

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Майкопский государственный технологический университет»**  
**Кафедра Нефтегазового дела и энергетики**

**ТЕПЛОВЫЕ И ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ (ТЭС И ГЭС)**

учебно-методическое пособие для направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (профиль Электроэнергетические системы и сети) для всех форм обучения

Майкоп 2019 год

УДК 621.311.2(07)

ББК 31.277

Т 34

СОСТАВИТЕЛЬ: КОХУЖЕВА Р.Б.

Данное учебно-методическое пособие содержит сведения о типах электрических станций и их классификации, тепловых электрических станциях, гидроэлектростанциях. Рассмотрены: технологическая схема ТЭС; виды органического топлива. Представлена классификация ГЭС; гидроэлектростанции мира и России.

Майкоп 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

### Раздел 1. Тепловые электрические станции

#### Тема 1.1. Типы электрических станций

##### 1.1.1. Классификация электрических станций

##### 1.1.2. Основные элементы паровых электростанций

##### 1.1.3. Суточные графики потребления энергии

#### Тема 1.2. Технологическая схема ТЭС

##### 1.2.1. Тепловые нагрузки ТЭЦ

##### 1.2.2. Основное и вспомогательное оборудование теплофикационных установок

##### 1.2.3. Топливный тракт электростанции

##### 1.2.4. Сжигание жидкого топлива на электростанции

##### 1.2.5. Сжигание газа на электростанции

##### 1.2.6. Газовоздушный тракт

#### Тема 1.3. Органическое топливо

##### 1.3.1. Виды органического топлива

##### 1.3.2. Элементарный состав топлива

##### 1.3.3. Характеристики топлива

##### 1.3.5. Свойства топлива

#### Тема 1.4. Элементы теории термодинамики

##### 1.4.1. Общие определения в технической термодинамике и теплопередаче

##### 1.4.2. Основные термодинамические параметры рабочего тела

##### 1.4.3. Первый закон термодинамики

##### 1.4.4. Термодинамический процесс

##### 1.4.5. Энтальпия

### Раздел 2. Гидроэлектростанции

#### Тема 2.1. Принцип действия гидроэлектростанции

##### 2.1.2 Особенности гидроэлектростанций

#### Тема 2.2 Классификация ГЭС

##### 2.2.1 Классификация ГЭС по вырабатываемой мощности

##### 2.2.2 Классификация ГЭС по напору воды

##### 2.2.3 Классификация ГЭС по принципу использования природных ресурсов

#### Тема 2.3 Преимущества и недостатки ГЭС

#### Тема 2.4 История гидроэнергии

##### 2.4.1 История гидроэнергии в мире

##### 2.4.2 История гидроэнергии в России

#### Тема 2.5 Гидроэлектростанции мира

##### 2.5.2 Крупнейшие ГЭС в России

##### 2.5.3 Крупнейшие аварии и происшествия

## **Раздел 1. Тепловые электрические станции**

### **Тема 1.1. Типы электрических станций**

#### **1.1.1. Классификация электрических станций**

Электрическая электростанция предназначена для выработки электрической и тепловой энергий для снабжения ею промышленного, сельскохозяйственного производства, коммунального хозяйства, транспорта и т.д. Тепловые электростанции (сокращённо ТЭС), предназначенные только для производства электроэнергии, называются конденсационными (сокращённо КЭС). Эти электростанции, работающие на органическом топливе (угле, мазуте, газе), обычно строятся вблизи мест добычи топлива. Например, Приморская ГРЭС — вблизи от Лучегорского угольного разреза, Хоронорская ГРЭС в Читинской области — вблизи Хоронорского месторождения углей, Нерюнгринская ГРЭС — вблизи Нерюнгринского месторождения углей и т.д. ГРЭС расшифровывается как Государственная районная электрическая станция.

Электростанции, предназначенные для выработки электроэнергии, отпуска пара и горячей воды потребителям, называются теплоэлектроцентралями (сокращённо ТЭЦ). Выработка электроэнергии и тепла с паром и горячей водой называется комбинированной выработкой энергии. Обычно ТЭЦ строят вблизи потребителей тепла: промышленных предприятий или для снабжения теплом и горячей водой жилых массивов, городов, посёлков и т.п.

На атомных электростанциях (сокращённо АЭС), также как и на электростанциях, работающих на органическом топливе (угле, мазуте или газе), осуществляется процесс превращения энергии, содержащейся в рабочей среде (паре), в электрическую. Различие между процессами, происходящими на АЭС и ТЭС, состоит в том, что на атомных электростанциях используется энергия, выделяющаяся при распаде ядер тяжёлых элементов (урана, плутония и других), применяющихся в качестве топлива, а на тепловых электростанциях — при сгорании органического топлива. Тепловые схемы АЭС разнообразны, хотя её паротурбинная часть остаётся практически такой же, как и на обычной электростанции.

Электростанции, использующие энергию воды, называются гидроэлектростанциями (сокращённо ГЭС).

Электростанции местного значения располагаются в непосредственной близости от потребителя и снабжают энергией только близлежащий район или город. Тепловые электростанции местного значения работают на местном или привозном топливе в зависимости от места их расположения по отношению к топливным базам. Например, Анадырская ТЭЦ является станцией местного значения, она снабжает электро- и теплоэнергией узкий район — г. Анадырь и близлежащие населённые пункты, и работает на местном угле. Камчатские ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 снабжают электроэнергией г. Петропавловск-Камчатский, г. Елизово и другие жилые поселения и теплом г. Петропавловск-Камчатский. В качестве топлива используется привозной мазут, который поставляется морским путём.

Как правило, почти все электростанции (атомные, тепловые, ГЭС и другие) объединяются в энергосистемы.

Совместная работа ТЭС, а также включение их в энергосистемы с ГЭС даёт следующие большие преимущества:

1. Возможность наиболее рационального использования энергетических ресурсов путём соответствующего распределения электрических нагрузок ЭС. Причём основную нагрузку всей системы несут районные станции, которые являются базисными и работающие на местных топливах. Местные ЭС, работающие обычно на привозном топливе, вырабатывают меньшее количество электроэнергии, принимая на себя только колебания нагрузки, и называются пиковыми электростанциями.

2. Уменьшение резервной мощности, т.к. резерв может быть общим для всей системы и сосредоточен на одной или двух электростанциях. Поэтому отпадает необходимость в резервных агрегатах на каждой станции. Это удешевляет стоимость строительства электростанции и себестоимость производства тепло- и электроэнергии.

3. Повышение надёжности тепло- и электроэнергии вследствие больших маневренных возможностей в таких энергосистемах. Имеется возможность проведения ремонтов основного и вспомогательного оборудования на какой-либо электростанции.

При выборе строительной площадки для ТЭС необходимо учитывать ряд требований:

- как можно ближе к месторождению топлива;
- недалеко от теплопотребителей;
- наличие водных источников требуемого расхода воды.

Следует заметить, что АЭС могут строиться вблизи крупных промышленных потребителей электрической энергии, и это выгодно отличает эти электростанции от работающих на органическом топливе, расположение которых напрямую зависит от удаленности топливного месторождения, которое влияет на затраты транспортировки. Атомные электростанции могут быть конденсационными (АКЭС) и теплоэлектроцентралями (АТЭЦ). В последние годы в некоторых странах большое внимание уделяют комбинированным атомным установкам для опреснения морских и солончаковых вод. Вполне очевидно, что такие станции будут строиться в местах, где ощущается недостаток пресной воды.

Основными направлениями развития энергетики РФ являются:

- строительство мощных электростанций, объединяемых в энергосистемы для крупных промышленных районов;
- широкое внедрение теплофикации;
- широкое использование местного топлива и гидроэнергии.

Местное значение могут иметь электростанции, использующие энергию ветра — ветровые электростанции, мощность их обычно мала, несколько МВт; электростанции солнечного излучения (5 МВт в Крыму), приливов и отливов мощностью несколько сотен МВт; энергию подземных горячих источников — геотермальные электростанции. Такие станции работают на Камчатке (Паужетская ГеоЭС, Мутновская ГеоЭС).

Электростанции в отдельных районах объединяются линиями электропередачи высокого напряжения (сокращённо ВЛ) в районные энергосистемы, эти системы между собой — в объединённые энергосистемы (ОЭС), которые входят в единую энергетическую систему (ЕЭС). В состав энергосистемы входят электростанции, подстанции с повышающими и понижающими трансформаторами, линии электропередач.

К тепловым электростанциям местного значения относятся:

— отопительные, снабжающие теплом и электроэнергией промышленные предприятия города и удовлетворяющие коммунальные и бытовые нужды населения; на таких ТЭС установлены турбоагрегаты типа «Т»;

— промышленно-отопительные, снабжающие теплом и электроэнергией промышленные предприятия города и удовлетворяющие коммунальные и бытовые нужды населения; на таких ТЭС установлены турбоагрегаты типа «Т», «ПТ», «Р»;

— промышленные, снабжающие паром и теплом промышленные предприятия; на таких ТЭС установлены турбоагрегаты типа «П», «Р».

Местные станции, расположенные в районах, охваченных энергосистемами, присоединяются обычно к этим системам. Энергетические системы имеют централизованное диспетчерское управление, распределяющее суммарную электрическую нагрузку между отдельными электростанциями. Таким образом, формируется суточный график электрической нагрузки каждой электростанции, который определяется суточным графиком потребления электроэнергии для энергосистемы. Мощность электростанции должна быть равна потребляемой мощности плюс мощность собственных нужд электростанции. Нарушения этого равенства могут привести к непрерывным колебаниям частоты тока в энергосистеме (50 Гц).

Транспорт электро- и теплоэнергии связан с дополнительными потерями в линиях электропередачи, в тепловых сетях, например, при передаче электроэнергии потребителям по электрическим сетям достигает 8÷9%.

Рассмотрим, какие же требования предъявляются к тепловым электростанциям.

1. Если станция работает изолированно, вне энергосистемы, то она должна иметь мощность, достаточную для покрытия тепловых и электрических нагрузок присоединённых к ней потребителей. При этом должна иметься возможность расширения станции, то есть увеличения её мощности с установкой новых дополнительных турбоустановок и котлов без нарушения её нормальной работы. Если электростанция работает в энергосистеме, то мощность её и возможность расширения устанавливаются, исходя из потребностей всей системы в целом.

2. Тепловая электростанция должна работать безаварийно, для чего она должна иметь надёжное оборудование, резерв в оборудовании, достаточный для производства ремонта и ревизий, а также обслуживающий персонал необходимой квалификации.

3. Надёжность снабжения потребителей электрической и тепловой энергией в необходимом количестве и требуемого качества является обязательным требованием, которое прежде всех других должно предъявляться к любой электростанции. А качество продукции электростанций — это определённое напряжение и частота электрического тока, давление и температура пара и горячей воды для потребителей.

Тепловая электростанция должна иметь высокую тепловую экономичность, то есть малый расход топлива на единицу отпускаемой тепловой (ГКАЛ) и электрической энергии (КВт) и вместе с тем вырабатывать её с возможно меньшей себестоимостью. Об экономичной работе станции говорит величина, называемая удельным расходом топлива, то есть отношением расхода топлива в граммах на величину вырабатываемой тепловой и электрической энергии. С другой стороны, общая сумма расходов по эксплуатации тем меньше, чем дешевле топливо и чем выше КПД станции.

5. Расход электрической и тепловой энергии на собственные нужды станции должен быть минимальным.

Таким образом, электростанция должна проектироваться для работы на дешёвом топливе, по возможности на местном, а не на привозном, а оборудование станции должны работать с высоким КПД.

Контрольные вопросы.

1. Какие электростанции называются конденсационными?
2. Какие преимущества даёт объединение электростанций в энергосистемы?
3. Какие электростанции называются теплоэлектроцентралями?
4. Какие ТЭС относятся к электростанциям местного значения?
5. Какие электростанции обычно располагаются вблизи месторождения топлива и гидроресурсов?
6. Какие электростанции обычно располагаются вблизи от потребителей тепло- и электроэнергии?
7. Какие требования должны быть учтены при выборе строительной площадки для ТЭС?

### **1.1.2. Основные элементы паровых электростанций**

Всякая паровая электростанция состоит из следующих основных элементов:

1. Котельный цех, в котором установлены котлы и вспомогательные элементы котлоагрегата (дымососы, дутьевые вентиляторы, насосы различного назначения и др.). В зависимости от местных условий вспомогательное оборудование может быть установлено в других помещениях.
2. Турбинный цех, где установлены паровые турбины, генератор, различные теплообменные подогреватели, насосы (сетевые, циркуляционные, конденсатные, питательные и др. на некоторых электростанциях котельный и турбинный цеха имеют общую администрацию, и называются котлотурбинным цехом.
3. Топливо-транспортный цех, состоящий из сооружений топливоснабжения (вагоноопрокидыватель, топливный склад, местные железнодорожные пути и др.), топливоподачи (ленточные транспортёры, бункеры угля и пыли), угле- и пылеразмольные устройства (мельницы) и другое вспомогательное оборудование.
4. Цех тепловой автоматики и измерений (ЦТАИ), обслуживающий все приборы, предохранительные устройства, осуществляет поверку приборов и т.д.
5. Электроцех обслуживает электрогенераторы, трансформаторы, распределительные устройства, в том числе и собственных нужд, электрические кабели, связь и т.д.
6. Химический цех, в котором установлены Na- и H-катионитовые фильтры, различного назначения насосы, обессоливающая установка. В составе химцеха имеется химическая лаборатория, где проводят анализы топлива, воды и т.д.
7. Различные служебные и бытовые помещения (мастерские, лаборатории, кладовые, душевые, административные помещения и другие).

### **1.1.3. Суточные графики потребления энергии**

Потребляемая мощность, как тепловая, так и электрическая, изменяется в течение суток в зависимости от характера потребителей. Основную нагрузку даёт промышленное потребление энергии, транспорт, бытовые нужды.

Общая нагрузка электростанции состоит из нагрузок потребителей и расхода тепло- и электроэнергии на собственные нужды, а также на покрытие потерь в тепловых и электрических сетях. Изменение потребной электрической нагрузки и потребного расхода тепла по часам суток выражается диаграммами, которые называются суточными графиками нагрузок; на этих графиках по оси абсцисс откладывается время от 0 до 24 часов, по оси ординат — потребление мощности в МВт (или кВт), или тепла в Гкал/час (или ккал/час).

Бытовое потребление тепла (отопление, горячее водоснабжение и вентиляция) имеет значительно отличающиеся суточные графики в зависимости от времени года. Летом потребление тепла для отопления и вентиляции практически отсутствует. Суточные графики потребления не остаются постоянными в течение года, а изменяются в большей или меньшей степени в зависимости от рода потребителей. Промышленные потребители практически имеют почти постоянный суточный график потребления электроэнергии в течение всего года.

Как правило, все тепловые электрические станции работают по заданному диспетчерской службой электрическому и тепловому графикам. Диспетчерская служба в случае необходимости вносит определённые изменения в эти графики.

## **Тема 1.2. Технологическая схема ТЭС**

### **1.2.1. Тепловые нагрузки ТЭЦ**

Тепловая энергия требуется для технологических нужд промышленности, для отопления и вентиляции производственных, жилых и общественных зданий, кондиционирования воздуха, для горячего водоснабжения (ГВС). Для производственных целей обычно требуется перегретый пар, температура которого на  $15\div 200^{\circ}\text{C}$  выше температуры насыщения, так как при транспортировке к потребителю часть пара конденсируется и соответственно при этом происходит потеря теплоты. На отопление, вентиляцию от ТЭЦ вода поступает при температуре  $95\div 180^{\circ}\text{C}$ , в зависимости от расчётного температурного графика.

Таким образом, централизованная система теплоснабжения включает в себя:

теплоисточник (ТЭЦ или котельная), трубопроводы для транспортирования тепла (пара или воды) и установки теплопотребителей, использующие теплоту для промышленных или бытовых нужд.

Централизованное теплоснабжение от ТЭЦ в качестве источника теплоты называется теплофикацией. Тепловая нагрузка электростанции, определяемая расходом теплоты на производственные процессы и бытовые нужды (горячее водоснабжение), практически не зависит от температуры наружного воздуха.

Однако летом эта нагрузка несколько меньше, чем зимой. Ведь летом отопления нет. В то же время промышленная и бытовая тепловые нагрузки резко изменяются в течение суток. Кроме того, среднесуточная нагрузка электростанции при использовании теплоты на бытовые нужды в конце недели, в предпраздничные и праздничные дни значительно выше, чем в другие рабочие дни недели.

При небольших изменениях температуры наружного воздуха отопительная и вентиляционная нагрузки жилых помещений в течение суток сохраняются практически постоянными. В тех же условиях отопительная нагрузка общественных зданий и

промышленных предприятий может в течение суток заметно изменяться, в нерабочие дни недели — значительно понижаться. Вентиляционная нагрузка в нерабочее время вообще выключается. Такое изменение расхода теплоты на отопление и вентиляцию общественных зданий и промышленных предприятий приводит к экономии топлива, расходуемого на эти цели.

Рассмотрим суточный график тепловой нагрузки на рис.3 ( — зима, — лето).

Отопительная тепловая нагрузка, расход тепла на вентиляцию и кондиционирование воздуха зависят от температуры наружного воздуха и имеют сезонный характер.

Расход теплоты на отопление и вентиляцию — наибольший зимой и полностью отсутствует в летние месяцы. На кондиционирование воздуха теплота расходуется только летом, поэтому расширение сферы применения кондиционированного воздуха приведёт к повышению эффективности теплофикации.

Централизованный отпуск тепла ТЭЦ и частично другими источниками (котельными) на отопление, вентиляцию и бытовые нужды составляет около трети всего теплового потребления.

Максимальный расход тепла на отопление соответствует расчётной температуре наружного воздуха  $t_{рн}$ , которая принимается равной средней температуре наиболее холодных пятилеток из восьми наиболее холодных зим на пятидесятилетний период.

Температура наружного воздуха зависит от климатических условий местности и в течение года изменяется в широких пределах. Отопительно-вентиляционная нагрузка отключается от потребителей при температуре наружного воздуха  $+8\div 100^{\circ}\text{C}$ , что соответствует продолжительности отопительного сезона около 5000 ч/год при общей продолжительности года 8760 часов.

Приведем несколько примеров продолжительности отопительного сезона некоторых городов при расчётной температуре наружного воздуха для отопления:

г. Анадырь ( $-400^{\circ}\text{C}$ ) 7400 часов г. Благовещенск ( $-340^{\circ}\text{C}$ ) 5088 часов

г. Владивосток ( $-240^{\circ}\text{C}$ ) 4824 часа г. Москва ( $-260^{\circ}\text{C}$ ) 4920 часов

Промышленные предприятия являются круглогодичными потребителями технологического пара и горячей воды и одновременно сезонными потребителями теплоты с горячей водой для отопления и вентиляции. Пароснабжение таких потребителей должно обеспечиваться с высокой надёжностью, так как перерывы в подаче пара или даже снижение подачи влекут за собой большой материальный ущерб из-за нарушения технологического процесса.

Контрольные вопросы.

1. Из каких основных элементов состоит паровая электростанция?
2. Какая вода называется деаэрированной?
3. Что включает в себя централизованная система теплоснабжения?

### **1.2.2. Основное и вспомогательное оборудование теплофикационных установок**

Вода, подаваемая в тепловую сеть для нужд потребителей, на ТЭЦ подогревается в сетевых подогревателях турбоустановок, в пиковых подогревателях и в пиковых водогрейных котлах, которые относятся к основному теплофикационному оборудованию ТЭЦ. К вспомогательному теплофикационному оборудованию относятся: подпиточная

установка теплосети, сетевые насосы, баки-аккумуляторы, рециркуляционные насосы водогрейных котлов и т.д.

Пиковые водогрейные котлы (ПВК) предназначены для установки на ТЭЦ с целью покрытия пиков теплофикационных нагрузок. Пиковые водогрейные котлы обычно устанавливаются в отдельных помещениях на крупных ТЭЦ или в главном корпусе на небольших ТЭЦ. Топливом этих котлов служит большей частью мазут или газ. Ввиду малого использования в течение года пиковые котлы выполняют простыми по конструкции и недорогими. Здание может выполняться лишь для нижней части котлов, верхняя часть их при этом остаётся на открытом воздухе. До ввода в работу ТЭЦ водогрейные котлы можно использовать для временного централизованного теплоснабжения района. Сетевая вода нагревается последовательно в сетевых подогревателях до  $110\div 1200^{\circ}\text{C}$ , а затем в ПВК до  $1500^{\circ}\text{C}$  максимально.

Во избежание коррозии металла котла температура на входе в него должна быть не ниже  $50\div 600^{\circ}\text{C}$ , что достигается рециркуляцией и смешением горячей и холодной воды. Расчётный КПД водогрейных котлов на газе и мазуте достигает  $91\div 93\%$ . Выпускаются и используются ПВК на угле. У них своя пылеподготовка, дымососы и другое оборудование.

Пароводяные подогреватели теплоподготовительных установок предназначены для подогрева сетевой воды паром от турбин или от котлов через редуционно-охладительные установки (сокращённо РОУ).

Сетевые насосы служат для подачи горячей воды по теплофикационным сетям и в зависимости от места установки применяются в качестве насосов первого подъёма, подающих воду из обратного трубопровода в сетевые подогреватели; второго подъёма для подачи воды после сетевых подогревателей в теплосеть; рециркуляционных, установленных после пиковых водогрейных котлов.

Сетевые насосы должны обладать повышенной надёжностью, так как перебои или неполадки в работе насосов сказываются на режиме работы ТЭЦ и потребителей.

Основной особенностью работы сетевых насосов являются колебания температуры подаваемой воды в широких пределах, что в свою очередь вызывает изменение давления внутри насоса. Сетевые насосы должны надёжно работать в широком диапазоне подач. Обычно сетевые насосы выполняются центробежными, горизонтальными, с приводом от электродвигателя.

Контрольные вопросы.

1. От чего зависят схемы тепловых сетей?
2. С какой целью на ТЭЦ производится подпитка добавочной водой тепловых сетей?
3. Какое теплофикационное оборудование относится к вспомогательному?
4. Что является основной особенностью работы сетевых насосов и для чего они применяются?

### **1.2.3. Топливный тракт электростанции**

Для создания запаса топлива на случай временных перерывов или снижения его подачи с места добычи, а также для возможности разгрузки и хранения топлива, прибывающего на станцию, служат топливные склады. Основные склады обычно рассчитываются на запас топлива месячной потребности при максимальной нагрузке

станции. Ёмкость склада в каждом отдельном случае согласовывается с организацией, которая запроектировала станцию, и устанавливается в зависимости от климата районов, по которым проходят железнодорожные пути и может достигать иногда 2÷3-х-месячной потребности топлива. Как правило, топливные склады располагаются вблизи станции и бывают открытого типа (на свежем воздухе). Лишь при расположении складов в городах их иногда во избежание запыления окружающей местности обносят со всех сторон высокими плотными заборами.

Твёрдое топливо (уголь) обычно подаётся вагонами полуоткрытого типа. Если топливо замёрзшее, то его очень трудно разгружать. Поэтому в основном используются вагоноопрокидыватели.

Вагоноопрокидыватель имеется и на ТЭЦ-2. Этот процесс гораздо быстрее ручной разгрузки и автоматизирован.

Твёрдое топливо (уголь) обычно подаётся вагонами полуоткрытого типа. Если топливо замёрзшее, то его очень трудно разгружать. Поэтому в основном используются вагоноопрокидыватели. Вагоноопрокидыватель имеется и на ТЭЦ-2. Этот процесс гораздо быстрее ручной разгрузки и автоматизирован.

При погрузочно-разгрузочных операциях на складах топлива всегда имеются весовые потери топлива вследствие раструски, пыления и т.д. Величина этих потерь зависит от способа и количества погрузочно-разгрузочных операций, а также от свойств самого топлива. Например, потери для каменного угля потери составляют примерно 1÷1,5%, для бурого угля и торфа — 1,5÷2,5%.

В целях уменьшения этих потерь следует стремиться к уменьшению числа перегрузок и избегать сбрасывания топлива с большой высоты.

Ухудшение качества топлива, вызывающее необходимость расходования некоторого добавочного его количества, происходит вследствие следующих причин:

1. Измельчение при перегрузочных операциях и увеличения при самом хранении количества мелочи, что всегда имеет место и может увеличить содержание мелочи на 3÷5% в месяц. Это явление особенно резко проявляется при углях типа бурых и торфа.

2. Увеличение влажности, которое при длительном хранении может быть очень значительным. Увеличение количества влаги требует добавочного топлива для её испарения.

3. Уменьшения теплотворной способности вследствие постепенного выделения из топлива летучих веществ и его окисления. Окисление является основной причиной ухудшения качества топлива и происходит за счёт кислорода, поглощаемого из воздуха и отчасти из дождевой воды, насыщенной кислородом. Оно сопровождается увеличением температуры слоя топлива, что в свою очередь содействует дальнейшему окислению.

4. Самовозгорание при некоторых сортах угля. Иногда окисление угля происходит настолько интенсивно, что при образующимся количестве тепла температура угля повышается на столько, что начинается его разложение и выделение газообразных продуктов. При доступе к ним воздуха может произойти их воспламенение, то есть явление самовозгорания угля.

Чтобы не вызвать самовозгорание топлива на открытых складах, с помощью бульдозеров производят послойную укладку угля с толщиной слоёв в 0,5÷1,0 м таким образом, чтобы все пустоты между крупными кусками были заполнены мелочью, после

чего каждый слой должен уплотняться при помощи тракторов или бульдозеров, производящих эту операцию гусеницами или прицепным катком.

Склад твёрдого топлива не должен устраиваться в низком месте во избежание его затопления дождями и растаявшим снегом.

Современные мощные парогенераторы потребляют огромное количество топлива. Например, для обеспечения полной нагрузки блока мощность 300 МВт требуется до 100÷250 т/час в зависимости от его качества, блок 800 МВт — до 1000 т/час.

В парогенераторах всегда сжигают твёрдое топливо в пылевидном состоянии. Для этого поступающая на электростанцию масса топлива подсушивается и размалывается в тонкий угольный порошок (пыль) размером частиц 50÷300 микрон. Пыль транспортируется по трубопроводам потоком воздуха и вдувается в топочную камеру через горелочное устройство (горелки). Задача горелочных устройств — обеспечить наиболее полное перемешивание пылевидного топлива с воздухом в объёме топочной камеры.

Способ сжигания топлива во взвешенном состоянии в объёме топочной камеры называется камерным или факельным сжиганием.

Газ и мазут также сжигаются в камерных топках. Мазут предварительно распыливается с помощью форсунок до мельчайших капель и горит, перемешиваясь с воздухом. Газ не требует какой-либо предварительной механической подготовки. В этом случае вся задача заключается в хорошем перемешивании его с воздухом.

На электростанцию поступает топливо с размером кусков от долей миллиметра до 150÷200 мм. Превращение кускового топлива в угольную пыль производится в два этапа. Сначала сырое топливо подвергается дроблению в специальном дробильном отделении до размера, не превышающего 15÷25 мм. Затем дроблёнка поступает в бункеры сырого угля, после чего подвергается размолу в углеразмольных мельницах до окончательного продукта — угольной пыли с размерами частиц до 500 микрон. Одновременно с размолом топливо подсушивается до необходимой влажности, обеспечивающей хорошую текучесть пыли. В то же время нельзя пересушить пыль во избежание её взрывоопасности.

Размер фракций топлива после дробления оказывает влияние на работу системы пылеприготовления: с увеличением размера фракций дроблёнки снижается производительность пылесистемы и эффективность сушки, растёт износ мелющих органов и расход электроэнергии. С другой стороны при уменьшении размеров фракций дроблёнки происходит потеря сыпучести топлива, налипание его на рабочие органы дробильного и углетранспортного оборудования ввиду влажности топлива. Поэтому максимальный размер кусочков после дробления сильновлажных топлив должен составлять 20÷25 мм, а для умеренно влажных и сухих — около 15 мм.

Чтобы не перегружать дробилку, топливо сначала пропускают через вибрационный грохот, представляющий собой наклонную решётку с отверстиями 19÷20 мм, которая постоянно встряхивается и более крупные фракции угля проваливаются в отверстия и вновь поступают на дробилку.

Затем мелкие фракции угля на ленточных транспортёрах поступают в мельницы, в которых уголь размельчается до состояния пыли (ШБМ — шаровая барабанная мельница, ММ — молотковая мельница, валковая мельница и т.д.)

Размол огромного количества топлива, сушка и доставка его к горелочным устройствам парогенераторов требует специальной системы пылеприготовления. Она

может быть центральной и индивидуальной. В центральной пылесистеме подготовка пыли производится в отдельном центральном пылезаводе (ЦПЗ), откуда она распределяется по всем работающим парогенераторам станции. Индивидуальная пылесистема размещается у каждого парогенератора и обеспечивает его пылью. В этом случае предусматривается также возможность передачи пыли на другие агрегаты.

Индивидуальные пылесистемы получили более широкое распространение. Воздух для сушки дроблёнки называется первичным. После отделения грубых фракций в сепараторе готовая пыль вместе с увлажнённым после сушки топлива воздухом при температуре от 70 до 900С поступает в горелки.

Оставшаяся часть горячего воздуха, так называемый вторичный воздух, также вводится в горелки.

К основным элементам системы пылеприготовления относятся: мельницы, сепараторы, циклоны, питатели сырого угля и пыли и бункеры. Сепаратор служит для регулирования тонкости пыли, выдаваемый мельницей. Чаще всего применяются центробежные сепараторы. Циклон применяется в схеме с промежуточным бункером пыли для отделения готовой пыли от транспортирующего воздуха. Транспортирующий воздух циркулирует по замкнутому контуру: мельница—сепаратор—циклон—вентилятор—мельница.

#### **1.2.4. Сжигание жидкого топлива на электростанции**

Как мы уже знаем, электростанции, работающие на жидком топливе, используют в основном мазут и очень редко сырую нефть. Мазут доставляют на электростанции железнодорожным, водным, трубопроводным транспортом. Трубопроводный транспорт применяется в случаях, когда электростанция расположена вблизи нефтеперерабатывающих заводов или магистральных мазутопроводов. Жидкое топливо по своей природе приспособлено для факельного сжигания в камерных топках парогенераторов. Для этого они требуют достаточно несложной подготовки.

Подготовка мазута перед его сжиганием заключается в отделении влаги, удалении распыливании.

Отделение воды от мазута происходит в баках-хранилищах за счёт разности плотностей мазута и воды (мазут несколько легче воды). Вода отстаивается в нижней части баков и удаляется дренажными насосами. Отделение мазута от механических примесей происходит в фильтрах. Если на электростанцию мазут подаётся в железнодорожных цистернах, то на станции имеется приёмно-сливное устройство (как на ВТЭЦ-1). Приёмно-сливное устройство предназначено для приёма, разогрева, слива и перекачки мазута в резервуары-хранилища. Для слива мазута из цистерн требуется предварительный разогрев его в цистернах до температуры  $+60 \div 700\text{C}$ .

При открытой разгрузке (как на ВТЭЦ-1) разогрев мазута осуществляется прямо в железнодорожных цистернах паром. При закрытой разгрузке разогрев мазута в цистернах осуществляется в тепляке.

#### **1.2.5. Сжигание газа на электростанции**

Газ поступает на электростанцию от магистрального газопровода или от газораспределительной станции с давлением  $0,7 \div 1,3$  МПа по одной линии подземного

трубопровода. Для снижения давления газа у форсунок парогенераторов до  $0,13 \div 0,20$  МПа предусматривается его дросселирование в газорегулирующем пункте.

Подготовка газа к его сжиганию в топке парогенератора заключается в фильтровании (отделении взвешенных твёрдых частиц) и поддержании необходимого избыточного давления  $10 \div 20$  кПа. Основные операции по очистке газа и регулированию давления производятся в газорегуляторной станции. Для очистки газа от механических примесей применяются фильтры.

При эксплуатации газового хозяйства необходим тщательный контроль за утечками газа, так как газозвдушная смесь взрывоопасна. Кроме того, газ может содержать компоненты, вредные для человека, такие как CO, H<sub>2</sub>S.

На газопроводе к каждому парогенератору имеются: запорная задвижка, шайба, регулятор расхода газа, быстродействующий импульсный отсекающий клапан, работающий автоматически в зависимости от падения давления воздуха у горелок до заданного. Газопровод покрывается теплоизоляцией.

Контрольные вопросы.

1. Каковы причины ухудшения качества топлива на тепловых электростанциях?
2. Какое оборудование относится к основным элементам системы пылеприготовления?
3. В чём заключается подготовка мазута перед его сжиганием в котле?
4. В чём заключается подготовка газа перед его сжиганием в котле?

#### **1.2.6. Газовоздушный тракт**

Газовоздушный тракт является важной составной частью тепловой электрической станции, сооружение которого связано с большими трудностями и большим расходом материалов. Этот тракт в значительной мере определяют размеры ТЭС, и на транспортировку по нему дымовых газов и воздуха тратится большое количество энергии, от его работы зависит надёжность работы ТЭС в целом.

Тепловая электрическая станция, потребляя огромное количество топлива и воздуха, выбрасывает полученные в результате сгорания вредные вещества в окружающую среду. Поэтому в газовоздушном тракте наряду с парогенератором, тягодутьевыми машинами и газозвдухопроводами всё большее значение приобретают газоочистные устройства и дымовые трубы, которые рассеивают дымовые газы в атмосфере.

Принципиальная схема газовоздушного тракта зависит от вида топлива, от принятой по проекту схемы топливоприготовления, от типа топочного устройства котлов, от способа подогрева воздуха и т.д.

Через дымовые трубы электростанции в атмосферу поступают: летучая зола и частицы несгоревшего пылевидного топлива, сернистый и серный ангидрид, окислы азота и газообразные продукты неполного сгорания. При сжигании мазута, кроме перечисленных, — соединения ванадия, соли натрия, частицы сажи. В золе некоторых видов топлива содержатся также мышьяк, свободная двуокись кремния, свободная окись кальция и другие. При сжигании природного газа выброс окислов азота является единственным, но весьма существенным загрязнителем атмосферы.

Примеси, содержащиеся в дымовых газах, загрязняя атмосферу, оказывают вредное влияние на организм человека, растительный и животный мир. Для защиты населения от

вредных выбросов по правилам, предписываемым санитарными нормами, при проектировании электростанций должно предусматриваться отделение их от жилых районов санитарно-защитными зонами, протяжённость которых определяется количеством выбросов золы, окислов серы и азота и розой ветров так, чтобы концентрация вредных веществ в атмосферном воздухе не превышала предельно допустимой концентрации (ПДК).

Это обеспечивается на электростанциях, сжигающих пылевидное топливо, установкой эффективных золоуловителей и сооружением дымовых труб большой высоты, создающих более благоприятные условия для рассеивания дымовых газов, включая и рассеивание окислов серы и азота. На электростанциях, работающих на жидком топливе, основным мероприятием является сооружение высоких дымовых труб.

Тип золоуловителей и высоту дымовых труб выбирают в соответствии с расчётом рассеивания в атмосфере выбросов из дымовых труб.

На работу золоулавливающих установок оказывают влияние следующие характеристики золы: слипаемость, то есть способность золы слипаться и налипать на стенки золоулавливающих аппаратов и газоходов; сыпучесть; плотность; абразивность; удельное электрическое сопротивление и т.д.

### **Тема 1.3. Органическое топливо**

#### **1.3.1. Виды органического топлива**

К основным видам органического энергетического топлива относятся бурые и каменные угли, полуантрацит и антрацит, торф, горючие сланцы, мазут, природный, доменный и другие газы.

К энергетическим топливам относятся вещества, которые целесообразно использовать для получения тепла в больших количествах. Из общего потребления топлива в нашей стране примерно 30% приходится на долю тепловых электрических станций. Около 50% топлива, сжигаемого электростанциями, составляют ископаемые твёрдые топлива, которые разделяются на следующие виды: торф, бурые угли, каменные угли, антрацит, горючие сланцы.

Все ископаемые твёрдые топлива, кроме сланцев, произошли в основном из растительности древних лесов и болот, покрывавших землю, с участием некоторого количества белковых и жировых веществ животного происхождения. В течение тысячелетий находясь под слоем воды или земли без доступа воздуха, исходное органическое вещество под воздействием окружающей среды постепенно подвергалось химическим преобразованиям. Более «активные» химические элементы и соединения вступали в реакцию с окружающей средой и частично покидали залежь, превращаясь в газообразные продукты.

Процесс преобразования исходной органической массы идёт, таким образом, в направлении постепенного обуглероживания (углефикации) топлива, то есть повышения в нём содержания углерода и уменьшение количества кислорода и водорода.

Органическим топливом называются вещества, способные активно соединяться с кислородом и образовывать продукты сгорания, нагретые до высокой температуры за счет содержащейся в нем химически связанной энергии. Углерод является основным горючим элементом органического топлива. Второе место занимает водород, которого хотя

сравнительно немного, но удельное тепловыделение его большое. Сера, являющаяся третьим горючим элементом, дает тепловыделение, но наносит вред котельному оборудованию и окружающей среде. В состав органического топлива входят также влага и негорючие минеральные примеси, из которых в ходе горения образуется зола и шлак.

По происхождению топлива можно разделить на естественные, добытые в природных условиях, и искусственные, полученные в итоге переработки природного топлива. По сфере потребления топлива подразделяются тоже на две группы: энергетические — идущие для сжигания при выработке электроэнергии и теплоты и технологические — на переработку для получения необходимых промышленных продуктов.

По агрегатному состоянию все используемые в энергетике органические топлива делятся на три группы: твердые, жидкие и газообразные. К твердым топливам относятся ископаемые угли, торф и сланцы; к жидким — мазут, являющийся продуктом переработки добываемой из-под земли нефти; к газообразным — горючий газ. На газ приходится немного больше 5% теплоты, содержащейся во всех разведанных мировых запасах органических топлив, на нефть 7% и на уголь около 80% — таким образом, ископаемые угли являются основным органическим топливом.

Процесс преобразования исходной органической массы идёт, таким образом, в направлении постепенного обуглероживания (углефикации) топлива, то есть повышения в нём содержания углерода и уменьшение количества кислорода и водорода.

Начальная стадия разложения растительной масс в заболоченных местах называется оторфнением.

Торф — это тёмно-бурая масса, в которой ещё встречаются остатки неразложившихся частей растений (листьев, стеблей). Торф является самым молодым из сжигаемых топлив. Электростанции сжигают преимущественно фрезерный торф, получаемый путём срезания с поверхности пласта тонкого слоя фрезами. Его, как и уголь сжигают в пылевидном состоянии. В бурых углях уже невозможно обнаружить структуру клетчатки растений. Дальнейшее обуглероживание приводит к образованию плотного глянцевочёрного каменного угля и антрацита.

Горючие сланцы представляют собой минеральные породы, пропитанные органическими веществами животного происхождения. Они образовались на дне лагун древних морей.

Газообразные и жидкие топлива в последние 20 лет получили всё большее применение. Использование газообразных и жидких топлив по сравнению с углем не только повышает общую культуру эксплуатации электростанций, но и приводит к ощутимому снижению стоимости основного оборудования и увеличению КПД установок. Например, КПД парогенераторов возрастает на 1÷3% по сравнению с КПД при сжигании каменных углей и на 3÷5% — при сжигании торфа, сланцев и влажных бурых углей.

Естественным жидким топливом является сырая нефть, но как энергетическое топливо используется чрезвычайно редко (в основном на небольших котельных). После извлечения (отгонки) лёгких фракций (светлых нефтепродуктов — бензина, лигроина, керосина, газойля) остаётся 40÷60% сильновязких тяжёлых фракций — мазута, который и используется как энергетическое жидкое топливо.

Газовые топлива могут быть природными и искусственными. Природные газы имеют «нефтяное» происхождение. Как и нефть, они либо являются продуктом

длительного химического преобразования органических веществ (остатков живых организмов), скопившихся в осадочных породах, либо образовались в результате синтеза в присутствии воды и карбидов металлов на больших глубинах под воздействием высокого давления и температуры. Во многих случаях выход газов сопутствует добыче нефти. Это так называемые попутные газы. Искусственные газы, сжигаемые в топках парогенераторов, — это, как правило, побочный продукт металлургической промышленности, получаемый в большом количестве. Из искусственных чаще всего сжигаются в смеси с другими топливами газ коксовых печей и доменный газ.

### **1.3.2. Элементарный состав топлива**

Для анализа тепловых характеристик топлив, определения состава газов, полученных в процессе горения, для других тепловых расчётов необходимо знать химическую структуру каждого вида топлива.

В состав органической части топлива входят пять химических элементов: углерод С, водород Н, кислород О, сера S и азот N. Кроме того, топливо содержит минеральные примеси А, попавшие извне в исходную залежь, и влагу W, представляющие вместе внешний балласт топлива.

Горючими элементами топлива являются углерод, водород и сера. Наличие окислов серы в продуктах сгорания при определённых концентрациях опасно для всего живого, в том числе и для человека, и поэтому требует принятия мер для рассеяния их в атмосферу.

Углерод — С является главной горючей составляющей топлива. Содержание углерода в различных топливах различно. Например, в древесине и торфе содержание углерода составляет 50÷60%, в каменных углях и мазуте 75÷90%. При полном сгорании 1 кг углерода выделяется около 33,5 МДж теплоты. Содержание углерода в твердом топливе определяет степень обуглероживания растительных и животных остатков. Большое количество углерода увеличивает тепловую ценность топлива.

Водород — Н является второй важнейшей составляющей топлива. В различных видах топлива водорода содержится от 1 до 25%. При сгорании водорода образуется вода. При этом в зависимости от условий она может находиться в жидком или парообразном состоянии; при сжигании 1 кг водорода соответственно выделяется 142÷119,5 МДж теплоты. С увеличением степени обуглероживания твердого топлива (возраста топлива) содержание водорода уменьшается.

Кислород — О относится к балластной составляющей топлива, так как содержание его уменьшает горючую часть, вследствие чего снижается тепловая ценность топлива. Содержание кислорода в различных топливах изменяется в пределах от 0,5 до 40%.

Азот — N также относится к внутреннему балласту топлива, содержание которого уменьшает горючую часть. Азот содержится в топливах в связанном состоянии. Содержание азота в твердом топливе составляет 0,5—3,0%. Однако в некоторых газообразных топливах (например, доменный и генераторный газы) азот содержится в большом количестве, что значительно снижает их тепловую ценность; часть его может быть превращена в аммиак. Последний является ценным сырьем для производства минеральных удобрений (сульфат аммония и другие аммонийные и азотные соли).

Сера — S в твердом топливе содержится в виде органических соединений (органическая сера SO), сернистых соединений с железом (колчеданная сера SK) и сернокислых соединений в виде сульфатов (сульфатная сера SC).

Органическая и колчеданная сера при сгорании топлива окисляется, образуя  $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$ .

Поэтому органическая и колчеданная сера называется горючей или летучей серой, т.е.  $\text{SJ}=\text{S}_0+\text{S}_\text{K},\%$ .

При полном сгорании 1 кг горючей серы выделяется около 9,05 МДж теплоты.

Сульфатная сера при сгорании топлива переходит в состав золы, практически не участвуя в горении. Поэтому сульфатная сера называется негорючей или нелетучей серой.

Содержание серы в твердом топливе достигает 8% и более.

Сера в жидком топливе содержится в виде сернистых соединений, а также в свободном состоянии. Содержание её достигает 3,5%.

Сера в газообразном топливе находится в виде сероводорода  $\text{H}_2\text{S}$  и сернистого газа  $\text{SO}_2$ .

Сера в составе топлива является нежелательной составляющей. Это объясняется тем, что продукты сгорания серы  $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$  в присутствии влаги могут образовать сернистую и серную кислоты, а последние вызывают интенсивную коррозию металлов парогенераторов, двигателей внутреннего сгорания, строительных конструкций и др. Кроме того, сернистый и серный газы, выбрасываемые с продуктами сгорания топлива в атмосферу, оказывают вредное действие на здоровье людей, а также на окружающий животный и растительный мир.

Зола — А представляет собой минеральный остаток, получаемый при полном сгорании топлива. Она является результатом разложения и частичного окисления минеральных примесей топлива. К таким примесям относятся сульфаты, карбонаты, силикаты, фосфаты, хлориды, пирита и другие соединения. В состав золы входят окислы  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и др.

Различают первичную, вторичную и третичную золу. Первичная зола образуется из минеральных примесей, входящих в состав веществ топливообразователей; вторичная зола — из минеральных примесей, попадающих в топливо в процессе топливообразования; и третичная — в момент добычи.

Влага — W также является внешним балластом, так как она уменьшает тепловую ценность топлива. На испарение влаги тратится часть теплоты, выделяемой при сгорании топлива. Кроме того, испарившаяся влага, являясь составной частью газообразных продуктов сгорания, снижает их температуру, что уменьшает количество теплоты, передаваемой к поверхностям нагрева. Различают внешнюю и внутреннюю влагу.

Внешняя влага в топливе является результатом попадания влаги в топливо из окружающей среды в процессе добычи топлива, его транспортирования и хранения.

Содержание внешней влаги в топливах колеблется в широких пределах и достигает в отдельных случаях нескольких десятков процентов. При сушке топлива внешняя влага может быть удалена.

Внутренняя влага связана с органическим веществом топлива и его минеральными примесями. Часть этой влаги (гигроскопическая) в коллоидально связанном состоянии равномерно распределена в массе топлива. Другая часть (гидратная влага) представляет собой влагу, входящую в состав молекул некоторых соединений, содержащихся в минеральных примесях топлива. В газообразном топливе влага находится в виде паров, максимальное содержание которых определяется температурой насыщения при данном

парциальном давлении. Понижение температуры газа приводит к конденсации водяных паров из газа.

Контрольные вопросы.

1. Какое топливо называется органическим?
2. Какое топливо относится к органическому энергетическому?
3. Какие химические элементы входят в состав органической части топлива?
4. Что, кроме химических элементов, содержит топливо?
5. Какие элементы топлива являются горючими?
6. С чем связаны внешняя и внутренняя влага топлива?

### **1.3.3. Характеристики топлива**

Основными техническими характеристиками топлив являются: теплота сгорания, выход газообразных горючих веществ при нагреве (выход летучих веществ), зольность топлива, свойства золы, влажность и сернистость топлива, выход летучих и кокса.

Теплота сгорания является наиболее важной основной технической характеристикой топлива. Различают высшую и низшую теплоту сгорания топлива. Высшей теплотой сгорания  $Q_V$  называют количество тепла, которое выделяется при сгорании 1 кг твёрдого (жидкого) или 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива. Низшая теплота сгорания  $Q_H$  отличается от высшей на теплоту испарения влаги топлива и влаги, образующейся при горении водорода. Чем больше влажность топлива, тем меньше будет величина  $Q_H$ . Низшая теплота сгорания рабочей массы определяется как результат разности высшей теплоты сгорания горючих элементов топлива и теплоты, затраченной на испарение всей влаги. Размерность теплоты сгорания  $Q$  выражается в кДж/кг или кДж/м<sup>3</sup>. С увеличением возраста топлива его высшая теплота сгорания увеличивается, так как растёт доля углерода в топливе. Высшая теплота сгорания топлива является наиболее постоянной величиной, поэтому она используется для сравнения различных топлив.

Твёрдый горючий продукт, остающийся после выхода летучих, называется коксом. Масса несгоревшего остатка топлива называется золой. Свойства золы играют большую роль при сжигании топлив. Образовавшаяся после сгорания топлива зола представляет собой смесь минералов, а их сплавы, возникшие в зоне высоких температур, называются шлаками. Суммарное количество шлаков и золы принято называть зольностью топлива. Высокая зольность топлива требует установки более дорогих золоулавливающих устройств после парогенератора. Наиболее зольным топливом являются бурые угли, горючие сланцы, менее зольным — каменный уголь, антрациты и полуантрациты.

Влажность топлива бывает внешней, капиллярной и внутренней. Внутренняя влага связана с органическим и минеральным составом топлива. Капиллярная влага находится в капиллярах и порах (трещинах) топлива. Внешняя влага образуется при добыче, транспортировке и хранении топлива на открытых складах при соприкосновении с окружающей средой, например, повышенная влажность воздуха, атмосферные осадки и т.д.

Самым влажным топливом является торф (до 50%) и бурые угли (28÷42%), низкую влажность имеют антрациты и полуантрациты.

К техническим характеристикам жидкого топлива — мазута относятся вязкость и температура вспышки. Вязкость мазута положена в основу его маркировки. Маловязким является топочный мазут марки 40, используемый для растопки котлоагрегата.

К сильновязким относятся топочные мазуты марок 100 и 200. С повышением температуры вязкость мазута уменьшается. Температура вспышки мазутов составляет  $135\div 2400^{\circ}\text{C}$ . Во избежание пожарной опасности высокий подогрев мазута требует повышенной герметизации мазутопроводов. Перед подачей мазута в топку котлоагрегата его предварительно разогревают до  $100\div 1200^{\circ}\text{C}$  чтобы уменьшить его вязкость и для тонкого распыливания в форсунках горелок котла.

Газовое топливо представляет собой механическую смесь горючих и негорючих газов: метан, пропан, этан, бутан — горючие газы, и негорючие — это азот и двуокись углерода. К основным характеристикам природного газа относятся: теплота сгорания и плотность. Искусственные газы содержат больше негорючих компонентов, так называемого балласта, к которому относятся азот и кислород.

### **1.3.5. Свойства топлива**

К свойствам твёрдого топлива относятся плотность, механическая прочность, термическая устойчивость, укрупнённость кусков и т.д.

Различают истинную, кажущуюся и объёмную плотность. Истинная плотность характеризует атомную плотность топлива, взятого в объёме плотности массы без пор. Кажущаяся плотность определяется в объёме массы топлива с включением пор. Объёмная (или насыпная) плотность определяет степень пористости топливной массы в насыпанном виде и степень заполнения объёма.

Объёмная плотность топлива зависит от влажности, размера кусков и уплотнённости.

Механическая прочность топлива определяет степень его измельчения, зависит от физической структуры угля, наличия и характера минеральных включений. При длительном хранении топлива на открытом воздухе прочность углей уменьшается и уголь измельчается. Изменение механической прочности углей определяется изменением температуры, влажности, атмосферного давления и другими факторами. Окисление и выветривание углей также уменьшают их прочность, а, следовательно, и влияют на состав топлива по крупности кусков.

Термическая устойчивость топлива — это способность его выдерживать высокие температуры без растрескивания. Термическая устойчивость зависит от химического состава топлива, зольности, влажности, скорости нагрева кусков и других факторов.

К свойствам жидкого нефтяного топлива относятся: плотность, испаряемость, вязкость, температуры застывания, вспышки, воспламенения и самовоспламенения и т.д.

Вязкость является характеристикой текучести топлива и изменяется в зависимости от температуры (повышение температуры уменьшает вязкость). Увеличение вязкости топлива вызывает увеличение гидравлического сопротивления движению топлива по трубопроводу, ухудшает условия распыливания топлива в камере сгорания. Для использования жидких топлив с высокой вязкостью предусматривается его подогрев в хранилищах.

К основным свойствам газообразных топлив относятся: цвет, запах, плотность, токсичность, взрываемость. Содержание водяных паров в газообразном топливе

незначительно. Наиболее опасными компонентами газообразных топлив являются окись углерода CO, сероводород H<sub>2</sub>S и другие.

В энергетике есть понятие условного топлива. Приведённую влажность и зольность топлива мы рассматривать не будем.

При сравнении работающих установок по экономичности и другим показателям удобно пользоваться относительными характеристиками топлива, такими, например, как условное топливо и приведенные влажность и зольность.

Теплота сгорания в разных книгах колеблется в широких пределах, что часто затрудняет проведение расчетов, например, при сравнении удельных расходов топлива и норм расхода на 1 кВт·ч, на единицу продукции и т.п.

Для облегчения таких задач введено понятие условного топлива с низшей теплотой сгорания 29,33 МДж/кг (7000 ккал/кг), что отвечает теплоценности хорошего каменного угля. Для перевода любого топлива в условное необходимо рабочую низшую теплоту сгорания разделить на 29,33 (или 7000); частное от деления называют тепловым эквивалентом топлива.

Контрольные вопросы.

1. Какие основные технические характеристики твёрдого топлива Вы знаете?
2. Что называется высшей и низшей теплотой сгорания топлива?
3. Какие основные технические характеристики жидкого (мазута) топлива Вы знаете?

## **Тема 1.4. Элементы теории термодинамики**

### **1.4.1. Общие определения в технической термодинамике и теплопередаче**

Историческое развитие термодинамики связано с именами выдающихся учёных, таких, как Ломоносов, который сформулировал закон сохранения энергии. Этот закон позволил получить первое начало термодинамики, создателями которого считаются Майер, Джоуль, Гельмгольц, и другие. Открытие второго начала термодинамики, указывающего направленность термодинамических процессов, связано с такими именами, как Карно, Томсон, Больцман и другими.

Термодинамика является наукой, в которой изучаются энергия и законы превращения её из одних видов в другие. Раздел этой науки, в котором рассматриваются взаимопревращения тепловой и механической энергии, называется технической термодинамикой. Техническая термодинамика ограничивается рассмотрением преимущественно тех частей общей термодинамики, которые необходимы для изучения основных принципов работы тепловых машин и теплообменных аппаратов как в идеальных, так и реальных условиях. Наиболее подробно в технической термодинамике изучается превращение тепла в механическую работу.

Теплота и работа представляют собой различные формы движения материи, причём теплота является результатом молекулярного и внутримолекулярного хаотического движения частиц материи, а работа предполагает наличие направленного движения тела, происходящего под действием внешних сил. Работа, совершаемая в единицу времени, называется мощностью.

Тепловое движение — это особая форма движения материи, качественно отличная от обычного механического движения, при котором все части тела движутся упорядоченно, а теплота — форма теплового движения.

В Международной системе единиц СИ единицей работы является Джоуль, а мощности — Ватт. Ещё применяются внесистемные единицы. Соотношения между ними будут следующие:

Работа, энергия.....1 кгс·м=9,80665 Дж

Мощность.....1 кгс·м/с=9,80665 Вт.

Основой термодинамики как науки являются два закона, полученных на основе опыта. Это первый и второй законы термодинамики. Первый устанавливает количественную меру при переходе одного вида энергии в другой и является частным случаем всеобщего закона сохранения и превращения энергии. Второй имеет более ограниченный характер и применим к телам, которые имеют конечные размеры, но состоят из большого числа атомов и молекул. Второй закон термодинамики устанавливает направление тепловых процессов, протекающих в природе, и условия преобразования теплоты в работу.

Применяя основные законы, техническая термодинамика исследует процессы, протекающие в тепловых двигателях, и устанавливают наиболее экономичные условия их работы.

Одним из основных в технической термодинамике является понятие о термодинамической системе, представляющей собой совокупность тел, находящихся во взаимодействии как между собой, так и с окружающей средой. Простым примером термодинамической системы может служить газ, расширяющийся или сжимающийся в цилиндре с движущимся поршнем.

Взаимодействие термодинамической системы с окружающей средой может быть различного рода: механическим, тепловым, химическим, электрическим и т.д.

Из всех возможных видов взаимодействия между системой и окружающей средой в технической термодинамике рассматриваются механическое и тепловое. Для удобства изучения того или иного вида взаимодействия между системой и средой термодинамическую систему условно представляют заключённой в воображаемую оболочку, отделяющую её от окружающей среды. Оболочку в зависимости от того, под каким углом зрения изучается такое взаимодействие, считают способной передавать или не передавать от системы к окружающей среде или, наоборот, от среды к системе механическое или тепловое воздействие. Другими словами, система может быть или не быть механически или термически изолированной.

Если термодинамическая система представляет собой газообразное тело, то при наличии одного лишь механического взаимодействия объём системы под влиянием разности давлений и среды изменяется: он либо уменьшается, либо увеличивается. При одном лишь термическом взаимодействии между системой и средой вследствие их разности температур сообщается системе из окружающей среды или происходит обратное явление.

В результате взаимодействия термодинамической системы с окружающей средой состояние системы изменяется. Применительно к газу, используемому в тепловом двигателе в качестве рабочего тела, изменение состояния газа будет в общем случае проявляться в изменении его температуры, удельного объёма и давления. Эти

характерные для данной системы величины называются основными термодинамическими параметрами её состояния. Таким образом, результатом взаимодействия системы с окружающей средой будет также и изменение параметров состояния системы.

Непрерывно протекающее состояния системы, происходящее в результате её механического, теплового или в общем случае тепломеханического взаимодействия с окружающей средой, называют термодинамическим процессом.

Когда вследствие взаимодействия с окружающей средой объём термодинамической системы уменьшается, то происходит процесс сжатия системы, и наоборот, при увеличении её объёма происходит процесс расширения системы. Основным признаком процесса является изменение хотя бы одного из параметров состояния.

Теплопередача является сравнительно молодой наукой. Особенно бурно она начала развиваться с 50-х годов прошлого века. Большой вклад в развитие учения о теплообмене сделаны многими российским учёными: Кирпичёвым, Михеевым и т.д. Особенно бурное развитие теплопередачи происходило в 70—80-х годах прошлого века в связи с внедрением интенсивных способов переноса теплоты в тепловой и атомной энергетике.

Рассмотрим общие понятия и термины из области теплопередачи.

Теплопередача — это учение о процессах распространения тепла. Распространение тепла осуществляется различными способами: теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением.

Теплопроводность представляет собой процесс распространения тепловой энергии при непосредственном соприкосновении отдельных частей тела, имеющих различные температуры. Теплопроводность обусловлена движением микрочастиц тела.

Конвекция возможна только в текучей среде. Под конвекцией тепла понимают процесс переноса тепловой энергии при перемещении объёмов жидкости или газа в пространстве из области с одной температурой в область с другой. При этом перенос тепла неразрывно связан с переносом самой среды.

Тепловое излучение — это процесс распространения тепловой энергии с помощью электромагнитных волн. При тепловом излучении происходит двойное превращение энергии: тепловая энергия излучающего тела переходит в лучистую и обратно — лучистая энергия, поглощаясь телом, переходит в тепловую. В природе и технике элементарные процессы распространения тепла — теплопроводность, конвекция и тепловое излучение — очень часто происходят совместно. Теплопроводность в чистом виде большей частью имеет место лишь в твёрдых телах.

Конвекция тепла всегда сопровождается теплопроводностью, так как при движении жидкости или газа неизбежно соприкосновение отдельных частиц, имеющих различные температуры. Совместный процесс конвекции и теплопроводности называется конвективным теплообменом. Обычно при инженерных расчётах определяют конвективный теплообмен между потоком жидкости или газа и поверхностью твёрдого тела; этот процесс конвективного теплообмена называется конвективной теплоотдачей. Конвективная теплоотдача часто сопровождается теплоотдачей излучения.

В технике и быту часто происходят процессы теплообмена между различными жидкостями, разделёнными твёрдой стенкой. Процесс передачи тепла от горячей жидкости к холодной через разделяющую их стенку называется теплопередачей.

В качестве стенки может быть труба: внутри её протекает вода, а пар снаружи греет эту воду. Процесс теплопередачи осуществляется различными элементарными процессами теплопереноса, происходящими одновременно.

Например, парообразующие трубы котельного агрегата получают тепло от продуктов сгорания топлива тремя способами: теплопроводностью  $\kappa$ , конвекцией и тепловым излучением. Через слой наружного загрязнения, металлическую стенку и слой накипи тепло передаётся теплопроводностью. От внутренней поверхности трубы к омывающей её жидкости тепло отдаётся конвекцией и теплопроводностью. Таким образом, в общем случае процесс теплопередачи может осуществляться всеми тремя способами переноса тепла.

Процессы теплообмена могут происходить в различных средах: чистых веществах и разных смесях, при изменении и без изменения фазового состояния рабочих сред и тому подобное. В зависимости от этого теплообмен протекает по-особому и описывается различными уравнениями.

В природе и технике многие процессы переноса тепловой энергии сопровождается переносом вещества. Например, при испарении воды в воздух, кроме теплообмена, имеет место и перенос образовавшегося пара в паровоздушной смеси. В общем случае перенос пара осуществляется как молекулярным, так и конвективным путём. Совместный молекулярный и конвективный перенос массы называется конвективным массообменом. При наличии массообмена процесс теплообмена усложняется. Теплота дополнительно может переноситься вместе с массой диффундирующих веществ.

#### **1.4.2. Основные термодинамические параметры рабочего тела**

В термодинамике в качестве рабочих тел используются газы и пары, так как они имеют большой коэффициент объёмного расширения.

Молекулы всякого тела находятся в непрерывном и быстром движении, интенсивность которого определяет степень нагретости этого тела, то есть его температуру. Во всяком реальном теле между молекулами действуют в той или иной мере силы сцепления, величина которых определяется агрегатным состоянием тела. При твёрдом состоянии тела силы взаимного притяжения молекул велики, вследствие чего тело имеет определённую форму и изменение её связано с необходимостью приложить к телу достаточно большое усилие для нарушения межмолекулярных связей. В жидком состоянии межмолекулярные силы ослаблены. Поэтому тело неспособно сохранять определённую форму, а принимает форму сосуда, в котором оно находится. В газообразном состоянии молекулы находятся на столь больших расстояниях друг от друга, что межмолекулярные силы весьма малы, и поэтому газ стремится к беспредельному расширению. Величина сил межмолекулярного воздействия у газа определяется степенью удаления газ от жидкой фазы: чем больше перегрет газ, тем силы слабее. Малоперегретые газы, сравнительно недалеко отстоящие от жидкого состояния, называются парами. Молекулы газа движутся хаотически с огромными скоростями, непрерывно соударяясь, их движение одинаково возможно в любом направлении.

Беспорядочно движущиеся молекулы газа, находящегося в замкнутом сосуде, ударяются о стенки этого сосуда. Совокупность таких ударов воспринимается стенками сосуда как некоторое непрерывное действующее на них усилие. Величину такого

среднего результирующего усилия, приходящегося на единицу поверхности сосуда и действующего перпендикулярно к ней, называют давлением газа.

Итак, мы уже знаем, что для превращения тепла в работу требуется определённая совокупность источников тепла и материальных тел (например, газов, паров, жидкостей), находящихся между собой в тепловом и механическом взаимодействии. Источники тепла и материальные тела образуют так называемую термодинамическую систему. Материальные тела, входящие в термодинамическую систему, разделяют на источники тепла и рабочие тела, которые под воздействием источника тепла совершают механическую работу.

Для определения конкретных физических условий, в которых находится термодинамическая система, используется ряд показателей, называемых параметрами состояния. В число основных параметров входят: абсолютная температура  $T$ , абсолютное давление  $p$  и удельный объём  $v$  или величина. Обратная удельному объёму – плотность  $\rho$ ).

Напомню вам, что различают следующие виды давлений:

Атмосферное давление  $p_b$  создаётся массой воздушного столба земной атмосферы. Оно имеет переменное значение, которое зависит от высоты местности над уровнем моря, географической широты и метеорологических условий, то есть от погоды.

Избыточное давление  $p$  выражает превышение давления среды над атмосферным давлением.

Вакуумметрическое давление  $p_v$  среды характеризует давление (вакуум), которое ниже атмосферного давления. Иногда вакуумметрическое давление выражается в виде относительной величины  $V$  процентах атмосферного давления:

%.

Абсолютное давление  $p_a$  среды — это полное давление, которое равно сумме атмосферного и избыточного давлений:

Абсолютное давление может быть больше  $p_a = p + p_b$  или меньше атмосферного на величину вакуумметрического давления  $p_a = p_b - p_v$ . В частном случае, когда избыточное давление  $p$  или вакуумметрическое давление  $p_v$  равно нулю, абсолютное давление равно атмосферному.

Последовательность изменения состояния рабочего тела в термодинамической системе называется термодинамическим процессом. Основным признаком процесса является изменение хотя бы одного из параметров состояния.

Абсолютная температура является одним из основных параметров, характеризующих тепловое состояние тела. Для измерения абсолютной температуры применяется шкала Кельвина. Единица деления этой шкалы (кельвин) равна градусу шкалы Цельсия, в которой интервал температур от точки таяния льда до кипения воды при атмосферном давлении разбит на 100 равных частей (градусов). В шкале Кельвина за температуру таяния льда принята величина 273,15 К, а в шкале Цельсия принят 00С. Таким образом,  $T, K = t, 0C + 273,15$ .

Удельный объём рабочего вещества – это объём, занимаемый массой в 1 кг этого тела. Так, если  $G$  кг занимает объём  $V$  м<sup>3</sup>, то удельный объём будет равен:  $v, м^3/кг$ .

Под плотностью рабочего тела понимают величину, обратную удельному объёму, то есть массу вещества в 1 м<sup>3</sup> рабочего тела.  $\rho, кг/м^3$ .

Из определения понятия основных термодинамических параметров состояния рабочего тела следует, что их значения не зависят от того, каким путём рабочее тело

пришло в рассматриваемое состояние. Это свойство параметров состояния является одной из их специфических особенностей.

Состояние термодинамической системы может быть равновесным и неравновесным.

Равновесное состояние изолированной термодинамической системы характеризуется постоянством по всему объёму, занимаемому системой, и таких параметров, как давление и температура. Это есть термическое равновесие. В неизолированной системе равновесное состояние однозначно определяется внешними условиями, то есть давлением и температурой внешней среды.

В равновесных термодинамических системах отсутствуют стационарные потоки, например, теплоты или вещества. Всякая изолированная система с течением времени приходит в равновесное состояние, которое и остаётся затем неизменным, пока система не будет выведена из него внешним воздействием.

Если в разных частях объёма, занимаемого рабочим телом, нарушается постоянство давления, то система приходит в неравновесное механическое состояние. Если нарушается постоянство температур, то система приходит в неравновесное термическое состояние. Короче говоря, все три основных параметра связаны между собой определёнными законами.

В тепловых двигателях в качестве рабочего тела применяют реально существующие газы, но для упрощения в технической термодинамике широко применяется понятие об идеальном газе.

Под идеальным газом понимают совокупность материальных вполне упругих молекул, обладающих очень малыми объёмами, находящихся в состоянии хаотического движения и лишённых сил взаимодействия. Под взаимодействием молекул нужно понимать силы взаимного притяжения и отталкивания. Отличие реального газа от идеального заключается в том, что в реальном газе в той или иной мере проявляются силы молекулярного взаимодействия, и в том, что фактически молекулы его занимают хотя и очень малые, но, тем не менее, вполне конкретные конечные по величине объёмы. Чем дальше отстоят молекулы газа друг от друга и чем меньше их линейные размеры по сравнению с расстояниями, отделяющими их друг от друга, тем меньше становятся силы взаимодействия между ними и тем меньше реальный газ будет отличаться от идеального.

Ко многим применяемым в технике газам (кислороду, водороду, азоту, воздуху, двуокиси углерода, газообразным продуктам сгорания топлива) в определённом диапазоне температур и давлений можно без существенных погрешностей применять законы, справедливые для идеальных газов. Однако за пределами этого диапазона к этим газам указанные законы не применимы. Свойства и поведение паров в технической термодинамике рассматриваются особо. Свойства пара мы будем рассматривать позднее, во втором семестре.

#### **1.4.3. Первый закон термодинамики**

В технической термодинамике рассматривают частный случай общего закона сохранения и превращения энергии, устанавливающий эквивалентность между теплотой и механической работой. Закон сохранения и превращения энергии устанавливает, что энергия не уничтожается и не создаётся вновь, а лишь переходит из одной формы в другую в различных физических, химических и других процессах. Переход энергии

одного вида в другой происходит по закону эквивалентности, то есть определённому количеству энергии данного вида всегда соответствует одно и то же количество энергии другого вида. И ещё: по закону эквивалентности теплота может превращаться в механическую работу или, наоборот, работа в теплоту в строго эквивалентных количествах. Это означает, что из данного количества теплоты в случае её полного превращения в работу получается строго определённое и всегда одно и то же количество работы, точно также, как и из данного количества работы при её полном превращении в тепло получается строго определённое и всегда одно и то же количество теплоты.

Эквивалентность между работой и теплотой выражается следующим уравнением:

$Q=AL$  или  $L=EQ$ , где:

$L$  — работа, перешедшая в теплоту, кгс·м;

$Q$  — теплота, полученная за счёт работы, ккал;

$A$  — коэффициент пропорциональности, который называется термическим эквивалентом работы;

$E$  — механический эквивалент теплоты.

Значение механического эквивалента принимается равным:  $E=427$  кгс·м/ккал, а  $A=1/427$  ккал/(кгс·м).

Однако при применении системы СИ, в которой работа и количество теплоты выражаются в одних и тех же единицах — джоулях, эквиваленты  $A=E=1$ , а уравнение закона сохранения энергии будет выглядеть так:  $Q=L$ .

Первый закон термодинамики имеет огромное теоретическое значение. Он находит широкое практическое применение для расчётов процессов изменения состояния рабочего тела. Этот закон устанавливает взаимосвязь между количеством сообщённого рабочему телу или отведённого от него тепла, величиной изменения его внутренней энергии и совершённой рабочим телом работы изменения объёма.

Из первого закона термодинамики следует, что полная энергия термодинамической системы в конце любого термодинамического процесса равна алгебраической сумме энергий её в начале процесса и количества энергий, подведённых к системе и отведённых от неё в ходе процесса.

Контрольные вопросы.

1. Что такое мощность? Должно быть известно из школьной программы.
2. Какой параметр не входит в число основных параметров термодинамической системы?  
А. Температура. В. Удельный объём. С. Удельный вес. D. Давление.
3. Какое давление выражает превышение давления среды над атмосферным давлением.  
А. Вакуумметрическое. В. Абсолютное. С. Избыточное.
4. Какая единица давления входит в систему СИ?  
А. Бар. В. кг/см<sup>2</sup> С. мм рт ст. D. Н/м<sup>2</sup> (Па)
5. По какой шкале измеряется температура по Кельвину?  
А. По стоградусной шкале. В. По термодинамической. С. по 180-градусной.
6. Какими способами происходит распространение тепла от одного тела к другому?
7. Что такое теплопроводность?
8. Что такое конвекция?
9. Что такое тепловое излучение?

#### **1.4.4. Термодинамический процесс**

Рассмотрим более подробно, как совершается термодинамический процесс. Всякое изменение параметров состояния рабочего тела называется термодинамическим процессом. Каждый процесс совершается при тепловом и механическом взаимодействии рабочего тела с внешней окружающей средой, состояние которой также изменяется. При бесконечно медленном изменении состояния окружающей среды термодинамический процесс будет совершаться с бесконечно малой скоростью. Поэтому давление и температура окружающей среды и также рабочего тела в каждый момент будут различаться на бесконечно малую величину.

При осуществлении такого процесса температура и давление по всей массе рабочего тела будут иметь одно и то же значение, и поэтому рабочее тело будет находиться в равновесном состоянии. В технической термодинамике рабочим телом обычно бывает газ и пары.

Термодинамический процесс, состоящий из непрерывного ряда равновесных состояний, называется равновесным.

Равенство давлений по всей массе рабочего тела характеризует его механическое равновесие, а равенство температур — термическое равновесие. Отсюда можно сделать вывод: необходимым условием протекания равновесных процессов является существование механического и термического равновесия рабочего тела.

Характерным свойством равновесных термодинамических процессов является их обратимость.

Это значит, что если газ при расширении проходит промежуточные равновесные состояния а и б, то при обратном процессе сжатия из состояния 2 газ пройдет те же состояния, но в обратной последовательности б и а и возвратится в первоначальное состояние 1. Поэтому такие равновесные процессы называются обратимыми.

На основании всего изложенного можно сделать вывод: в результате протекания сначала прямого, а затем обратного равновесных процессов в термодинамической системе «рабочее тело — окружающая среда» никаких изменений не произойдет.

Однако, равновесные обратимые процессы применимы только к идеальному газу. Все реальные процессы протекают с большей скоростью и при наличии конечной разности температур и давлений между газом и окружающей средой. Поэтому термическое и механическое равновесие газа не соблюдается, и эти процессы являются неравновесными, а, следовательно, и необратимыми.

Наличие трения является характерным признаком необратимых процессов и сопровождается потерей внешней работы.

Изучать реальные необратимые процессы весьма трудно, и поэтому техническая термодинамика изучает только теоретические обратимые процессы, так как чаще всего на практике отклонение реальных процессов от идеальных незначительно и не принимается во внимание. Если отклонения велики, то переход от идеальных процессов к реальным осуществляется путём введения поправочных коэффициентов, полученных на основании опытов.

#### **1.4.5. Энтальпия**

В технической термодинамике подводимое к телу тепло является положительным, а отводимое — отрицательным. Изменение внутренней энергии газа является положительным при возрастании температуры газа и отрицательным при её уменьшении.

В технической термодинамике важную роль играет величина суммы внутренней энергии системы  $u$  и произведение давления системы  $p$  на величину удельного объёма системы  $v$ . Эта величина называется удельной энтальпией, или теплосодержанием  $h$ :  $h=u+pv$ . В общем виде энтальпия равна:  $H=U+PV$  и измеряется в джоулях (Дж).

Удельная энтальпия представляет собой энтальпию системы, содержащей 1 кг вещества, и измеряется в кДж/кг. Энтальпия также является функцией состояния. То есть параметром состояния. Так как энтальпия является функцией состояния, то изменение энтальпии в любом термодинамическом процессе определяется только начальным и конечным состоянием вещества и не зависит от характера процесса.

По международному соглашению за начало отсчёта энтальпии для воды и водяного пара принята так называемая тройная точка ( $T=273,16$  К и  $P=0,0006$  Па), в которой возможно одновременное существование трёх фаз: льда, жидкости и пара.

За начало отсчёта энтальпии для газов может быть принята температура  $T=0$  К.

В заключение этого вопроса хочется сказать следующее. Экспериментальное подтверждение закона сохранения энергии было получено в работах русских и зарубежных учёных. В 1840 году русский академик Гесс впервые после Ломоносова сформулировал закон сохранения энергии. В середине XIX века английский физик Джоуль опытным путём установил, что при совершении одной какой-либо работы выделяется одно и то же количество тепла. Понятно, что справедливо и обратное явление, когда за счёт затраты тепла получается всегда одно и то же количество работы.

Также Джоуль установил, что такая эквивалентность тепла и работы не зависит от способа получения тепла, вида работы, температуры тела и тому подобное. Эквивалентность тепла и работы является опытным подтверждением всеобщего закона сохранения и превращения энергии, который в применении к понятиям термодинамики носит название первого закона термодинамики.

## Раздел 2. Гидроэлектростанции



Крупнейшая в мире ГЭС — Три ущелья.

Крупнейшая российская ГЭС — Саяно-Шушенская



Плотина Серрон Гранде в Сальвадоре, вогнутая для увеличения прочности тела плотины

### Тема 2.1. Принцип действия гидроэлектростанции

**Гидроэлектростанция (ГЭС)** — электростанция, использующая в качестве источника энергии движение водных масс в русловых водотоках и приливных движениях; вид гидротехнического сооружения. Гидроэлектростанции обычно строят на реках. Для эффективного производства электроэнергии на ГЭС необходимы два основных фактора: гарантированная обеспеченность водой круглый год и возможно большие уклоны реки, благоприятствуют гидростроительству каньонообразные виды рельефа.



Нижне-Бурейская ГЭС, 2017 Самая новая ГЭС в России

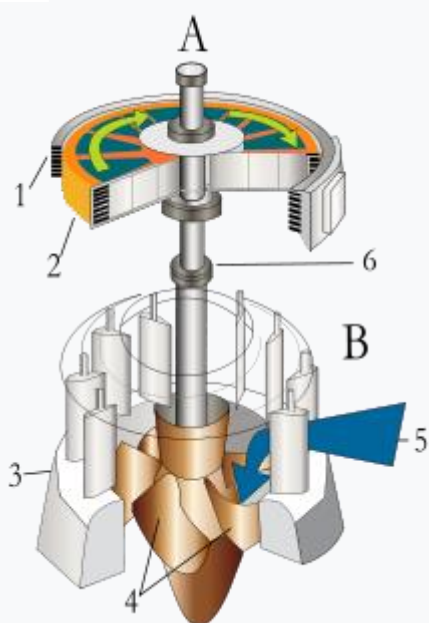


Схема плотины гидроэлектростанции



Схема плотины гидроэлектростанции

Принцип работы ГЭС состоит в том, что энергия напора воды с помощью гидроагрегата преобразуется в электроэнергию.

Необходимый напор воды обеспечивается посредством сооружения плотины и водохранилища и, как следствие, концентрации реки в определённом месте; или же естественным потоком воды, зачастую с деривацией. В некоторых случаях для получения необходимого напора используют совместно и плотину, и деривацию.

В гидроагрегате вода поступает на лопасти гидротурбины, которая приводит в действие гидрогенератор, и вырабатывающий непосредственно электроэнергию. Всё энергетическое оборудование располагается в здании гидроэлектростанции. В зависимости от назначения, оно имеет своё определённое деление. В машинном зале расположен электрогенератор. Есть ещё всевозможное дополнительное оборудование, устройства управления и контроля работы ГЭС, трансформаторная станция, распределительные устройства и многое другое.

### **2.1.2 Особенности гидроэлектростанций**

Стоимость электроэнергии на российских ГЭС более чем в два раза ниже, чем на тепловых электростанциях

- Турбины ГЭС допускают работу во всех режимах от первой до максимальной мощности и позволяют плавно изменять мощность при необходимости, выступая в качестве регулятора выработки электроэнергии.
- Гидроагрегат очень быстро набирает мощность после подачи воды (от нуля до полной мощности — от 30 секунд до 2 минут), что позволяет использовать ГЭС в манёвренном режиме.
- Сток реки является возобновляемым источником энергии.
- Строительство ГЭС обычно более капиталоемкое, чем тепловых станций.
- Часто эффективные ГЭС более удалены от потребителей, чем тепловые станции.
- Водохранилища часто занимают значительные территории, но примерно с 1963 г. начали использоваться защитные сооружения (Киевская ГЭС), которые ограничивали площадь водохранилища, и, как следствие, ограничивали площадь затопляемой поверхности (поля, луга, посёлки).
- Плотины зачастую изменяют характер рыбного хозяйства, поскольку перекрывают путь к нерестилищам проходным рыбам, однако часто благоприятствуют увеличению запасов рыбы в самом водохранилище и осуществлению рыбоводства.
- Водохранилища ГЭС, с одной стороны, улучшают судоходство, но с другой — требуют применения шлюзов для перевода судов с одного бьефа на другой.
- Водохранилища делают климат более умеренным.

## **Тема 2.2 Классификация ГЭС**

### **2.2.1 Классификация ГЭС по вырабатываемой мощности**

Гидроэлектрические станции разделяются в зависимости от **вырабатываемой мощности**:

- Мощные — вырабатывают от 25 МВт и выше;
- средние — до 25 МВт;
- малые гидроэлектростанции — до 5 МВт.

Мощность ГЭС зависит от напора и расхода воды, а также от КПД используемых турбин и генераторов. Из-за того, что по природным законам уровень воды постоянно меняется, в зависимости от сезона, а также ещё по ряду причин, в качестве выражения мощности гидроэлектрической станции принято брать цикличную мощность. К примеру, различают годичный, месячный, недельный или суточный циклы работы гидроэлектростанции.



Типичная для горных районов Китая малая ГЭС (ГЭС Хоуцзыбао, уезд Синшань округа Ичан, пров. Хубэй). Вода поступает с горы по чёрному трубопроводу.

### 2.2.2 Классификация ГЭС по напору воды

Гидроэлектростанции также делятся в зависимости от максимального использования **напора воды**:

- Высоконапорные — более 60 м;
- Средненапорные — от 25 м;
- Низконапорные — от 3 до 25 м.

В зависимости от напора воды, в гидроэлектростанциях применяются различные виды турбин. Для высоконапорных — ковшовые и радиально-осевые турбины с металлическими спиральными камерами. На средненапорных ГЭС устанавливаются поворотнлопастные и радиально-осевые турбины, на низконапорных — поворотнлопастные турбины в железобетонных камерах.

Принцип работы всех видов турбин схож — поток воды поступает на лопасти турбины, которые начинают вращаться. Механическая энергия, таким образом, передаётся на гидрогенератор, который и вырабатывает электроэнергию. Турбины отличаются некоторыми техническими характеристиками, а также камерами — стальными или железобетонными, и рассчитаны на различный напор воды.

### 2.2.3 Классификация ГЭС по принципу использования природных ресурсов

Гидроэлектрические станции также разделяются в зависимости от **принципа использования природных ресурсов**, и, соответственно, образующегося напора воды. Здесь можно выделить следующие ГЭС:

- **плотинные ГЭС.** Это наиболее распространённые виды гидроэлектрических станций. Напор воды в них создаётся посредством установки плотины, полностью перегораживающей реку, или поднимающей уровень воды в ней на

необходимую отметку. Такие гидроэлектростанции строят на многоводных равнинных реках, а также на горных реках, в местах, где русло реки более узкое, сжатое.

- **приплотинные ГЭС.** Строятся при более высоких напорах воды. В этом случае река полностью перегораживается плотиной, а само здание ГЭС располагается за плотиной, в нижней её части. Вода, в этом случае, подводится к турбинам через специальные напорные тоннели, а не непосредственно, как в русловых ГЭС.

- **деривационные ГЭС.** Такие электростанции строят в тех местах, где велик уклон реки. Необходимый напор воды в ГЭС такого типа создаётся посредством деривации. Вода отводится из речного русла через специальные водоотводы. Последние — спрямлены, и их уклон значительно меньший, нежели средний уклон реки. В итоге вода подводится непосредственно к зданию ГЭС. Деривационные ГЭС могут быть разного вида — безнапорные или с напорной деривацией. В случае с напорной деривацией, водовод прокладывается с большим продольным уклоном. В другом случае в начале деривации на реке создаётся более высокая плотина, и создаётся водохранилище — такая схема ещё называется смешанной деривацией, так как используются оба метода создания необходимого напора воды.

- **гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС).** Такие станции способны аккумулировать вырабатываемую электроэнергию и пускать её в ход в моменты пиковых нагрузок. Принцип работы следующий: в определённые периоды (не пиковой нагрузки), агрегаты ГАЭС работают как насосы от внешних источников энергии и закачивают воду в специально оборудованные верхние бассейны. Когда возникает потребность, вода из них поступает в напорный трубопровод и приводит в действие турбины.

В состав гидроэлектрических станций, в зависимости от их назначения, также могут входить дополнительные сооружения, такие как шлюзы или судоподъёмники, способствующие навигации по водоёму, рыбопропускные, водозаборные сооружения, используемые для ирригации, и многое другое.

Ценность гидроэлектрической станции состоит в том, что для производства электрической энергии они используют возобновляемые природные ресурсы. В виду того, что потребности в дополнительном топливе для ГЭС нет, конечная стоимость получаемой электроэнергии значительно ниже, чем при использовании других видов электростанций.

### Тема 2.3 Преимущества и недостатки ГЭС

---

#### Преимущества:

- Использование возобновляемой энергии;
- очень дешёвая электроэнергия;
- работа не сопровождается вредными выбросами в атмосферу;
- быстрый (относительно ТЭЦ/ТЭС) выход на режим выдачи рабочей мощности после включения станции.
- простая эксплуатация
- минимальные затраты труда

#### Недостатки:

- затопление пахотных земель;
- строительство ведётся только там, где есть большие запасы энергии воды;

- горные реки опасны из-за высокой сейсмичности районов;
- экологические проблемы: сокращённые и нерегулируемые попуски воды из водохранилищ по 10-15 дней (вплоть до их отсутствия), приводят к перестройке уникальных пойменных экосистем по всему руслу рек, как следствие, загрязнение рек, сокращение трофических цепей, снижение численности рыб, элиминация беспозвоночных водных животных, повышение агрессивности компонентов гноса (мошки) из-за недоедания на личиночных стадиях, исчезновение мест гнездования многих видов перелётных птиц, недостаточное увлажнение пойменной почвы, негативные растительные сукцессии (обеднение фитомассы), сокращение потока биогенных веществ в океаны.

## Тема 2.4 История гидроэнергии

### 2.4.1 История гидроэнергии в мире

Гидроэнергия использовалась с древних времён, для молки муки и других нужд. При этом приводом служил колёсный механизм, вращаемый потоком воды. В середине 1770-х годов французский инженер Бернар Форест де Bélidor в опубликованной им работе *Architecture Hydraulique*, привёл описание гидромашин с вертикальной и горизонтальной осью вращения. К концу XIX века появились электрические генераторы, которые могли работать в сочетании с гидроприводом. Растущий спрос на электроэнергию вследствие Промышленной революции дал толчок в их развитии. В 1878 году заработала «первая в мире ГЭС», разработанная английским изобретателем Уильямом Джорджем Армстронгом в Нортумберленде, Англия. Она представляла собой агрегат, предназначенный для питания одной единственной дуговой лампы в его картинной галерее. Старая электростанция № 1 *Schoelkopf* возле Ниагарского водопада в США начала производить электричество в 1881 году. Первая гидроэлектростанция Эдисона для целей освещения, *Vulcan Street* начала работать 30 сентября 1882 года, в г. Аплтон, штат Висконсин, США, и выдавала мощность около 12,5 киловатт.

Но когда встал вопрос промышленного использования электричества, то оказалось, что под постоянный ток требуется слишком толстая медная проводка. Поэтому при оборудовании шахты Gold King Mine в Колорадо отдали предпочтение проекту компании Вестингауза, основанному на патентах Николы Теслы, то есть системе переменного тока двух фаз. Поныне ГЭС Эймса в Колорадо (en:Ames, Colorado) считается первым коммерчески значимым и успешным промышленным использованием электрического тока. До этого момента все применение сводилось преимущественно к бытовым и городским нуждам освещения домов и улиц постоянным током. А ГЭС в Эймсе вошла в «Перечень значимых объектов и событий IEEE» (en:List of IEEE milestones). Сам Тесла писал в автобиографии, что в проекте участвовать отказался, поскольку считал, что частота переменного тока должна составить 60 Гц, а не 133, как это было задумано инженерами компании Вестингауза. Мнение Теслы было учтено при оборудовании ГЭС на Ниагарском водопаде двумя годами позже, частота 60 Гц поныне является стандартной на территории США. Переменный ток, таким образом, стал де-факто стандартом для построения ГЭС, что явилось важной вехой в ходе «войны токов». Использовались как две фазы (под двигатели Николы Теслы), так и три фазы (под проекты Доливо-Добровольского) с трансформаторами на соответствующее число фаз. Ныне именно три

фазы используются повсеместно, хотя доказательств каких-либо преимуществ такого технического решения в литературе не приводится.

К 1886 году в США и Канаде было уже 45 гидроэлектростанций. К 1889 году только в США их было 200. В начале XX века коммерческими компаниями строится много небольших ГЭС в горах недалеко от городских районов. К 1920 году до 40 % электроэнергии, производимой в Соединённых Штатах вырабатывалось на ГЭС. В 1925 году в Гренобле (Франция) состоялась Международная выставка гидроэнергетики и туризма, которую посетили более одного миллиона человек. Одной из вех в освоении гидроэнергетики как США, так и в мире в целом стало строительство в 1930-х Плотины Гувера.

#### 2.4.2 История гидроэнергии в России

Наиболее достоверным считается, что первой гидроэлектростанцией в России была Берёзовская (Зырянская) ГЭС (ныне территория Республики Казахстан), построенная в Рудном Алтае на реке Берёзовке (приток р. Бухтармы) в 1892 году. Она была четырёхтурбинной, общей мощностью 200 кВт и предназначалась для обеспечения электричеством шахтного водоотлива из Зырянского рудника. Первой промышленной гидроэлектростанцией в России была ГЭС "Белый Уголь" в г. Ессентуки, построенная в 1903 году (ГЭС «Белый уголь»).

На роль первой также претендует Ныгринская ГЭС, которая появилась в Иркутской губернии на реке Ныгри (приток р. Вачи) в 1896 году. Энергетическое оборудование станции состояло из двух турбин с общим горизонтальным валом, вращавшим три динамо-машины мощностью по 100 кВт. Первичное напряжение преобразовывалось четырьмя трансформаторами трёхфазного тока до 10 кВ и передавалось по двум высоковольтным линиям на соседние прииски. Это были первые в России высоковольтные ЛЭП. Одну линию (длиной 9 км) проложили через гольцы к прииску Негаданному, другую (14 км) — вверх по долине Ныгри до устья ключа Сухой Лог, где в те годы действовал прииск Ивановский. На приисках напряжение трансформировалось до 220 В. Благодаря электроэнергии Ныгринской ГЭС в шахтах установили электрические подъёмники. Кроме того, электрифицировали приисковую железную дорогу, служившую для вывоза отработанной породы, которая стала первой в России электрифицированной железной дорогой.

Одной из первых можно считать ГЭС, построенную в 1897 году бельгийскими горно-промышленниками в Алагирском ущелье Северной Осетии в 7 км от современной Зарамагской ГЭС-1. Она использовалась для нужд Садонского рудоуправления. Ее мощность составляла 750 л.с. Сохранившиеся здания и сегодня используются под электротехнические нужды.

Россия имела достаточно богатый опыт промышленного гидростроительства, в основном, частными компаниями и концессиями. Информация об этих ГЭС, построенных в России за последнее десятилетие XIX века и первые 20 лет XX столетия, достаточно разрознена, противоречива и требует специальных исторических исследований.

##### Первая очередь строительства ГЭС

| Район    | Название   | Мощность, тыс. кВт |
|----------|------------|--------------------|
| Северный | Волховская | 30                 |

| Район      | Название        | Мощность, тыс. кВт |
|------------|-----------------|--------------------|
|            | Нижнесвирская   | 110                |
|            | Верхнесвирская  | 140                |
| Южный      | Александровская | 200                |
| Уральский  | Чусовая         | 25                 |
| Кавказский | Кубанская       | 40                 |
|            | Краснодарская   | 20                 |
|            | Терская         | 40                 |
| Сибирь     | Алтайская       | 40                 |
| Туркестан  | Туркестанская   | 40                 |

В советский период развития энергетики упор делался на особую роль единого народнохозяйственного плана электрификации страны — ГОЭЛРО, который был утверждён 22 декабря 1920 года. Этот день был объявлен в СССР профессиональным праздником — Днём энергетика. Глава плана, посвящённая гидроэнергетике, называлась «Электрификация и водная энергия». В ней указывалось, что гидроэлектростанции могут быть экономически выгодными, главным образом, в случае комплексного использования: для выработки электроэнергии, улучшения условий судоходства или мелиорации. Предполагалось, что в течение 10-15 лет в стране можно соорудить ГЭС общей мощностью 21 254 тыс. лошадиных сил (около 15 млн кВт), в том числе в европейской части России — мощностью 7394, в Туркестане — 3020, в Сибири — 10 840 тыс. л. с. На ближайшие 10 лет намечалось сооружение ГЭС мощностью 950 тыс. кВт, однако в последующем было запланировано сооружение десяти ГЭС общей рабочей мощностью первых очередей 535 тыс. кВт.

Хотя уже за год до этого, в 1919 году, Совет Рабочей и Крестьянской Оборона признал строительства Волховской и Свирской гидростанций объектами, имеющими оборонное значение. В том же году началась подготовка к возведению Волховской ГЭС, первой из гидроэлектростанций, возведённых по плану ГОЭЛРО.

## Тема 2.5 Гидроэлектростанции мира

### 2.5.1 Крупнейшие ГЭС в мире

| Наименование      | Мощность, ГВт | Среднегодовая выработка, млрд кВт·ч | Собственник              | География   |
|-------------------|---------------|-------------------------------------|--------------------------|---|
| <u>Три ущелья</u> | 22,50         | 98,00                               |                          | р. <u>Янцзы</u> ,<br>г. <u>Сандоупин</u> , <u>Китай</u>               |
| <u>Итайпу</u>     | 14,00         | 92,00                               | <u>Итайпу-Бинасионал</u> | р. <u>Парана</u> , г. <u>Фос-ду-Игуасу</u> , <u>Бразилия/Парагвай</u> |
| <u>Силоду</u>     | 13,90         | 64,80                               |                          | р. <u>Янцзы</u> , <u>Китай</u>  |

| Наименование        | Мощность,<br><u>ГВт</u> | Среднегодовая<br>выработка,<br>млрд <u>кВт·ч</u> | Собственник                           | География                             |
|---------------------|-------------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
| <u>Гури</u>         | 10,30                   | 40,00  |                                       | р. <u>Карони</u> , <u>Венесуэла</u>   |
| <u>Черчилл-Фолс</u> | 5,43                    | 35,00  | Newfoundland<br>and Labrador<br>Hydro | р. <u>Черчилл</u> , <u>Канада</u>     |
| <u>Тукуруи</u>      | 8,30                    | 21,00  | <u>Eletrobrás</u>                     | р. <u>Токантинс</u> , <u>Бразилия</u> |

### 2.5.2 Крупнейшие ГЭС в России

По состоянию на 2017 год в России имеется 15 действующих гидроэлектростанций свыше 1000 МВт, и более сотни гидроэлектростанций меньшей мощности.

| Наименование               | Мощность,<br><u>ГВт</u> | Среднегодовая<br>выработка,<br>млрд <u>кВт·ч</u> | Собственник                               | География  |
|----------------------------|-------------------------|--|---|--|
| <u>Саяно-Шушенская ГЭС</u> | 6,40                    | 23,50  | <u>РусГидро</u>                           | р. <u>Енисей</u> , г. <u>Саяногорск</u> , рп. <u>Черёмушки</u>                                       |
| <u>Красноярская ГЭС</u>    | 6,00                    | 20,40  | <u>ЕвроСибЭнерго</u>                      | р. <u>Енисей</u> , г. <u>Дивногорск</u>  |
| <u>Братская ГЭС</u>        | 4,52                    | 22,60  | <u>ЕвроСибЭнерго</u>                      | р. <u>Ангара</u> , г. <u>Братск</u>  |
| <u>Усть-Илимская ГЭС</u>   | 3,84                    | 21,70  | <u>ЕвроСибЭнерго</u>                      | р. <u>Ангара</u> , г. <u>Усть-Илимск</u>   |
| <u>Богучанская ГЭС</u>     | 3,00                    | 17,60  | <u>РусГидро</u> , <u>Русский алюминий</u> | р. <u>Ангара</u> , г. <u>Кодинск</u>   |
| <u>Волжская ГЭС</u>        | 2,66                    | 11,63  | <u>РусГидро</u>                           | р. <u>Волга</u> , г. <u>Волгоград</u> и г. <u>Волжский</u><br>(плотина ГЭС находится между городами) |
| <u>Жигулёвская ГЭС</u>     | 2,46                    | 10,34  | <u>РусГидро</u>                           | р. <u>Волга</u> , г. <u>Жигулёвск</u>  |
| <u>Бурейская ГЭС</u>       | 2,01                    | 7,10   | <u>РусГидро</u>                           | р. <u>Буря</u> , пос. <u>Талакан</u>   |
| <u>Чебоксарская ГЭС</u>    | 1,40 (0,8)              | 3,50 (2,2)                                       | <u>РусГидро</u>                           | р. <u>Волга</u> , г. <u>Новочебоксарск</u>   |
| <u>Саратовская ГЭС</u>     | 1,40                    | 5,7  | <u>РусГидро</u>                           | р. <u>Волга</u> , г.   |

| Наименование           | Мощность,<br><u>ГВт</u> | Среднегодовая<br>выработка,<br>млрд <u>кВт·ч</u> | Собственник      | География                                   |
|------------------------|-------------------------|--|------------------|---|
|                        |                         |  |                  | <u>Балаково</u>                             |
| <u>Зейская ГЭС</u>     | 1,33                    | 4,91   | <u>РусГидро</u>  | р. <u>Зея</u> , г. <u>Зея</u>               |
| <u>Нижекамская ГЭС</u> | 1,25 (0,45)             | 2,67 (1,8)                                       | <u>Татэнерго</u> | р. <u>Кама</u> , г. <u>Набережные Челны</u> |
| <u>Загорская ГАЭС</u>  | 1,20                    | 1,95   | <u>РусГидро</u>  | р. <u>Кунья</u> , пос. <u>Богородское</u>   |
| <u>Воткинская ГЭС</u>  | 1,04                    | 2,28   | <u>РусГидро</u>  | р. <u>Кама</u> , г. <u>Чайковский</u>       |
| <u>Чиркейская ГЭС</u>  | 1,00                    | 1,74   | <u>РусГидро</u>  | р. <u>Сулак</u> , п. <u>Дубки</u>           |

### 2.5.3 Крупнейшие аварии и происшествия

- Крупнейшей аварией за всю историю ГЭС является прорыв плотины китайского водохранилища Баньцяо на реке Жухэ в провинции Хэнань в результате тайфуна Нина 1975 года. Число погибших более 170 тыс. человек, пострадало 11 млн.
- 17 мая 1943 года — операция британских войск Chastise по подрыву плотин на реках Мёне (водохранилище Мёнезее) и Эдер (водохранилище Эдерзее), повлёкшие за собой гибель 1268 человек, в том числе около 700 советских военнопленных.
- 9 октября 1963 года — одна из крупнейших гидротехнических аварий на плотине Вайонт в северной Италии, погибло более двух тысяч человек.
- В ночь на 11 февраля 2005 года в провинции Белуджистан на юго-западе Пакистана из-за мощных ливней произошёл прорыв 150-метровой плотины ГЭС у города Пасни. В результате было затоплено несколько деревень, более 135 человек погибли.
- 5 октября 2007 года на реке Чу во вьетнамской провинции Тханьхоа после резкого подъёма уровня воды прорвало плотину строящейся ГЭС Кыадат. В зоне затопления оказалось около 5 тыс. домов, 35 человек погибли.
- 17 августа 2009 года — авария на Саяно-Шушенской ГЭС (самой мощной в России). В результате аварии погибло 75 человек, оборудованию и помещениям станции был нанесён серьёзный ущерб.