 = T \quad (10.7)$$

Здесь $Q(t)$ – 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 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.

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 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. 10.3, схематичный разрез ГЭС на рис. 10.4.

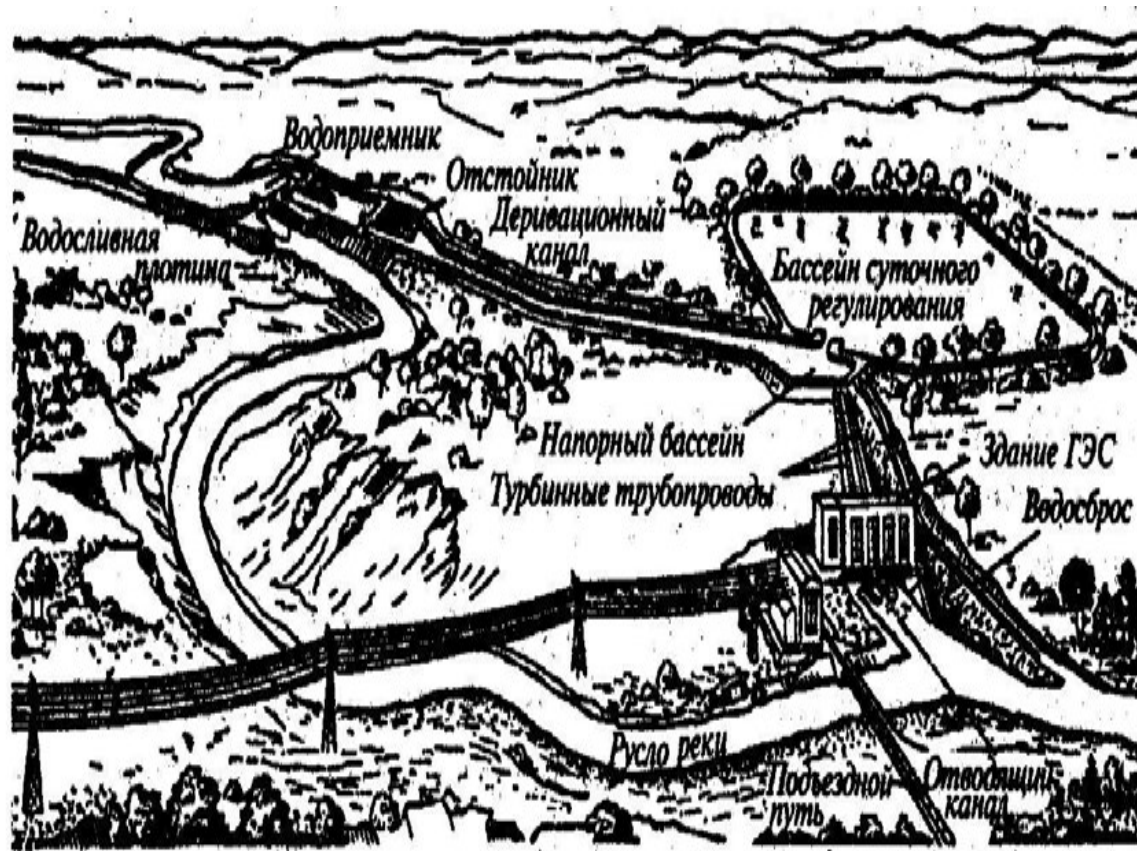


Рис. 10.3. Схема подвода воды деривационной ГЭС.

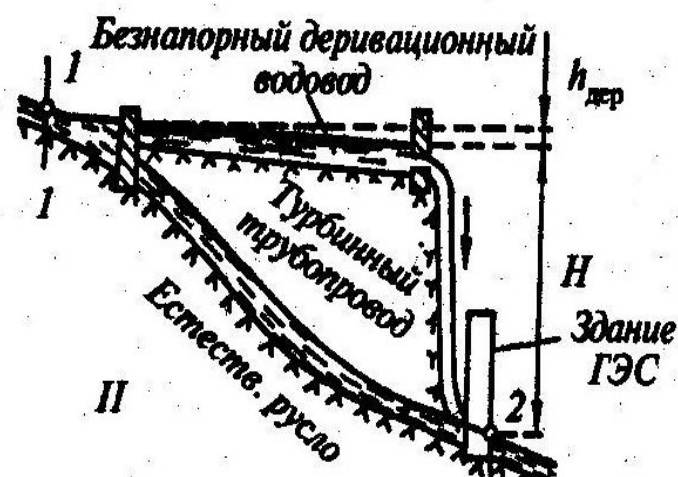


Рис. 10.4. Схематичный разрез деривационной ГЭС.

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. 10.5 в и з), 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).

Зависимость выбора типа турбины от величины напора прежде всего связана с явлением **кавитации**.

Это явление (кавитация) является следствием резкого падения давления 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.

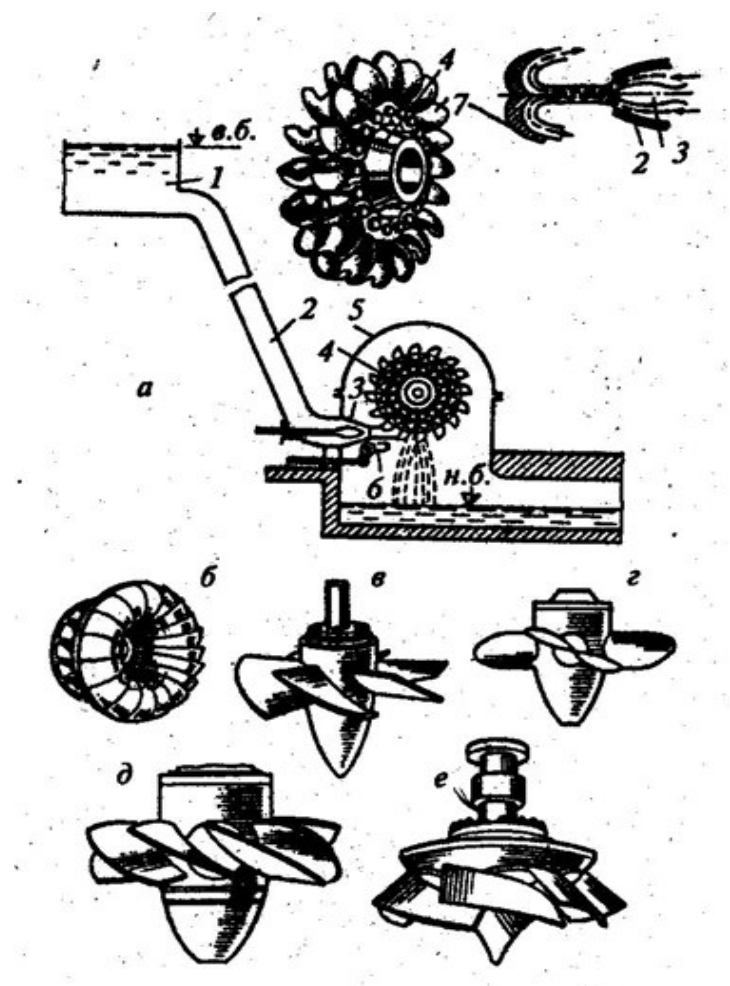


Рис. 10.5. Турбины ГЭС:

1 – верхний бьеф, 2 – трубопровод, 3 – сопло,
4 – рабочее колесо ковшевой турбины,
5 – кожух, 6 – регулировочная игла.
Здесь на рис. 10.5а также показана технология
использования ковшевой турбины.

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.

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.

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.

Гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС).
Принцип их действия показан на рис. 10.6.

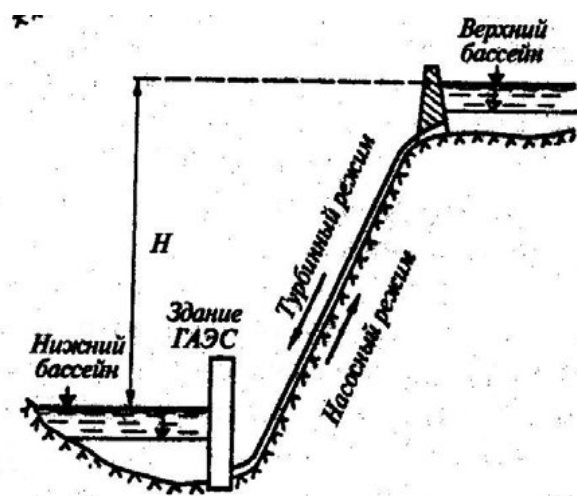


Рис. 10.6. Принцип работы ГАЭС.

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. С другой стороны потребляемая нагрузка изменяется в течение суток и 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:

$$\Delta W_{\text{ГАЭС}} < \Delta W_{\text{КЭС+ГАЭС}}. \quad (10.8)$$

В формуле (10.8) 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).

Сооружение приливных ГЭС (ПГЭС) 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. 10.7. 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.

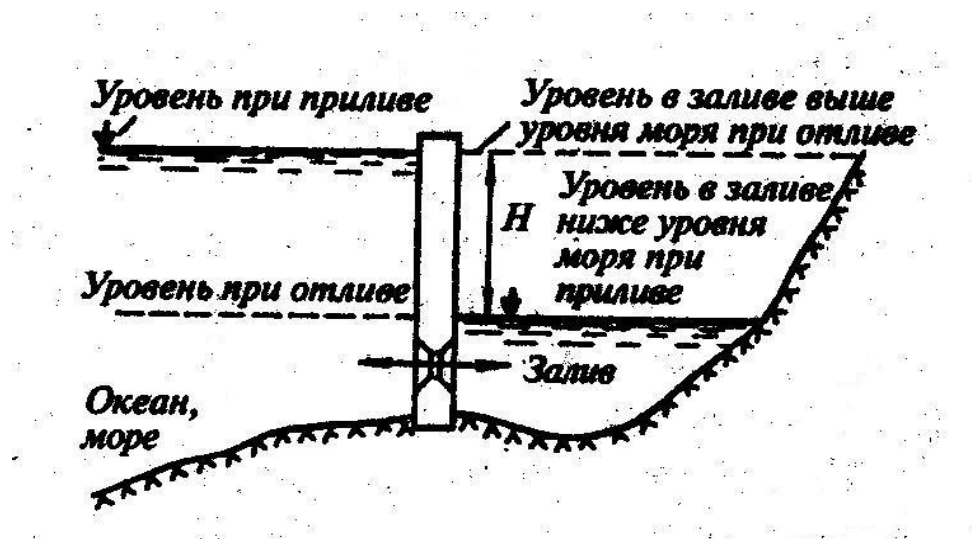


Рис. 10.7. Принцип работы ПГЭС.

Контрольные вопросы:

1. Какие виды гидроэлектростанций вы знаете?
2. Какое назначение гидротехнических сооружений ГЭС?
3. Что входит в состав гидромеханического оборудования и электрической части ГЭС?
4. Как классифицируют ГЭС по компоновке?
5. Объясните принципы работы приплотинной и деривационной ГЭС. Что из себя представляет напор приплотинной ГЭС?
6. Как вы понимаете явления «кавитация» и «гидравлический удар», какое влияние оказывает кавитация на состояние турбины ГЭС?
7. Объясните принцип работы ГАЭС, какие режимы работы ГАЭС вы знаете?
8. Объясните принцип работы приливной ГЭС.

Лекция 11.

ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА И СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА.

Ветровые электростанции (ВЭС).

ВЭС может состоять из одной, или нескольких ветровых энергетических установок (ВЭУ).

Существует два варианта конструкции ВЭУ: с горизонтальной осью и вертикальной осью (рис. 11.1). Первые более быстроходные, вторые более тихоходные. Наибольшее распространение получили ВЭУ с горизонтальной осью.

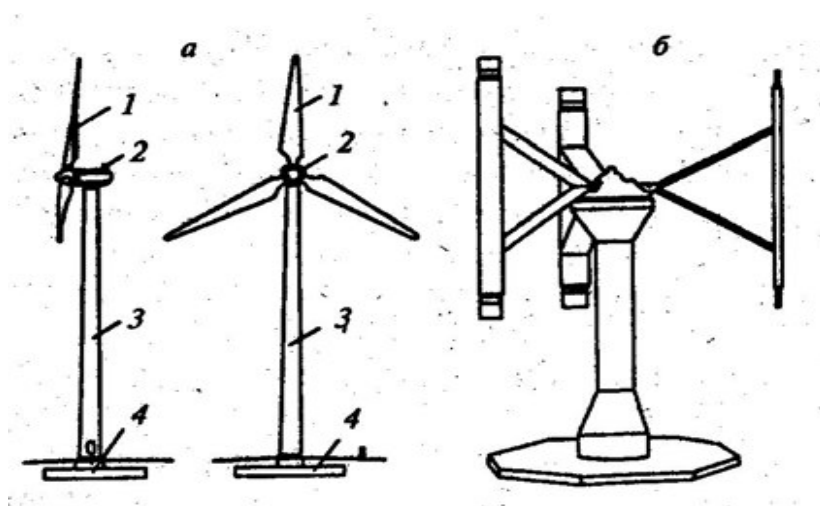


Рис. 11.1. Варианты конструкции ВЭУ:

- а) с горизонтальной осью вращения;
- б) с вертикальной осью вращения;
- 1 – рабочее колесо (ветроколесо);
- 2 – гондола; 3 – башня; 4 – фундамент.

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 оборотов в секунду до нескольких оборотов в секунду, и генератора, имеющего скорость вращения десятки оборотов в секунду. В качестве генераторов часто 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.

Удельная (отнесенная к 1 м^3 воздуха) кинетическая энергия ветрового потока (Дж/м^3) определяется по выражению:

$$E = \rho_{\text{в}} \frac{w^2}{2}, \quad (11.1)$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, кг/м^3 ;

w – скорость воздушного потока (ветра), м/с ;

Удельная мощность (Вт/м^2), которая переносится ветром в единицу времени через единичную площадь, перпендикулярную скорости ветра, рассчитывается по формуле:

$$P = E \cdot w = \frac{1}{2} \rho_{\text{в}} \cdot w^3. \quad (11.2)$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, кг/м^3 ;

w – скорость воздушного потока (ветра), м/с ;

Полная мощность (Вт) стационарного ветрового потока, проходящего через площадь A (м^2), перпендикулярную скорости ветра, составит:

$$N = P \cdot A = E \cdot w \cdot A = \frac{1}{2} \rho_{\text{в}} \cdot w^3 \cdot A. \quad (11.3)$$

В свою очередь, площадь ометаемая рабочим колесом ВЭУ, рассчитывается по выражению:

$$A = \frac{\pi D^2}{4}, \quad (11.4)$$

где D – диаметр лопасти ветроколеса, м .

С учетом выражений (11.1–11.4), расчетная мощность ВЭУ с горизонтальным валом может быть рассчитана следующей формулой:

$$N_{\text{ВЭУ}} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot P \cdot \eta_{\text{ВЭУ}} = \frac{\pi}{8} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot D^2 \cdot w^3 \cdot \eta_{\text{р}} \cdot \eta_{\text{г}} \cdot \xi, \quad (11.5)$$

где P – удельная мощность ветрового потока, Вт/м^2 ;

$\eta_{\text{ВЭУ}}$ – КПД ветроэнергетической установки, определяемая как:

$$\eta_{\text{ВЭУ}} = \eta_{\text{р}} \cdot \eta_{\text{г}} \cdot \xi, \quad (11.6)$$

$\eta_{\text{р}}$ – КПД ротора, включая редуктор; $\eta_{\text{г}}$ – КПД генератора, включая все преобразователи; ξ – доля мощности, получаемая ветродвигателем от потока (коэффициент мощности).

В примере рассчитаем мощность ВЭУ при двух скоростях ветра:

$$w_{\text{min}} = 4 \text{ м/с}, w_{\text{max}} = 20 \text{ м/с}.$$

Для дальнейших расчетов примем:

Диаметр ветроколеса $D = 10 \text{ м}$; плотность воздуха $\rho_{\text{в}} = 1,226 \text{ кг/м}^3$; КПД ротора, включая редуктор $\eta_{\text{рот}} = 0,9$; КПД генератора, включая все преобразователи $\eta_{\text{ген}} = 0,9$; коэффициент мощности $\xi = 0,45$ (значения этой величины лежат в пределах $0,4 \dots 0,5$).

Вычисления по формуле (11.5) дают следующие значения:

$$N_{\text{ВЭУ}}^{\text{min}} = \frac{3,14}{8} \cdot 1,226 \cdot 10^2 \cdot 4^3 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,45 = 1,123 \text{ кВт}$$

$$N_{\text{ВЭУ}}^{\text{max}} = \frac{3,14}{8} \cdot 1,226 \cdot 10^2 \cdot 20^3 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,45 = 14,032 \text{ кВт}.$$

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

Одним из существенных недостатков ВЭС является полная зависимость выдаваемой мощности от скорости ветра, величина которой имеет вероятностный характер. Поэтому практически ВЭС могут работать только с другими, желательно мобильными источниками электроэнергии. Пример комбинированного использования ВЭУ и солнечной батареи (фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии) представлен на рис. 11.2.

Хорошее сочетание получается при соединении ГЭС, имеющей водохранилище, и ВЭС, соизмеримой мощности. При наличии ветра ГЭС накапливает воду в водохранилище, при отсутствии ветра ГЭС срабатывает накопленную воду.



Рис. 11.2. Комбинированное использование ветровой и солнечной энергии:
1 – ВЭУ с горизонтальной осью вращения;
2 – фотоэлектрический преобразователь солнечной энергии.

Самая крупная в свое время ВЭС была построена в 1931 году в Крымском полуострове. В США около 5% всей энергии, потребляемой на нужды сельского хозяйства, приходится на энергию ветра. Ведутся работы по созданию ВЭУ средней (40...250 кВт) и большой (более 250 кВт) мощности, рассчитанных на работу при скорости ветра 9...11 м/с.

Солнечная энергетика, солнечные электростанции.

Существует несколько вариантов преобразования солнечной энергии в электрическую.

Первый вариант: Для преобразования солнечной радиации в электрическую энергию в промышленных масштабах служит модификация обычной ТЭС, работающей по циклу Ренкина, в которой вместо парового котла на органическом топливе для получения и перегрева водяного пара

используются концентраторы солнечной энергии и вакуумные коллекторы солнечного излучения.

Солнечные тепловые электростанции (СТЭС) содержат все обычные для тепловой электростанции агрегаты: турбину, электрогенератор, конденсатор, питательный насос, насосы охлаждающей воды и т.д.

Конструктивно СТЭС бывают двух типов: **башенные и модульные**. В башенной СТЭС имеется центральный приемник солнечных лучей, устанавливаемый на специальной башне и воспринимающий сконцентрированные солнечные лучи, направляемые на него системой гелиостатов (рис. 11.3,а). Гелиостаты располагаются под башней и автоматически поворачиваются вслед за Солнцем. Каждый такой гелиостат содержит сотни специально ориентированных зеркал, направляющих падающие на них солнечные лучи на поверхность центрального приемника. Гелиостаты устанавливаются с северной стороны башни или вокруг нее.

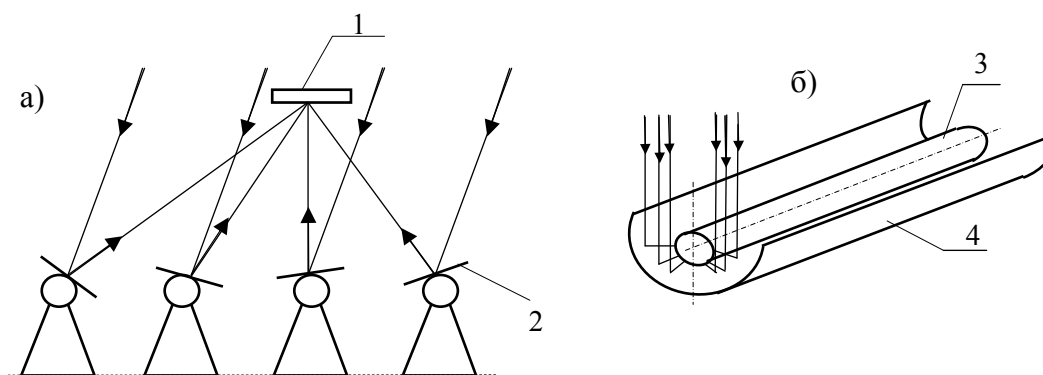


Рис. 11.3. Зеркальные концентраторы солнечной радиации:
1 – солнечный коллектор; 2 – зеркало; 3 – вакуумный коллектор;
4 – параболоцилиндрический концентратор.

СТЭС модульного типа состоят из большого числа включаемых параллельно или последовательно одностипных модулей, представляющих собой концентраторы параболоцилиндрической формы (рис. 11.3,б), в трубках которых испаряется и перегревается рабочее тело, а образующийся пар направляется затем на турбину.

Отличительной особенностью СТЭС является обязательное применение аккумуляторов тепловой или электрической энергии, что обеспечивает непрерывное функционирование станции в ночное время или в непогоду.

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП)

Второй путь использования солнечной энергии связан с использованием фотоэлектрических преобразователей (солнечные элементы) на основе кремния (КПД 8 – 24%). При этом различают солнечные элементы: монокристаллические (КПД 15 – 24 %), поликристаллические (КПД 12 – 16 %), аморфные (КПД 8 – 14 %), на основе арсенида галлия (соединение мышьяка с галлием) с КПД 30 % и более.

Солнечный элемент (ФЭП) – устройство, состоящее из тонких (примерно 50 мкм) пленок кремния или других полупроводниковых материалов и реализующих так называемый внутренний фотоэффект. Суть внутреннего фотоэффекта состоит в том, что при попадании

электромагнитного излучения (в нашем случае световых и инфракрасных волн) на полупроводниковый материал с *p-n* проводимостью в нем поглощаются фотоны и возникает ЭДС, способная стать источником тока для любых внешних нагрузок (рис. 11.4).

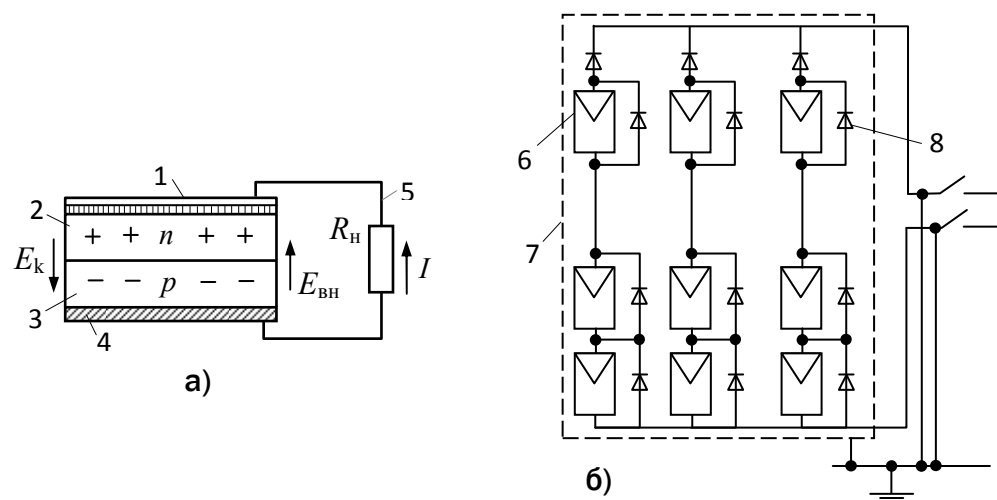


Рис. 11.4. Устройство солнечной батареи:

а) солнечный элемент-ФЭП; б) солнечный модуль.

- 1 – пленка диоксида кремния; 2 – электрод с *n*-проводимостью;
3 – электрод с *p*-проводимостью; 4 – контактная пластина;
5 – выходные контакты; 6 – солнечный модуль;
7 – солнечная батарея; 8 – шунтирующий диод.

Зависимость тока солнечного элемента от его напряжения при заданной величине мощности потока солнечного излучения описывается вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Характерными точками ВАХ (рис. 11.5) являются точка пересечения кривой ВАХ с осью напряжений, называемая напряжением холостого хода (U_{xx}) и точка пересечения с осью токов, называемая током короткого замыкания ($I_{кз}$).

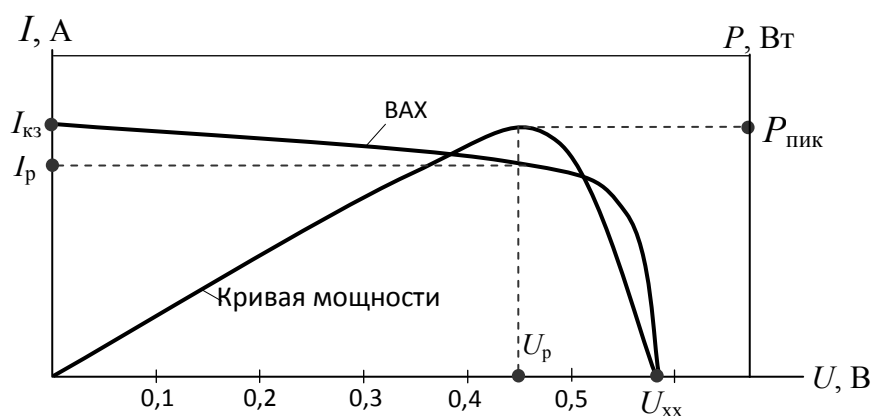


Рис. 11.5. Вольт-амперная характеристика и кривая мощности ФЭП

Напряжение холостого хода, генерируемое одним солнечным элементом, составляет около 0,6 В и не зависит от размеров элемента. В то время как ток короткого замыкания, а соответственно и рабочий ток

солнечного элемента, прямо пропорциональны интенсивности поступающего излучения и размеру солнечного элемента, то есть площади его лучевоспринимающей поверхности.

Поскольку солнечные элементы по геометрическим размерам невелики, то их полезная мощность также невелика. Наиболее характерны для существующих на практике солнечные элементы следующие значения U и I : порядка 0,47 В и 0,02 А/см² или порядка 1,5 А для солнечного элемента в целом, соответственно мощность около 0,75 Вт.

Для получения большего напряжения с соответствующим увеличением мощности, солнечные элементы соединяют последовательно, создавая солнечные модули. Для получения солнечной батареи еще большей мощности обычно создают линейки последовательно соединенных солнечных модулей и их соединяют параллельно (рис. 11.4, б).

Обычно при последовательном соединении 36 солнечных элементов получают стандартный солнечный модуль с значением рабочего напряжения около 16...17 В (0,45...0,47 В на элемент) при 25°C. Такой запас по напряжению по сравнению с напряжением полного заряда (14,4 В) применяемых совместно с солнечным модулем аккумуляторных батарей (АКБ) необходим частично для того, чтобы компенсировать потери в контроллере заряда-разряда АКБ, а в основном – снижение рабочего напряжения солнечного модуля при его нагреве излучением. Так, в реальных условиях работы солнечные модули разогреваются до температуры 60...70°C, что соответствует смещению точки рабочего напряжения, к примеру, для солнечного модуля с рабочим напряжением при 25°C $U_p = 17$ В до $U_p = 13,7...14,4$ В при 60°C.

Контрольные вопросы:

1. Как устроена ветроэлектрическая станция, из каких основных узлов она состоит?
2. По каким причинам ветроэнергетические установки с горизонтальной осью вращения ветроколеса получили наибольшее распространение?
3. Как рассчитать удельную кинетическую энергию ветрового потока, его удельную мощность и полную мощность ветрового потока?
4. Приведите формулу для расчета мощности, развиваемой ВЭУ, и объясните её.
5. Какой принцип работы и устройство солнечных тепловых электростанций?
6. Какой принцип работы фотоэлектрического преобразователя солнечной энергии, как он устроен и какой у них КПД?
7. Что отражает вольт-амперная характеристика солнечного элемента?
8. Какие вещества применяются для изготовления фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии?

Лекция 12.

ОСНОВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

ТЭС по виду отпускаемой энергии делят на конденсационные электростанции (КЭС), на которых вырабатывается только электрическая энергия, и теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), служащие для получения как электрической энергии, так и теплоты. ТЭЦ обычно представляет из себя паротурбинную электростанцию, ТЭС с газотурбинными установками называют газотурбинными электростанциями (ГТЭС).

Основное оборудование ТЭС включает: котельную установку с паровым котлом, преобразующим энергию топлива в энергию водяного пара; паровую турбину, преобразующую энергию водяного пара в механическую энергию, передаваемую через вал электрогенератору; конденсатор, в котором отработанный пар конденсируется.

Котельные установки, в зависимости от назначения бывают: энергетические (используются на ТЭС для выработки электроэнергии), отопительные (для целей отопления и горячего водоснабжения) и производственные (для технологического паро- и водоснабжения). В общем случае котельная установка включает в себя паровой или водогрейный котел (котельный агрегат) и вспомогательное оборудование.

Технологическая схема котельной установки показана на рис. 12.1, где представлены обозначения и назначение элементов котельной установки:

Паровой (энергетический) котел является основным элементом котельного агрегата и представляет собой теплообменное устройство, через металлическую поверхность которого происходит передача тепла от горячих продуктов горения топлива воде для получения насыщенного пара. Основные характеристики паровых котлов: паропроизводительность (D , кг/с), давление пара, температура пара и питательной воды.

Классификация паровых котлов:

- 1) по виду используемого топлива (газотопные, угольные и т.д.);
- 2) по производительности (малые котлы – паропроизводительность до 25 т/ч; средней мощности до 220 т/ч; большой мощности свыше 220 т/ч;
- 3) по давлению пара, которое котел может обеспечить (низкого давления – до 1,4 МПа; среднего давления – до 4 МПа; высокого давления – до 14 МПа и котлы работающие на сверх критических параметрах пара (до 26 МПа).
- 4) по конструктивному выполнению – прямоточные и барабанные. У первых пар, после его образования сразу, непосредственно поступает к потребителю пара. Используются в качестве источников пара на котлах небольшой мощности не очень часто. Чаще используются на мощных котельных агрегатах. Барабанные котлы имеют специальный резервуар, именуемый барабаном, где происходит разделение воды и пара, накопление определенного объема пара.

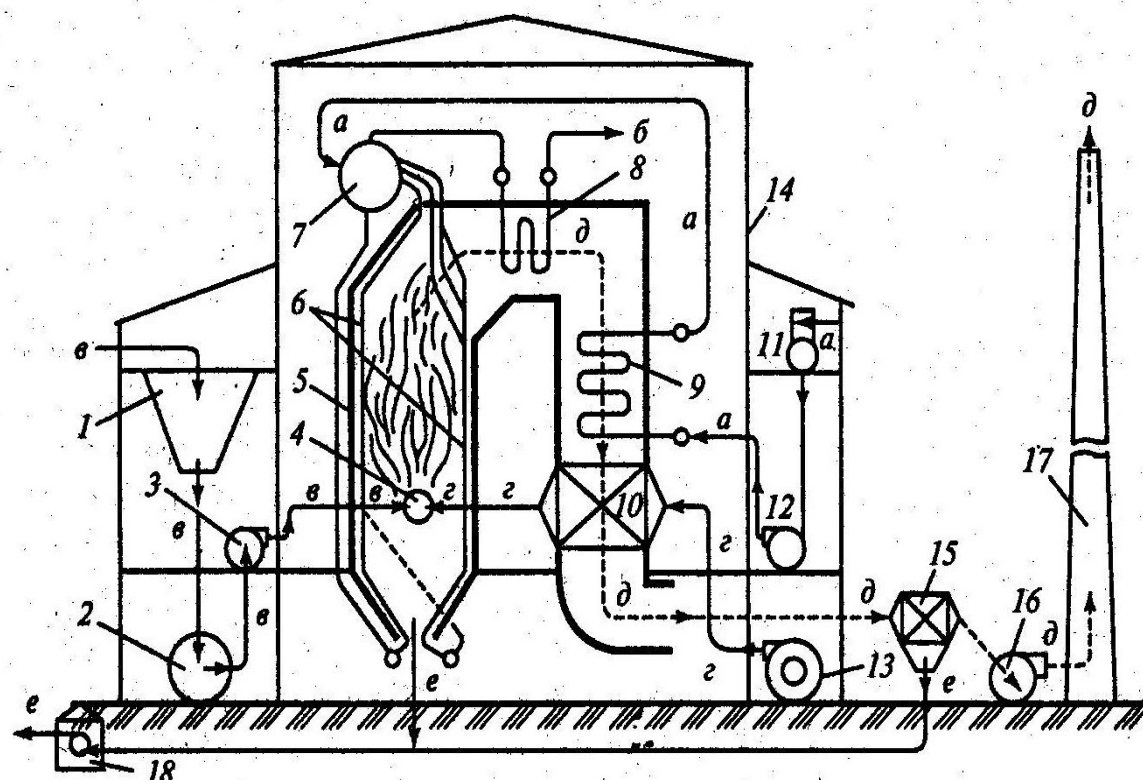


Рис. 12.1. Схема котельной установки:

1 – бункер угля; 2 – мельница для размалывания угля (в результате получается угольная пыль); 3 – вентилятор (подает пылевидное топливо к горелкам); 4 – горелки (к ним подается с одной стороны топливо, с другой подается воздух; производится их смешивание и на выходе горелки поджиг топливо-воздушной смеси); 5 – топка котла; 6 – экранные трубы (покрывают внутреннюю часть топки со всех сторон. Экранные трубы принимают теплоту факела и топочных газов конвективным 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 температуры и влажности пара до требуемых значений. Пар, поступающий в турбину должен быть сухой, с температурой в пределах 400 – 650°C); 9 – водяной экономайзер (для предварительного подогрева питательной воды в барабан котла уходящими газами с температурой около 260°C); 10 – воздухоподогреватель (для подогрева воздуха перед подачей его в горелки); 11 – бак питательной воды (имеет деаэрационное устройство 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; 15 – устройство очистки дымовых газов от золы и других веществ, которые нельзя выбрасывать в атмосферу; 16 – дымосос, обеспечивает движение дымовых газов в дымовую трубу; 17 – дымовая труба, ее назначение заключается в выбросе дымовых газов в атмосферу; 18 – багерный насос, осуществляет золоудаление.

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

КПД парового котла представляет собой отношение полезно используемой теплоты $Q_{\text{исп}}$ к располагаемой теплоте $Q_{\text{топл}}$:

$$\eta_k = \frac{Q_{\text{исп}}}{Q_{\text{топл}}} \cdot 100\% . \quad (12.1)$$

Здесь располагаемая теплота $Q_{\text{топл}}$ включает в себя низшую теплоту сгорания топлива; теплоту вносимую в топку топливом; теплоту воздуха, поступающего в воздухоподогреватель. КПД современных энергетических котлов лежит в пределах 90 – 95%.

Паровые турбины.

Паровыми турбинами называются тепловые двигатели, в которых потенциальная энергия пара сначала преобразуется в кинетическую энергию струи, а затем энергия струи – в механическую работу вращения вала.

В зависимости от способа преобразования потенциальной энергии пара в механическую работу различают **активные и реактивные турбины**. В обоих типах турбин острый пар поступает сначала в сопла, где происходит его расширение и преобразование заключенной в нем потенциальной энергии в кинетическую энергию струи. Законы, по которым происходит этот процесс, изучаются в теории истечения. В этих турбинах механическая работа вращения вала вырабатывается на рабочих лопатках, жестко скрепленных дисками, насаженными на вал. Однако, рабочий процесс на лопатках активных турбин существенно отличается от рабочего процесса на лопатках реактивных турбин.

Схема простейшей активной турбины показана на рис. 12.2. Такой принцип действия турбин был известен ещё в глубокой древности, правда, реализовался он в виде водяного колеса, вращаемого течением потока воды.

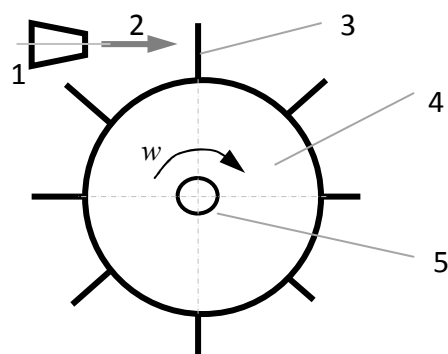


Рис. 5.2. Простейшая активная турбина:

- 1 – сопло;
- 2 – водяной пар;
- 3 – лопатки;
- 4 – рабочее колесо (диск);
- 5 – вал турбины

Обычно поток пара или газа подводится не сверху и перпендикулярно оси турбины, а сбоку, под острым углом к плоскости вращения. Поток подаётся через направляющий аппарат в виде расположенных по окружности неподвижных сопл (сопловая решётка). Выходящие из сопл струи пара попадают на лопатки рабочего колеса, сидящего на валу турбины. Ротор турбины вращается на подшипниках в корпусе машины, а сопловые аппараты соединены с корпусом и при работе турбины остаются неподвижными.

Обычно сопловые каналы организуются с помощью специальных сопловых лопаток, устанавливаемых по всей окружности диска, который называют диафрагмой. Диафрагма имеет горизонтальный разъем, а в центре её имеется отверстие диаметром d , через которое проходит вал турбины. Сечение по среднему диаметру лопаток D называют сопловой решёткой. Форма сопловых лопаток такова, что между ними образуются суживающиеся сопла, в которых происходит разгон потока пара. В отдельных случаях может применяться сопло Лавалля, позволяющее разгонять пар до сверхзвуковых скоростей.

Роторы турбин выполняются или дискового типа, когда рабочие лопатки устанавливаются на специальных дисках, соединённых с валом, или барабанного типа, когда лопатки монтируются на сплошном (или полом) барабане вала.

Турбины, в которых весь располагаемый теплоперепад преобразуется в кинетическую энергию потока в соплах, а в каналах между лопатками расширения и разгона газа не происходит, называются **активными**. В активной турбине проходное сечение канала между лопатками турбины делается постоянным, и скорость и давление пара там не меняются.

В реактивных турбинах используется также реактивная сила вытекающего из сопла потока. В чистом виде – это авиационные турбореактивные двигатели, толкающие самолёт вперёд при выбрасывании продуктов сгорания в атмосферу через сопло. Однако к реактивным относят любые турбины, у которых располагаемый теплоперепад преобразуется в кинетическую энергию потока не только в сопловом аппарате, но и в каналах между рабочими лопатками. Для этого профиль рабочих лопаток делается таким, что проходное сечение не постоянно, а уменьшается. В реактивных турбинах расширение пара протекает как бы в два этапа: вначале в сопловом аппарате, а затем и в межлопаточных каналах рабочего колеса.

Отношение теплоперепада на рабочих лопатках Δh_d к располагаемому теплоперепаду называют **степенью реактивности** турбины:

$$\Omega = \frac{\Delta h_d}{\Delta h_t} . \quad (12.2)$$

При $\Omega = 1$ – чисто реактивная ступень, при $\Omega = 0$ – чисто активная ступень. Чаще всего энергетические турбины имеют $\Omega = 0,5$.

При $\Omega = 0,5$ сопловые и рабочие лопатки имеют одинаковый профиль и форму. Поэтому от ступени к ступени увеличивают только высоту лопаток, так как при расширении в соплах объём пара увеличивается.

По назначению турбины бывают следующих типов (серий): К – конденсационные (весь отработанный пар направляется в конденсатор для передачи мощности через вал электрическому генератору с последующей выработкой электрической энергии); П – конденсационные с отбором пара для промышленного потребления; Т – с отбором пара на теплофикацию; ПТ – с двумя регулируемыми отборами пара (потребителю и на теплофикацию); Р – с противодавлением на выходе из установки (работающие только на отборе пара, именно этот отбор обеспечивает объём пара, проходящий через проточную часть турбины и следовательно мощность на ее валу); ПР – с

производственным отбором и противодавлением; ТР – теплофикационные с противодавлением.

Обозначения паровых турбин: указывается серия, затем электрическая мощность генератора в МВт, и давление пара (в атм) 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. 12.2 показана в разрезе паровая турбина мощностью 50 МВт со скоростью вращения 3000 оборотов в минуту (К-50-130).

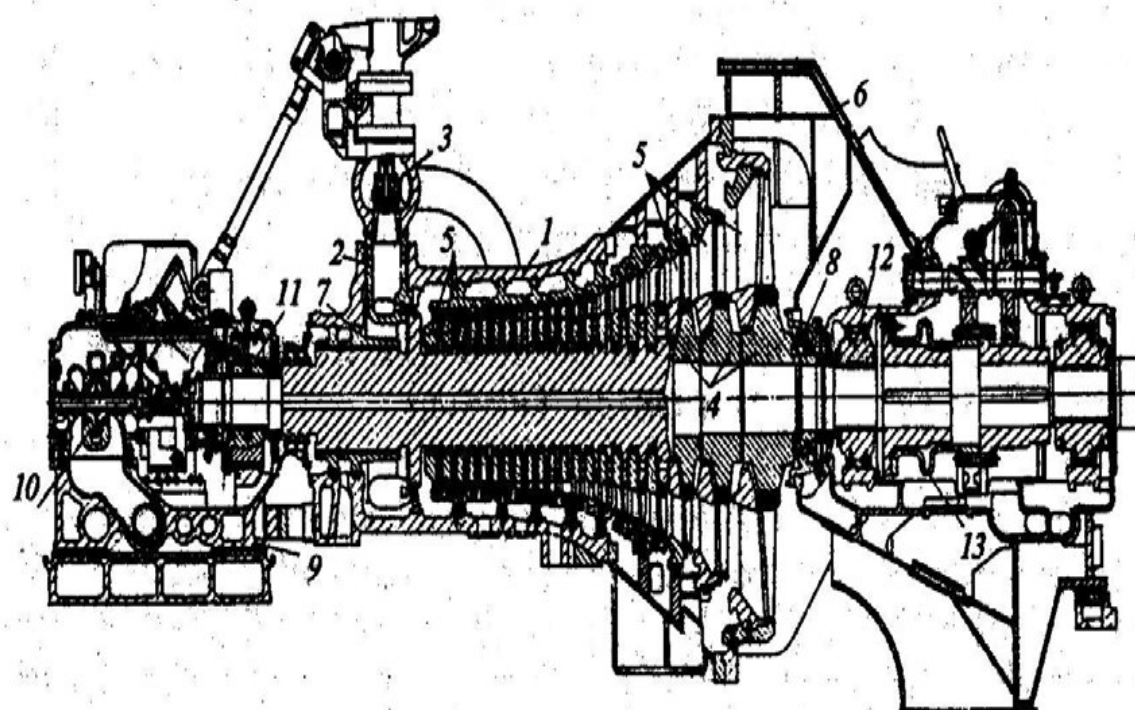


Рис. 12.3. Паровая турбина:

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, последние ступени имеют рабочие колеса большого диаметра, поскольку должны пропускать большие объемы пара при низком (относительно) давлении. Они образуют часть низкого давления). 5 – неподвижные диафрагмы, в которых размещены сопловые решетки; 6 – выхлопной патрубок турбины, отводящий отработанный пар в конденсатор; 7 – переднее концевое уплотнение (для предотвращения утечки пара из цилиндра); 8 – заднее концевое уплотнение (для предотвращения присоса воздуха из атмосферы); 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.

Необходимый элемент ТЭС, работающей по циклу Ренкина – **конденсатор** (рис. 12.4). 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, который и создается при конденсации пара.

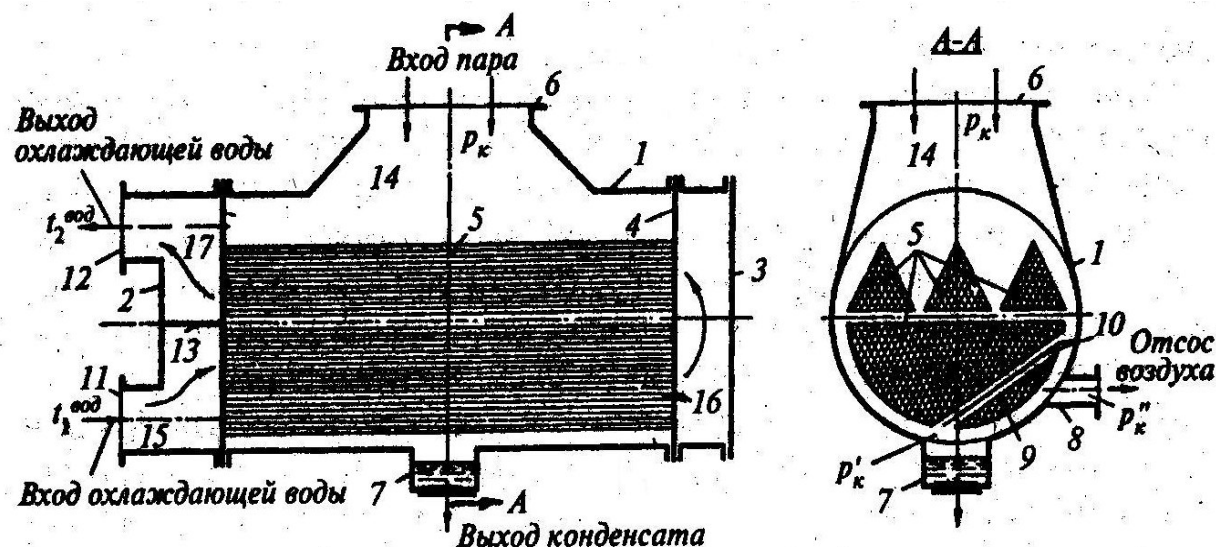


Рис. 12.4. Принципиальная схема конденсатора:

1 – корпус конденсатора; 2,3 – крышки конденсатора с трубной доской; 4 – вторая трубная доска, к трубным доскам прикреплены трубы, по которым проходит охлаждающая вода; 5 – прямые охлаждающие трубы; 6 – фланец прикрепленный к выходу турбины, через который отработанный пар поступает из турбины в конденсатор; 7 – место сбора конденсата; 8 – патрубок для отсоса воздуха и несконденсированного пара; 9 – отделенная часть трубной поверхности, предназначенная для интенсивного охлаждения пара; 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.

Контрольные вопросы:

1. Какие узлы включает основное оборудование ТЭС?
2. Какие виды котельных установок вы знаете?
3. Что из себя представляет паровой котел и какие у него основные характеристики?
4. Как классифицируются паровые котлы?
5. Какие бывают по назначению паровые турбины? Чем отличаются активные и реактивные паровые турбины?
6. Объясните устройство и принцип работы конденсатора.

Лекция 13.

СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ. ОСНОВНОЕ ТЕПЛОФИКАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ.

Системой теплоснабжения называют совокупность устройств по получению, транспортировке и использованию тепловой энергии.

Системы теплоснабжения классифицируют следующим образом:

- 1) по виду применяемого теплоносителя (водяные, паровые);
- 2) в зависимости от размещения источника теплоснабжения (централизованное; децентрализованное);
- 3) по наличию или отсутствию забора теплоносителя из сети (открытые и закрытые системы). В открытых системах теплоноситель из тепловой сети частично или полностью разбирается на горячее водоснабжение или технологические нужды. В закрытых системах теплоноситель (вода или пар) из сети не отбирается, а в полном объеме возвращается к источнику теплоснабжения;
- 4) по способу присоединения потребителей теплоты (отопительных приборов и др.) к тепловой сети: зависимые и независимые. В зависимых системах теплоноситель из системы непосредственно подается в отопительные приборы или другие теплоиспользующие аппараты, а в независимых системах теплоноситель из сети подается в водоподогреватель, нагревающий воду, которая затем уже используется в отопительных устройствах;
- 5) по числу труб в тепловых сетях (однотрубные, двухтрубные, трехтрубные). Однотрубная система является разомкнутой. Поступающая в этом случае по подающему трубопроводу горячая вода или пар используются на отопление и горячее водоснабжение без возврата их к источнику теплоснабжения. В двухтрубных системах одна труба служит для подачи теплоносителя к потребителю, а другая – для возврата отработавшего теплоносителя (обратной воды или конденсата) в котельную. В трехтрубных системах две трубы служат для подачи теплоносителя к потребителю, а третья – для возврата отработавшего теплоносителя в котельную.

Качество тепловой энергии должно быть таким, чтобы у потребителя при потреблении ее реализовались требуемые условия: при отоплении - необходимая температура нагревательных приборов, вентиляции - температура воздуха, на паровых машинах - требуется механическая мощность, в технологических процессах - вывод соответствующей продукции (например, количество и качество бетонных или керамических изделий). Поэтому с точки зрения потребителя тепловая энергия должна иметь показания по следующим параметрам: **температура** теплоносителя (обычно воды или пара); **давление** (особенно пара); **расход теплоты** и общее количество теплоты.

Температура измеряется различными термометрами, давление - манометрами. Расход теплоты в системе теплоснабжения измеряется тепломером (счетчик тепловой энергии). Его действия основано на уравнении теплового баланса: потребленная энергия равна подведенной в

прямом трубопроводе минус возвращенная в обратный трубопровод (если не возвращается, то минус состояние при температуре окружающей среды). Следовательно, расход теплоты равен произведению расхода теплоносителя, его теплоемкости, разности температур теплоносителя на входе и выходе у потребителя. Поэтому тепломер представляет собой расходомер воды (пара), в котором учитывается указанная разность температур. Конструкции тепломеров различны. Обычно приборы учета потребления теплоты потребителем находятся в тепловых пунктах, их обслуживает жилищно-коммунальная служба.

Необходимо также учитывать расход топлива. Если расход газа и нефти определяется достаточно точно известными типами расходомеров, то данные по расходу твердого топлива (уголь, торф, дрова) менее точны.

Тепловая энергия с точки зрения потерь при транспорте намного сложнее. Основное количество теплоты транспортируется в холодное время года, т.е. при значительной разности температур теплоносителя и окружающей среды; эта разность обуславливает величину потерь. Коэффициент теплоотдачи от элементов теплопередающей системы в окружающую среду даже нормативный, проектируемый составляет существенную величину: от 8 до 35 Вт/(м²·К), в условиях эксплуатации он может быть еще выше. Если путь теплоносителя к потребителю несколько километров, доля потерь теплоты по отношению к исходному ее количеству может составлять 20...60%.

Тепловой сетью называется система трубопроводов, по которым тепловая энергия в виде горячей воды или пара транспортируется от ТЭЦ или котельных к потребителям.

Тепловая энергия распределяется при помощи водных тепловых сетей:

- * Прямой ток: давление 4...10 атм., температура 90...200°С ;

- * Обратный ток: давление 2...4 атм., температура 70°С;

Тепловые сети бывают: магистральные (по главным направлениям населенного пункта), распределительные (внутри кварталов), ответвления (подвод к домам),

Тепловые сети делятся на водяные (прямая и обратная трубы) и паровые (паропровод и конденсатопровод), используются стальные трубы от 20 до 600 мм диаметром, покрытые теплоизоляцией. Эти трубы находятся в проходных каналах (одновременно с другими инженерными коммуникациями), в непроходных каналах (обычно коробчатой конструкции из бетонных блоков), или в виде бесканальной прокладки. Чем длиннее трубы (больше радиус действия тепловых сетей), тем больше энергии на прокачку теплоносителя, больше тепловые потери. Поэтому радиус ограничен до 10 км. Для последующих потребителей требуется уже другой источник теплоты.

По ходу теплоносителя устраиваются специальные камеры, колодцы (задвижки, вентили, манометры), компенсаторы ("П" - образные, линзовые, сальниковые), стойки, фиксаторы и т.д., увеличивающие теплотери. Особенно велики теплотери при открытой прокладке труб (так называемые "воздушные" тепловые сети), требуется большие расходы на теплоизоляцию.

Плохая эксплуатация (открытые люки, поврежденная изоляция, влажность, сквозняки и т.д.) увеличивает теплопотери.

Вода нагревается в водогрейном котле ТЭЦ или котельной (или в специальных подогревателях) и насосом подается в тепловую сеть города. Неплотности по трассе, в сальниках насосов ведут к утечкам горячей воды. Температура горячей воды из централизованного теплоисточника колеблется от 90 до 200°C. От теплоносителя вода возвращается с расчетной температурой 70°C. При меньшей обратной температуре: а) необходимы большие размеры нагревательных приборов у потребителей; б) корродируют трубы котлов из-за конденсации водяных паров из продуктов сгорания.

Пар образуется в парогенераторах и с давлением 1,5...2 атм поступает в паровую тепловую сеть; в нагревательных приборах потребителя он конденсируется, остывает и возвращается на ТЭЦ или котельную.

Место подсоединения теплопотребителя к тепловой сети (ввод), называется **тепловым пунктом**, они подразделяются на индивидуальные – **ИТП** (для присоединения систем отопления, вентиляции, горячего водоснабжения отдельного здания) и центральные – **ЦТП** (два и более здания).

В тепловых пунктах устанавливается оборудование для преобразования вида теплоносителя или его параметров, контроля параметров, регулирования расхода теплоносителя и его распределения, защиты от аварийного повышения параметров, заполнения и подпитки систем, сбора и возврата конденсата, аккумулирования теплоты, водоподготовки для горячего водоснабжения.

Различные варианты присоединения потребителя к закрытой двухтрубной водяной системе теплоснабжения показаны на рис. 13.1.

В схеме, изображенной на рисунке 13.1а, в отопительные приборы поступает вода непосредственно из подающего трубопровода системы теплоснабжения. В схеме, показанной на рисунке 13.1б, вода из системы теплоснабжения вначале поступает в элеватор 2, смешивается в нем с обратной водой, выходящей из отопительных приборов, и эта смесь поступает уже в отопительные приборы. Такая схема позволяет использовать более горячий теплоноситель в подающем трубопроводе, что при одном и том же расходе теплоносителя дает возможность транспортировать по тепловой сети больший тепловой поток.

На схеме, показанной на рисунке 13.1в, аналогичная задача смешения потоков горячей и обратной воды решается с помощью циркуляционного насоса. В результате температура воды перед поступлением в отопительные приборы понижается до требуемого по эксплуатационным нормам.

Схемы *а, б, в* на рисунке 13.1 являются зависимыми, так как теплоноситель, так как теплоноситель в них подается в отопительные приборы непосредственно из тепловой сети. В отличие от них схема *г* на рисунке 13.1 изображает независимую схему присоединения отопительных приборов к тепловой сети, так как теплоноситель, циркулирующий через них, не сообщается с теплоносителем тепловой сети, а получает от него теплоту в водо-водяном подогревателе 4. На рисунке 13.1д показана независимая схема

присоединения горячего водоснабжения к тепловой сети. Холодная вода подогревается в подогревателе 4 и далее поступает в аккумулятор горячей воды 5, из которого она по мере необходимости отбирается потребителем.

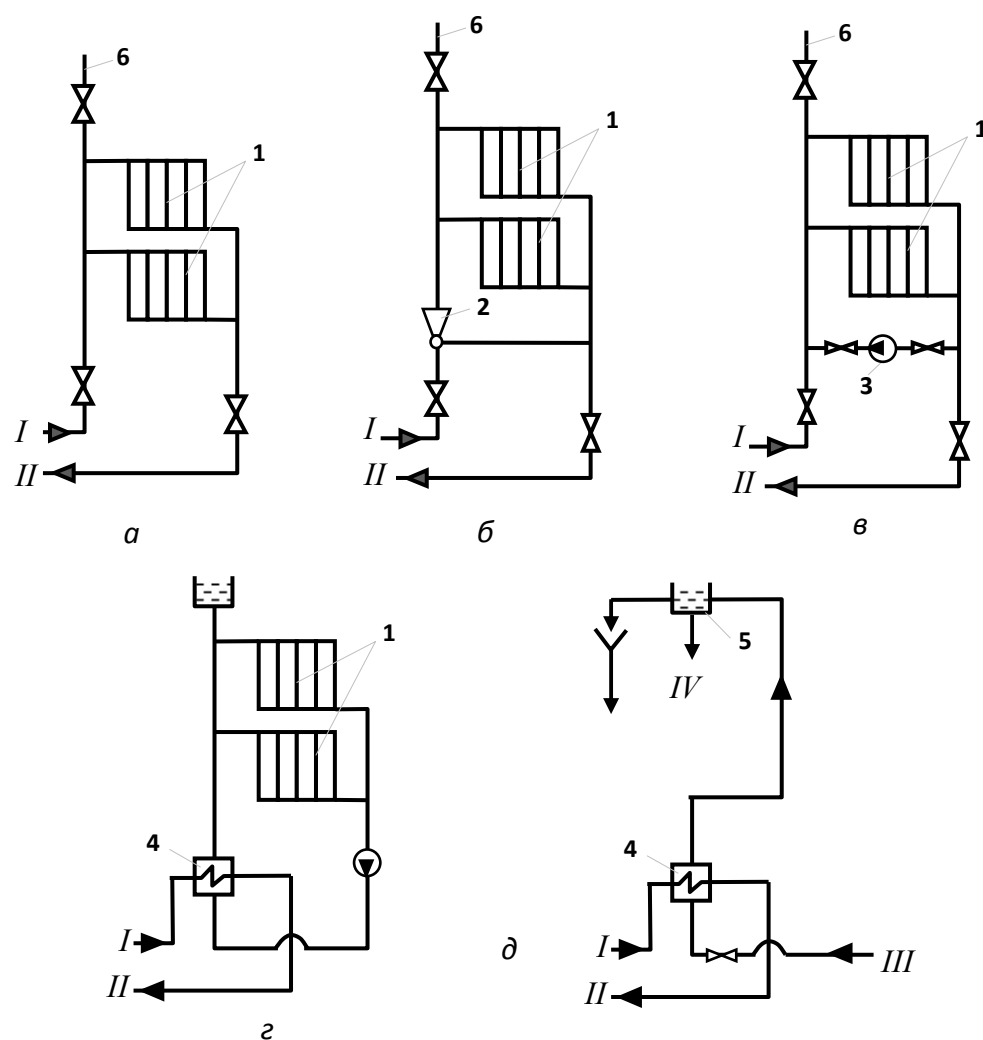


Рис. 13.1. Схемы закрытой двухтрубной системы водяной сети:

- а* – зависимая схема отопления с непосредственным подсоединением к сети;
- б* – зависимая схема отопления с водоструйным элеватором;
- в* – зависимая схема отопления с циркуляционным насосом;
- г* – независимая схема отопления с водоподогревателем;
- д* – независимая схема горячего водоснабжения;
- I* – горячая вода из котельной; *II* – обратная вода в котельную;
- III* – холодная вода на нагрев;
- IV* – нагретая вода в систему горячего водоснабжения;
- 1 – отопительный прибор; 2 – водогрейный элеватор;
- 3 – циркуляционный насос; 4 – водоводяной водоподогреватель;
- 5 – аккумулятор горячей воды; 6 – воздушник

Основная часть тепловой энергии идет на отопление.

Отопление - это компенсация тепловых потерь в окружающую среду данного помещения, объекта при условии поддержания в нем заданной температуры. Если температура в помещении больше, чем снаружи, то всегда имеется тепловой поток, называемый **теплопотерями**. Этот поток

никогда не равен нулю (только при равенстве температур). т.е. все тепло, введенное в помещение, в конце концов оказывается в окружающей среде. Поэтому неуместны восклицания о том, что "греем небо". Другое дело - величина, интенсивность этого потока (количество тепла в единицу времени). Она зависит от термического сопротивления наружных ограждений - стен, окон, потолка, пола и т.д. (толщина деленная на теплопроводность). Очевидно, увеличивая толщину и переходя на более совершенный теплоизоляционный материал, можно уменьшить теплопотери, уменьшить необходимую мощность системы отопления, уменьшить расход топлива на получения тепловой энергии. Однако при этом возрастает стоимость сооружения, поэтому термическое сопротивление нормируется. Нахождение оптимума по минимуму затрат - наиболее правильный путь энергосбережения, но чаще нормы усредняют расчет для разных потребителей. Поэтому с точки зрения энергосбережения желательно для конкретных практических случаев уточнять экономически целесообразные термические сопротивления ограждений.

В системах отопления тепло передается в помещении при помощи нагревательных (отопительных) приборов; обычно это чугунные и стальные радиаторы и конвекторы.

Для повышения эффективности работы отопительных приборов следует:

1) не ограждать их декоративными решетками; 2) не заглублять в ниши; 3) использовать темную окраску; 4) при большом количестве секций делить на несколько батарей; 5) не располагать их высоко; 6) при установке на наружных стенах применять теплоизоляцию со стороны стены; 7) иметь отключающий и регулирующий вентиль; 8) следить за чистотой межреберного пространства в конвекторах.

По условиям энергосбережения недопустимо использовать электроэнергию для отопления зданий, т.к. для производства единицы электроэнергии необходимо несколько единиц тепловой (получающейся при сжигании топлива). Конечно, бывают единичные случаи, когда вынуждены применять электрообогрев, но надо стремиться к получению теплоты при сжигании топлива, ибо КПД в этом случае близко к 100%. Отрицательные факторы при этом - топливное хозяйство, необходимость очистки газов, пожарная безопасность. При правильном использовании современных теплогенераторов огневого типа эффект энергосбережения безусловен.

Контрольные вопросы:

1. Какие знаете теплоносители? Охарактеризуйте их.
2. По каким признакам классифицируют системы теплоснабжения?
3. Изобразите различные варианты присоединения потребителя к закрытой двухтрубной водяной системе теплоснабжения и поясните их.
4. Что понимают под тепловой сетью, какие они бывают?
5. Что такое тепловой пункт, какие тепловые пункты вы знаете?
6. Какие функции выполняет тепловой пункт, какое оборудование размещается в тепловом пункте?.

Лекция 14.

СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

Существует два принципиальных пути развития энергетики. 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 энергетические 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 $1000 - 1100^\circ\text{C}$. Газовая турбина вращает электрический генератор, который выдает электроэнергию в сеть. На выходе турбины газы имеют температуру порядка $400 - 600^\circ\text{C}$. Эти газы сбрасываются в паровой котел – утилизатор, который является источником пара для паровой турбины.

На рис. 14.1 изображен парогазовый цикл в $T - S$ координатах. Рис. 14.2 демонстрирует принципиальную схему ПГУ.

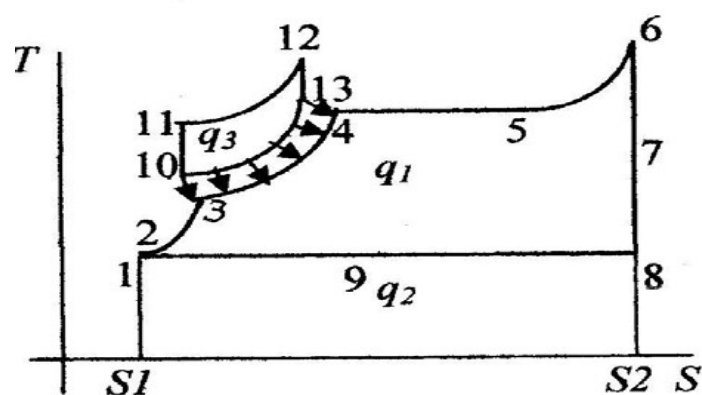


Рис. 14.1. T, s – диаграмма парогазового цикла

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 процесс 11 – 12 имеет место в камере сгорания 2, где топливо перемешивается в воздух 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.

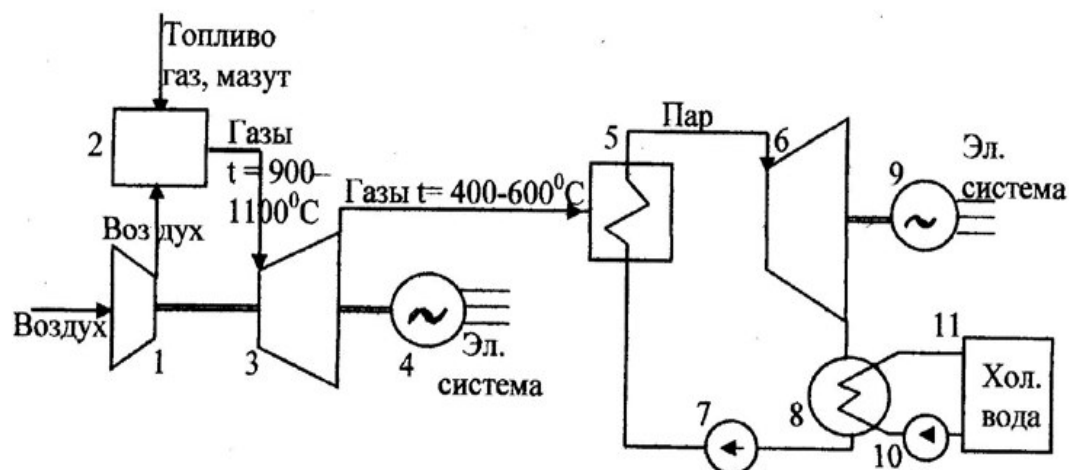


Рис. 14.2. Принципиальная схема ПГУ.

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 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:

$$q_3 = Q_{1г} - Q_{2г}, \quad q_2 = Q_{2г} - q_3, \quad (14.2)$$

$$Q_{пгу} = q_3 + q_2 = Q_{1г} - Q_{2г} + Q_{2г} - q_2 = Q_{1г} - q_2. \quad (14.3)$$

$$\eta_{пгу} = Q_{пгу} / Q_{1г} = (Q_{1г} - q_2) / Q_{1г} \approx (T_{1г} - T_2) / T_{1г}, \quad (14.4)$$

что следует из соотношений, полученных в лекции 4. 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:

$$\eta_{пгу} = (1100 + 273 - 20 - 273) / (1100 + 273) = 0,78 \text{ (78\%)}. \quad (14.5)$$

Конечно реальный КПД ниже полученного, поскольку в расчете не учтены некоторые потери, 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 $T = 4,20\text{K}$. В 1911 году охлаждая металлы до низких температур он обнаружил, что некоторые из них полностью теряют сопротивление и становятся сверхпроводящими. Ниже приведены (табл. 14.1) примеры температур, при которых некоторые металлы становятся сверхпроводниками:

Таблица 14.1

Температуры превращения металлов в сверхпроводники

Металл	Алюминий	Свинец	Ртуть	Олово	Цинк
Температура, К	1,2	7,2	4...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 $T=0,05\text{K}$. 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 $23-24\text{K}$ (сплав ниобия и германия), однако они пока не достигают температуры кипения жидкого азота ($77,4\text{K}$), 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 $T_{\text{кр}} = 64-75\text{K}$ 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 электропередач, 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 с АЭС, это хранение и переработка отработанного ядерного топлива.

Кроме вышеуказанных направлений к перспективам развития энергетики можно отнести водородную энергетику на топливных элементах, строительство АЭС с реакторами на быстрых нейтронах (РБН) и в перспективе создание промышленных генераторов энергии на основе управляемого термоядерного синтеза.

Контрольные вопросы:

1. Что дает парогазовый цикл работы электростанций по сравнению с циклом Ренкина на перегретом паре?
2. Изобразите принципиальную схему ПГУ.
3. Какие выгоды дает применение сверхпроводящих материалов?
4. Какие новые нетрадиционные направления развития энергетики вы знаете?

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

СВЕДЕНИЯ ПО ИСТОРИИ ГИДРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

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 санскритской 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 Порты 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.

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.

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ 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 открытие 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров, А.А., Григорьев, Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Справочник. М.: МЭИ. 1999. 164 с.
2. Александров, А. А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок. [текст] 2-е изд., стер. М.: Изд-во МЭИ. 2006. 158 с.
3. Данилов, О.Л., Гаряев, А.Б., Яковлев И.В. и др. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. Под ред. А.В. Клименко. [текст] М.: Изд. дом МЭИ. 2010. 424 с.
4. Нащокин, В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. Учебник. [текст] М.: Книга по требованию. 2013. 496 с.
5. Общая энергетика (Производство тепловой и электрической энергии): учебник / Г.Ф. Быстрицкий, Г.Г. Гасангаджиев, В.С. Кожиченков. М. : КНОРУС, 2013. 408 с. (Бакалавриат).
6. Рудобашта С.П. Теплотехника. М.: КолосС. 2010 г. 600 с.
7. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: Учебник. [текст] 7-е изд., стереот. М.: Изд-во МЭИ. 2001. 472 с.
8. Теплоэнергетика и теплотехника. Общие вопросы: Справочник: В 4 кн. Кн. 1 /Под общ. Ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 528 с.
9. Фортов В.Е., Попель О.С. Энергетика в современном мире. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2011. 168 с.

Учебное издание

Осмонов Орозмамат Мамасалиевич

ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Учебное пособие

Издано в авторской редакции
Корректурa автора

Подписано в печать 17.04.2015г. Формат 60х84
Усл. печ. л. 5,75. Уч. –изд. л. 5,0. Тираж 100 экз. Зак. 491.

Издательство РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева
Москва, Тимирязевская ул., 44
Тел.: 8 (499) 977-00-12; 977-40-64