



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Институт повышения квалификации  
и переподготовки

Кафедра «Электроснабжение»

# **ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИЙ**

## **ПОСОБИЕ**

**для слушателей специальности переподготовки  
1-43 01 78 «Диагностика и техническое обслуживание  
энергооборудования организаций»  
заочной формы обучения**

Гомель 2019

УДК 658.264(075.8)  
ББК 31.36я73  
Т34

*Рекомендовано кафедрой «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 15 от 27.06.2019 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Промышленная теплоэнергетика и экология»  
ГГТУ им. П. О. Сухого канд. техн наук, доц. *А. В. Шаповалов*

Составитель *Т. Н. Никулина*

**Теплотехническое** оборудование организаций : пособие для слушателей специальности переподготовки 1-43 01 78 «Диагностика и техническое обслуживание энергооборудования организаций» заоч. формы обучения / сост. Т. Н. Никулина. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 182 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Рассмотрены циклы тепловых машин и установок, а также устройство, принцип работы и характеристики котельных аппаратов и нагнетательных машин, представлены сведения о теплообменных аппаратах, характеристиках и методах сжигания различного вида топлива.

Для слушателей специальности переподготовки 1-43 01 78 «Диагностика и техническое обслуживание энергооборудования организаций» ИПКиП.

**УДК 658.264(075.8)**  
**ББК 31.36я73**

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2019

## ВВЕДЕНИЕ

Энергетическое хозяйство современного промышленного предприятия наряду с общим электротехническим оборудованием включает в себя значительное количество энергосилового и теплотехнического оборудования.

Котельные установки обеспечивают паром и горячей водой технологические потребности промышленных предприятий и системы отопления, для чего используются различные теплообменные аппараты и устройства.

Обеспечение водой (водопроводной и технической) и подача различных технологических растворов на предприятиях осуществляется с помощью насосов, как правило, центробежного типа.

Вентиляторы общепромышленного назначения являются составной частью систем общеобменной и местной вентиляции в производственных цехах и служебных помещениях, используются в системах кондиционирования воздуха и т.д.

Технологические потребности предприятия в сжатом воздухе (для прессов, молотов, пневмоинструмента, окраски и т.д.) удовлетворяются с помощью компрессоров различных видов – центробежных, поршневых и т.д.

Как правило, энергосиловое оборудование находится в ведении отдела главного энергетика промышленного предприятия. Надежная и эффективная работа этого оборудования в значительной мере определяет эффективность всего производственного процесса, что обуславливает необходимость знания техническим персоналом его устройства, технических характеристик и способов регулирования.

В данном пособии рассмотрены принципы работы и устройство теплообменных аппаратов, различные виды топлива, способы его сжигания, приведены способы очистки воды от различных примесей, а также рассмотрены котельные установки и работа отдельных элементов котельного агрегата. Кроме того изложены принципы работы, рабочие характеристики, параметры и способы регулирования различных нагнетательных машин, которые наиболее широко применяются в энергохозяйстве промышленных предприятий.

## ТЕМА 1. ТОПЛИВО И ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ

*Топливо* - органическое соединение, встречающееся в природе в достаточном для его использования количестве, доступное для добычи и его переработки и выделяющее при его сжигании достаточное количество тепла, используемого в теплоэнергетических установках. В настоящее время принято классифицировать все топлива в зависимости от способа их получения и агрегатного состояния. По способу получения различают естественное (природное) топливо, искусственное топливо и топливные отходы (таблица 1.1).

Естественным (природным) топливом называют топливо, используемое без переработки. Искусственным называют топливо, полученное при переработке естественного топлива. В процессе переработки естественного топлива в искусственное получают топливные отходы.

Все виды топлива можно сгруппировать в следующую таблицу:

Таблица 1.1

Виды топлива

<b>Топливо</b>	<b>Твердое</b>	<b>Жидкое</b>	<b>Газообразное</b>
<b>Природное</b>	каменный уголь, антрацит, дрова, торф, бурый уголь, сланцы	нефть	природный газ, попутный газ нефтяных месторождений
<b>Искусственное</b>	деревянный уголь, полукокс, кокс, брикет торфа и угля	бензин, керосин, мазут, лигроин, дизтопливо	коксовый газ, генераторный газ доменный газ, газ из угольных месторождений при их газификации
<b>Топливные отходы</b>	отходы углеобогащения, отходы при переработке древесины (опилки, щепа)	кислый гудрон	газы при переработке нефти

## 1.1. Твердое топливо

Основной характеристикой топлива является его *химический состав*, который выражается в процентах от общей массы или объема топлива. Основными элементами твердого и жидкого топлива является углерод С, водород Н, сера S, кислород О, азот N, минеральные примеси А, влага W. Эти элементы по-разному участвуют в процессе горения, выделяя различное количество тепла при его сжигании.

С, Н и S - составляют горючую массу топлива.

О и N - составляют внутренний балласт топлива.

А и W - внешний балласт топлива.

В зависимости от содержания балластных элементов в топливе и общей массы топлива, элементарный состав в справочниках и таблицах обычно приводиться в 3-х видах:

состав на рабочую массу, когда присутствуют все элементы:

$$C^P + H^P + S^P + O^P + N^P + A^P + W^P = 100\%; \quad (1.1)$$

на сухую массу:

$$C^C + H^C + S^C + O^C + N^C + A^C = 100\%; \quad (1.2)$$

на горючую массу

$$C^G + H^G + S^G + O^G + N^G = 100\%. \quad (1.3)$$

Все расчеты, производимые в процессе горения топлива, необходимо выполнять с элементарным составом топлива, заданным на рабочую массу. Поэтому для перерасчета различных масс топлива на рабочую массу, необходимо пользоваться следующими расчетными уравнениями, которые приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Коэффициенты пересчета

Масса топлива (исходная)	Горючая	Сухая	Рабочая
Горючая	1	$\frac{100 - A^C}{100}$	$\frac{100 - A^P - W^P}{100}$
Сухая	$\frac{100}{100 - A^C}$	1	$\frac{100 - W^P}{100}$
Рабочая	$\frac{100}{100 - A^P - W^P}$	$\frac{100}{100 - W^P}$	1

*Влажность топлива* - количество воды (влаги), присутствующее в топливе и отведенное к массе топлива. Она зависит от связи с органическим материалом топлива и подразделяется на внешнюю влагу (поверхностная влага и капиллярная) и внутреннюю, входящую в коллоидные частицы топлива и гидратные соединения ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MgSO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

Внутренняя влага не удаляется из топлива при внешнем подогреве, а лишь при прокаливании (при  $102^\circ\text{C}$  и выше). Внешняя влага удаляется при температурах  $< 98^\circ\text{C}$ .

Различные виды топлива имеют различное значение влажности. Для сравнения различных видов по влажности приводятся в справочниках понятие приведенной влажности, приходящейся на 1000 кДж теплоты (низшей) сгорания топлива:

$$W_H^P = 1000 \cdot \frac{W^P}{Q_H^P}, \% \quad (1.4)$$

где  $Q_H^P$  - низшая теплота сгорания топлива.

*Зольность топлива* - характеристика, которая устанавливает содержание минеральных примесей в топливе, которое не участвует в процессе горения. Основной характеристикой золы, выделившейся в процессе горения, является ее тугоплавкость, т.е. температура, при которой начинается процесс расплавления твердой золы в текучее состояние. Температура тугоплавкости золы зависит от месторождения и определяется опытным путем.

Для сравнения различных топлив по зольности устанавливается величина относительной (приведенной) зольности, т.е. зольность, приходящаяся на 1000 кДж низшей теплоты сгорания:

$$A_H^P = 1000 \cdot \frac{A^P}{Q_H^P}, \% \quad (1.5)$$

*Летучие вещества* - это газообразные продукты, выделяемые из твердого и жидкого топлива при температуре в диапазоне  $150 - 800^\circ\text{C}$  без доступа кислорода - окислителя. После выделения летучих из топлива остается кокс, содержащий углерод и твердую минеральную часть топлива. В состав летучих веществ входят:  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и др.

*Высшая теплота сгорания топлива* - общее количество тепла, выделяемое при сгорании 1 кг твердого или жидкого топлива (или  $1 \text{ м}^3$  газообразного) с учетом превращения водяных паров выделяе-

мых продуктов сгорания в жидкость. Эта теплота не учитывает тепло, затрачиваемое на процесс парообразования.

*Низшая теплота сгорания топлива* - определяется путем вычитания из высшей теплоты сгорания теплоты, пошедшей на процесс парообразования.

Опытным путем теплоту сгорания топлива определяют в лабораторных условиях в так называемых калориметрических бомбах. Теоретически ее рассчитывают с помощью уравнения Д. И. Менделеева по элементарному составу топлива на рабочую массу с учетом теплоты сгорания отдельных элементов:

$$Q_H^P = 339,5C^P + 1256H^P - 109(O^P - S^P) - 25,8(9H^P + W^P). \quad (1.6)$$

Различные виды топлива имеют различную теплоту сгорания. Для сравнения тепловой ценности различных топлив используют понятие теплоты сгорания условного топлива, для которого принимается теплота сгорания 29350 кДж /кг. Для пересчета любого натурального топлива на условное используется следующий коэффициент пересчета:

$$\varepsilon = \frac{Q_H^P}{29350}. \quad (1.7)$$

*Классификация основных видов твёрдого топлива.* Из твердого топлива, сжигаемого в котельных установках, наиболее широко используются следующие виды: торф, бурые угли, горючие сланцы, каменный уголь, антрацит.

Бурые угли подразделяют в зависимости от влажности на 3 типа: Б1, Б2, Б3.

Б1 - характеризуется влажностью топлива меньше 30%

Б2 - 30-40 %

Б3 - больше 40 %

Выход летучих у бурых углей составляет 40 - 50 % .

Горючие сланцы: влажность - 13 -17 % . Они не маркируются по категориям; поставляются потребителю с указанием влажности.

Торф (фрезерный или порошкообразный): влажность до 50% , зольность до 20% .

Марка каменных углей, предназначенных для сжигания, характеризуется содержанием в них летучих и углеродов, по которому определяется теплота их сгорания:

Таблица 1.3

## Классификация каменных углей

Обозначение	Марка угля	Содержание летучих, %
Д	длиннопламенный	>37
Г	газовый	33-37
ГЖ	газово-жирный	31-35
Ж	жирный	24-33
КЖ	коксовый жирный	25-30
К	коксовый	<31
Т	тощий	<17

Кроме выхода летучих, каменные угли классифицируются по размеру куска: П - плита - размер куска 100-300 мм; К - крупный - 50-100 мм; О - орех - 25-50 мм; М - мелкий - 13-25 мм; С - семечка - 6-13 мм; Ш - штыб 0-6 мм; Р - рядовой 0-300 мм.

Антрацит состоит в основном из углерода, процентное содержание которого колеблется от 91 до 96 %; выход летучих ~ 9%, влажность ~3-6 %, зольность ~ 4%,  $Q_H^P = 25100-27200$  кДж/кг.

## 1.2. Жидкое топливо

Источником жидкого топлива является природная нефть. Состав природной нефти следующий:

- С - 84 - 86%;
- Н - 12 - 14%;
- О - 0,1 - 0,2%;
- Н - 1,02 - 0,7%;
- S - 0,01 - 4,5%.

Количество серы S, содержащейся в нефти, отрицательно влияет на топливо, получаемое из нее, так как сера, окисляясь в процессе горения, образует диоксид серы  $SO_2$ , который, соприкасаясь с влагой, преобразуется в серную кислоту  $H_2SO_4$ , которая приводит к коррозии. По соединению серы топливо делится на:

- малосернистое топливо (S до 0.5%);
- сернистое (S = 0.5 - 1.9 %);
- высокосернистое (S >2%).

Физические свойства нефти определяются ее плотностью, удельным весом и вязкостью.



*Температура вспышки* - температура, при которой начинается выделение газообразных продуктов сгорания топлива (летучих) и при которой подвод источника горения вызывает воспламенение паров.

*Температура воспламенения жидкого топлива* - температура подогрева жидкой базы топлива, при которой поднесение источника горения воспламеняется поверхность и происходит непрерывный процесс горения топлива не менее 5 секунд.

*Температура застывания* - температура, при которой происходит застывание жидких нефтепродуктов, включая нефть и мазут.

При переработке нефти в соответствии с различными температурами получают топливо, используемое в энергетике. Среди получаемого топлива различают: карбюраторное, дизельное, котельное, реактивное.

### **1.2.1. Первичная переработка нефти**

Первичный процесс разделения нефти на фракции называют *прямой перегонкой или дистилляцией*. Полученные в результате перегонки отдельные фракции нефти называют *дистиллятами*.

Современная установка для прямой перегонки нефти (рис. 1.1) работает по непрерывному циклу.

Для облегчения движения паров углеводородов в ректификационную колонну вводят перегретый водяной пар. В атмосферной ректификационной колонне от нефти отделяют нефтяной газ и фракции нефти с температурой кипения до 680 К, используемые для изготовления топлив - топливные фракции (дистилляты). Принято фракцию нефти, выкипающую в диапазоне температур 303-478 К, называть бензиновой; 393-513 К - лигроиновой; 423-588 К - керосиновой; 423-633 К - дизельной; 503-633 К - газойлевой; 573-673 К - соляровой.

В атмосферную ректификационную колонну вводят нефть, нагретую не более чем до 650-700 К. Выше этой температуры нагревать нефть нельзя, так как может начаться термическое разложение некоторых входящих в ее состав углеводородов. В этой колонне остается неиспарившийся остаток - мазут, состоящий из фракций нефти, температура кипения которых при атмосферном давлении превышает температуру в атмосферной ректификационной колонне.

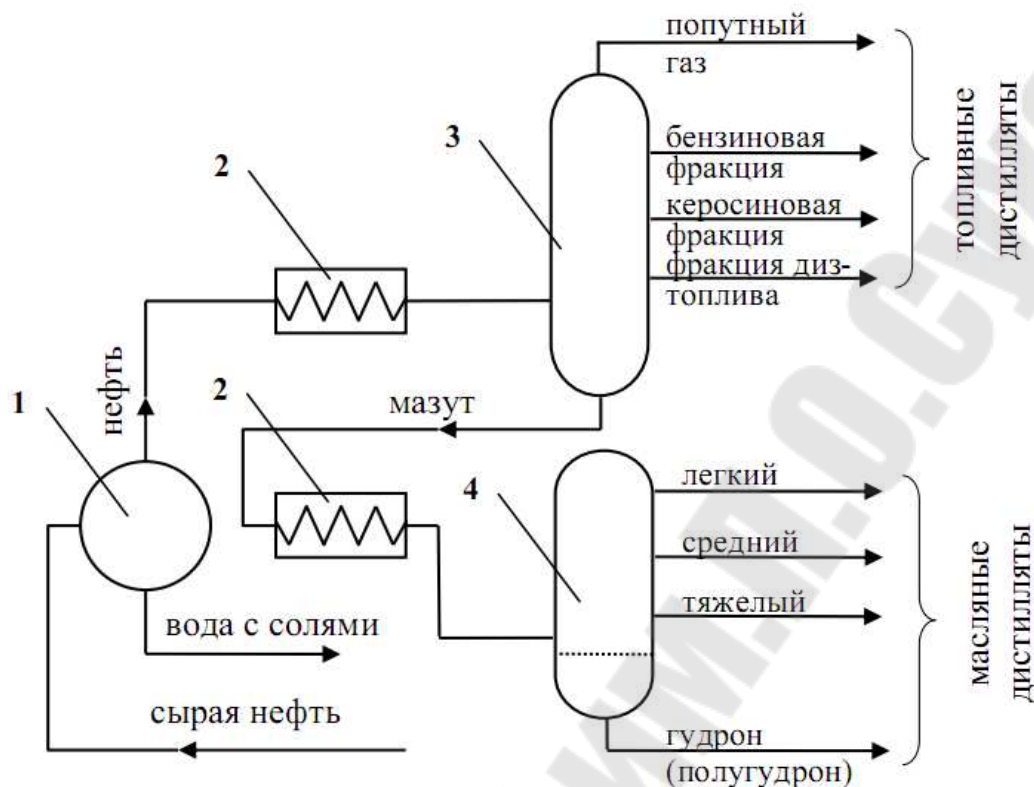


Рис. 1.1. Схема атмосферно-вакуумной установки для перегонки нефти:

1 - аппарат для электрообессоливания; 2 - печь; 3 - атмосферная ректификационная колонна; 4 - вакуумная ректификационная колонна

Для разделения мазута на фракции необходимо понизить давление (создать вакуум). Соответственно перегонка мазута на отдельные фракции осуществляется в вакуумной ректификационной колонне, в которой устанавливается давление 5300-7300 Па. Перед поступлением в вакуумную колонну фракций нефти мазут нагревают до температуры 700 К. При перегонке мазута под вакуумом выкипают фракции, используемые для получения масел и называемые масляными дистиллятами. В зависимости от температуры кипения различают легкие, средние и тяжелые масляные дистилляты. Масла, получаемые из масляных дистиллятов, называют дистиллятными. В вакуумной колонне остается жидкий не выкипевший остаток - гудрон или полугудрон. Из гудрона и полугудрона при последующей их переработке получают высоковязкие масла, называемые остаточными. В отличие от дистиллятных остаточные масла характеризуются

большой молярной массой, а, следовательно, более высокой температурой кипения, плотностью и вязкостью.

Большинство сложных кислородо-серосодержащих органических соединений также обладает большой молярной массой и остается в гудроне. Поэтому остаточные масла содержат эти соединения в большем количестве, чем дистилляты. Продукты, полученные при первичной переработке нефти, называют *прямогонными*.

### 1.2.2. Схема полной переработки нефти

На рис. 1.2 представлена одна из возможных принципиальных схем переработки нефти на топливо и смазочные материалы.

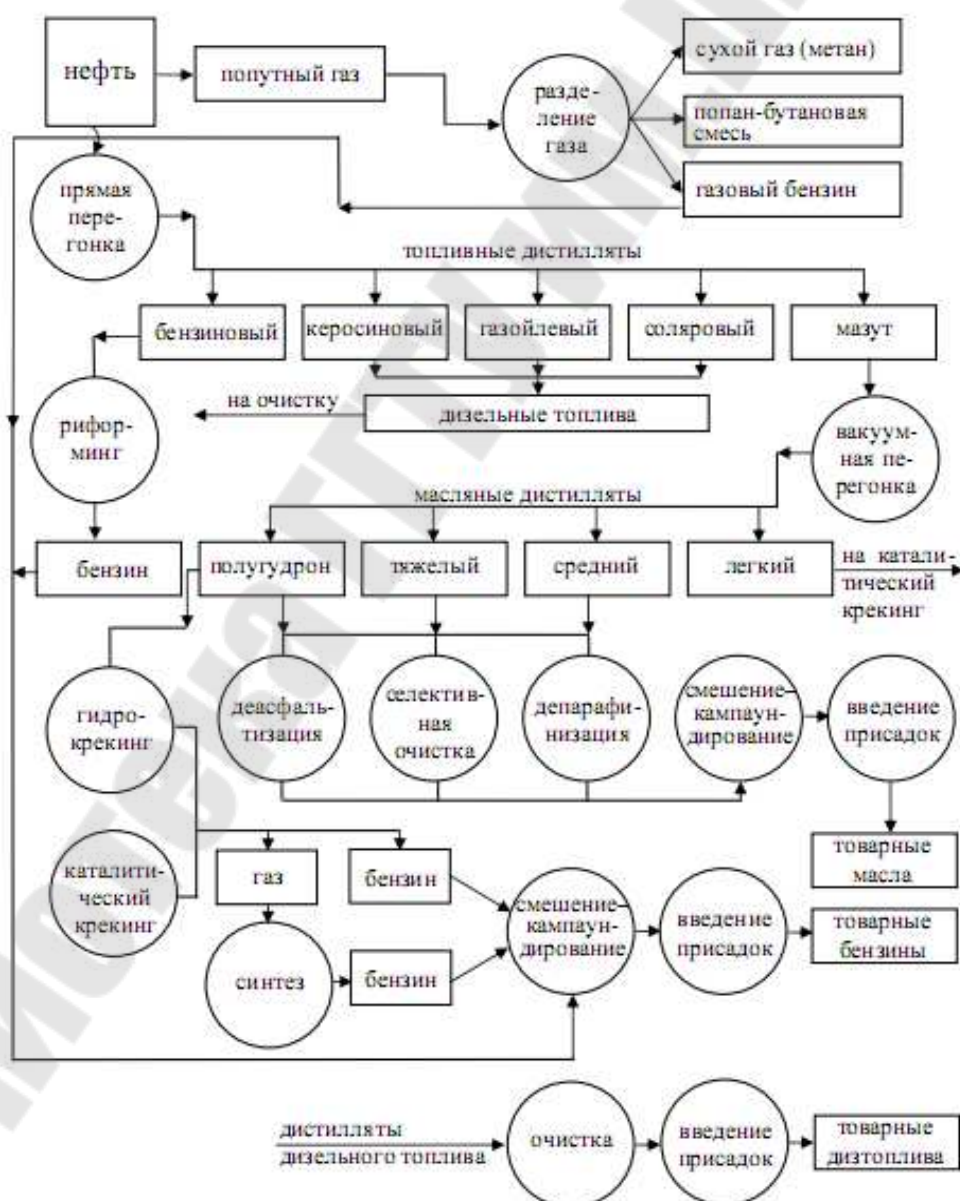


Рис. 1.2. Схема полной переработки нефти

### 1.3. Газообразное топливо

По происхождению газообразное топливо подразделяется на естественное (газ газовых месторождений, газ попутных нефтяных месторождений) и искусственное (получается при обогащении и переработке твердых топлив, а также в промышленности – газифицирование твердого топлива, получение кокса из каменных углей, в доменных печах при выплавке чугуна).

Состав газовой смеси

$$\sum C_n H_{2n+2} + \sum C_n H_{2n} + H_2 + CO + CO_2 + H_2S + H_2O + O_2 + N_2 = 100\%, \quad (1.8)$$

где  $\sum C_n H_{2n+2}$  - предельные углеводороды;

$\sum C_n H_{2n}$  - непредельные углеводороды.

По физико-теплотехническим свойствам газ характеризуется плотностью, вязкостью, теплоемкостью, энтальпией и теплотой сгорания.

Плотность газовой смеси

$$\rho_{см} = \sum r_i \cdot \rho_i, \quad (1.9)$$

где  $\rho_i$  - плотность  $i$ -го компонента газа, входящего в состав газовой смеси;

$r_i$  - объемная доля компонента (в %) в газовой смеси.

Молекулярная масса смеси

$$M_{см} = \sum r_i \cdot M_i, \quad (1.10)$$

где  $M_i$  - молекулярные массы компонентов в газовой смеси

Массовый состав газа

$$g_i = \frac{r_i \cdot M_i}{M_{см}}. \quad (1.11)$$

Вязкость подразделяется на динамическую ( $\mu$ , Па·с) и кинематическую ( $\nu = \mu/\rho$ , м<sup>2</sup>/с). Для определенной газовой смеси нет вязкости, соответствующей справочной.

Теплоемкость смеси при постоянном давлении

$$C_i = \sum g_i C_{pi}, \quad (1.12)$$

где  $C_{pi}$  - изобарная теплоемкость компонентов смеси.

Энтальпия газовой смеси

$$H_{см} = \sum V_i h_i, \quad (1.13)$$

где  $V_i$  – объем данного компонента в газовой смеси, м<sup>3</sup>;

$h_i$  – энтальпия компонента, кДж/м<sup>3</sup>.

Теплота сгорания, также как и все составляющие газообразного топлива, определяются исходя из составляющих топливо отдельных продуктов сгорания и определяются согласно следующего уравнения:

$$Q_H^C = 358CH_4 + 640C_2H_6 + 915C_3H_8 + 1190C_4H_{10} + \quad (1.14) \\ + 1458C_5H_{12} + 126,5CO + 107,5H_2 + 257H_2S, \text{ кДж/нм}^3,$$

где CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> и др. - в %.

### 1.3.1 Углеводородные газообразные топлива

Входящие в состав природных и промышленных горючих газов углеводороды с количеством атомов углерода в молекуле меньше шести при нормальных температуре и давлении представляют собой газ и поэтому их называют *газообразными топливами* (ГТ).

Первые поршневые ДВС, двигатель Ленуара (1860) и двигатель Отто (1887) работали на ГТ. В настоящее время ГТ применяют в двигателях с принудительным воспламенением. Проводятся опытные работы по использованию ГТ в дизелях. Применение ГТ позволяет снизить загрязнение окружающей среды и открывает возможность использования новых значительных топливных ресурсов, обеспечивая экономию природной нефти. Состав ГТ в основном зависит от источника их получения и способа производства. Обладая высокой детонационной стойкостью, ГТ обеспечивают работу двигателей с большими степенями сжатия, а, следовательно,

высокими технико-экономическими показателями. Применение ГТ снижает износ цилиндро-поршневой группы (главным образом вследствие отсутствия явления смыва жидким топливом масляной, пленки со стенок цилиндра). Они не вызывают разжижения и загрязнения картерного масла, что обеспечивает его длительную беспрерывную работу. Газ и воздух имеют одинаковое агрегатное состояние. Это улучшает смесеобразование, а следовательно, и повышает полноту сгорания топлива в двигателе. В результате снижается содержание вредных продуктов неполного сгорания в отработавших газах двигателя и уменьшается загрязнение окружающей среды. В частности, при работе на ГТ по сравнению с жидкими нефтяными топливами в отработавших газах содержится в три-четыре раза меньше окиси углерода. При использовании ГТ значительно уменьшается нагарообразование в двигателе.

В зависимости от агрегатного состояния в топливных баках различают сжатые и сжиженные ГТ. Например, метан обладает низкой критической температурой (191 К), следовательно, при любых более высоких температурах его нельзя перевести в жидкое состояние. Остальные углеводороды, относящиеся к ГТ, можно относительно легко перевести в жидкое состояние. ГТ хранят на транспортных средствах в топливных баллонах. Сжатые ГТ хранят под давлением до 20 МПа, сжиженные – под давлением до 1,8 МПа, обеспечивающим пребывание ГТ в жидком состоянии в эксплуатационном диапазоне температур.

*Сжатые газообразные топлива.* Основным веществом, входящим в состав сжатых ГТ, является метан. Кроме метана сжатые ГТ могут содержать окись и двуокись углерода, водород, а также пары воды и примеси (в том числе и коррозионно-агрессивные, например сероводород, аммиак, циан, цианистоводородную кислоту и т. п.). В зависимости от количества и вида газов, сопутствующих метану, изменяются свойства сжатых ГТ (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Свойства сжатых газообразных топлив

Газы	Теплота сгорания, МДж/м <sup>3</sup>	ОЧМ	Бензиновый эквивалент*, кг/м <sup>3</sup>
Природный	31–36,5	94–105	0,71–0,83
Нефтяные попутные	34-41	91-102	0,78-0,95
Нефтеперерабатывающих заводов	36-44	95-105	0,82-1,0
Коксовый	16,7-19,2	80	0,39-0,41

\* Бензиновым эквивалентом называют количество бензина (в килограммах), равноценное 1 м<sup>3</sup> газа по теплоте сгорания.

При дросселировании газа, находящегося под высоким давлением, его температура понижается. Это приводит к необходимости тщательного обезвоживания газа во избежание закупорки льдом элементов системы топливоподачи. Содержание влаги в сжатых газах не должно превышать 0,7 г/м<sup>3</sup> летом и 0,5 г/м<sup>3</sup> зимой.

В сжатых ГТ ограничивается содержание коррозионно-агрессивных веществ для исключения их влияния на элементы, находящиеся под высоким давлением. Например, при наличии в ГТ циана CN стенки баллонов быстро разрушаются из-за появления в них микротрещин, являющихся результатом межкристаллитной коррозии.

Сжатые ГТ получили меньшее распространение, чем сжиженные. Это объясняется в основном снижением на 10-20% мощности двигателя, вызываемым меньшей теплотой сгорания горючей смеси и большой массой баллонов со сжатым газом. Масса одного баллона емкостью 0,05 м<sup>3</sup> при давлении 20 МПа равна 65 кг. В связи со стремлением к наиболее полному использованию энергетических ресурсов, снижению токсичности отработавших газов на основе достижений криогенной техники в настоящее время проводятся работы по использованию сжиженного метана. Разработаны и находятся в опытной эксплуатации баллоны с вакуумной изоляцией, в

которых жидкий метан хранится при давлении 0,15 МПа в течение 5 суток практически без потерь.

*Сжиженные газообразные топлива.* Топливо СПБТЗ (смесь пропана и бутана технических зимняя) предназначено для зимней эксплуатации; топливо СПБТЛ (смесь пропана и бутана технических летняя) – для летней эксплуатации; топливо БТ – бутан технический.

Давления насыщенных паров углеводородов, входящих в состав сжиженных ГТ, значительно отличаются друг от друга. Это дает возможность эффективно изменять показатели топлива, приспособлявая его к заданным климатическим условиям – с увеличением эксплуатационной температуры увеличивать количество углеводородов с низким давлением насыщенных паров и наоборот.

Давление насыщенных паров углеводородов, используемых в сжиженных ГТ, относительно невелико, что позволяет хранить сжиженные ГТ в баллонах, рассчитанных на давление в 1,6 МПа при температуре до 323 К. Все сорта сжиженных ГТ относят к высококалорийным топливам (низшая теплота сгорания 44,8–46,9 МДж/м<sup>3</sup>).

Важной с эксплуатационной точки зрения особенностью сжиженных ГТ является их относительно высокий коэффициент объемного расширения, что приводит к необходимости наличия большого (до 10%) свободного (не заполненного топливом) объема в топливных баллонах. Из свободного объема проводят отбор газовой фракции топлива при запуске двигателя. Длительная работа двигателя с отбором топлива из свободного объема баллона недопустима, так как это приводит к переохлаждению топлива (из-за затрат теплоты на испарение) и неравномерному израсходованию компонентов, входящих в топливо, – в первую очередь расходуются компо-

ненты, обладающие наибольшим давлением паров – пропан и пропилен. Это ухудшает условия для последующих запусков двигателя и снижает давление в баллонах, что может привести к перебоям в подаче топлива к двигателю.

Особенности применения газообразных топлив. Двигатели с принудительным воспламенением, работающие как на жидком, так и на газообразном топливах, называют конвертированными. Использование конвертированных двигателей не дает возможности эффективно реализовать все преимущества ГТ так как нельзя повысить степень сжатия до пределов, обеспечиваемых ГТ (в противном случае при работе на жидком топливе возникает детонация); кроме того, впускной тракт двигателя не является оптимальным для работы на ГТ – необходимо увеличить сечения клапанов и исключить подогрев впускного тракта. Подогрев в этом случае не только не нужен, так как жидкого топлива нет, но и вреден – из-за него уменьшается коэффициент наполнения.

В результате у конвертированного двигателя мощность снижается на 6-8 % при работе на сжиженном ГТ и на 18-19% при работе на сжатом ГТ. Одновременно на 11-12% возрастает средний эксплуатационный расход топлива. Отсюда следует, что ДВС должны специально проектироваться под ГТ. В этом случае можно эффективно реализовать такие положительные качества ГТ, как высокую детонационную стойкость, устойчивое горение на бедных смесях и др.

#### **1.4. Альтернативное топливо**

Возрастающая выработка и потребление электроэнергии, транспорт, промышленность требуют всё большего количества ископаемого топлива, природные запасы которого ограничены. В настоящее время имеются чёткие научно обоснованные расчёты, показывающие, когда человечество их исчерпает. Анализ доказывает, что основные источники энергии на планете по самым позитивным подсчётам имеют довольно чёткие сроки истощения ресурсов.

Эра дешёвого топлива кончается. Его приходится добывать в малообжитых и труднодоступных районах. Сегодня каждая пятая тонна нефти добывается с морского дна, а к 2050 г. эта цифра увеличится до 3/5.

К проблеме дефицитности топлива добавляется проблема экологическая, связанная с засорением биосферы. Процессы горения то-



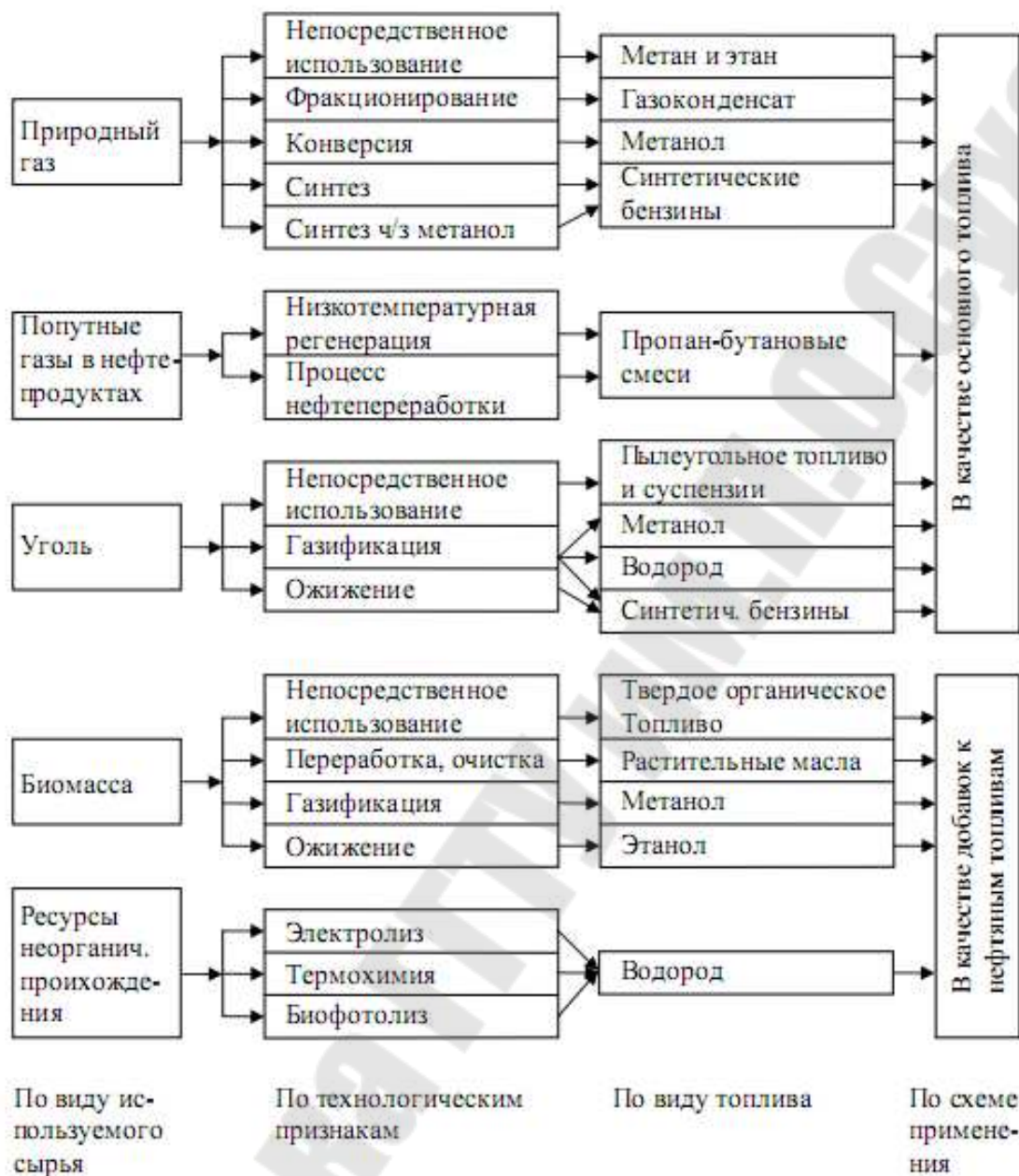
плива в теплосиловых установках осуществляются за сравнительно короткие промежутки времени, в течении которого не представляется возможным до конца осуществить окисление химических реакций. Образуются токсичные продукты неполного сгорания топлива. Среди них следует выделить CO, альдегиды CHO, несгоревшие углеводороды C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>, сажа C, оксиды азота (NO)<sub>x</sub>, соединения серы с кислородом (SO<sub>x</sub>) и водородом (H<sub>2</sub>S), соединения свинца в случае применения в качестве антидетонационной присадки тетраэтилсвинца. При горении топлива из атмосферы потребляется большое количество кислорода, необходимого для жизнедеятельности.

В связи с этим программой ООН в настоящее время получили широкое развитие исследования, направленные на снижение потребления нефтяных видов топлива и увеличению использования альтернативных видов топлива. Решение этой проблемы весьма сложно, так как новое горючее должно удовлетворять следующим требованиям:

- иметь необходимые сырьевые ресурсы;
- низкую стоимость;
- не ухудшать работу теплосиловых установок;
- как можно меньше загрязнять атмосферу;
- по возможности сочетаться со сложившейся системой снабжения топливом.

#### **1.4.1. Классификация возможных альтернативных топлив**

На приведённой ниже схеме представлена классификация возможных альтернативных топлив. Данную классификацию можно разделить на две группы. К первой относятся нефтяные бензины, дизельное и котельное топливо с добавками растительных масел, твёрдого органического топлива, спиртов, эфиров, аммиака, водяных эмульсий. Ко второй группе относят топлива, не содержащие нефть и продукты её переработки.



### 1.4.2. Альтернативные смесевые топлива

Под альтернативными смесевыми топливами подразумевают такие традиционные топлива, примесь к которым из возобновляемых источников поможет продлить срок их использования. Как показывает практика сжигания смесевых топлив, они не требуют для этого процесса значительных переделок существующих двигателей внутреннего сгорания, а так же теплосиловых установок. Из этих видов топлив наиболее известен «газохол» – смесь бензина с 10-20% этилового спирта (этанол). Газохол получил широкое распространение в Бразилии, где количество применяющихся автомоби-

лей достигло 2.7 млн. шт. Для получения газохола используют дешёвый этанол, получаемый из сахарного тростника. Основным источником этанола служит восстанавливаемое растительное сырьё (сахарный тростник, свекла, кукуруза, картофель и др.). При переработке этого сырья разложением и брожением получают  $\text{CH}_4$  и этанол. По данным исследований учёных выход этанола с 1 га посадок сахарного тростника равен 4400 литров, с 1 га сахарной свеклы – 2800 литров, с 1 га картофеля и кукурузы – 1664 и 830 литров соответственно.

В странах с умеренным климатом производство из биомасс спиртового топлива ограничено. Поэтому в Европе этанол получают из более дорогого сырья (природного газа, угля, горючих сланцев, и различных органических отходов). Добавки спиртов к бензину улучшают антидетонационные качества, повышает КПД двигателя и снижает в выхлопных газах содержание вредных веществ ( $\text{CO}$  и  $\text{N}_x\text{O}_y$ ). Из недостатков этанола следует выделить низкую калорийность, отслоение от бензина при пониженной температуре и выпадении влаги.

С дизельным топливом этанол не смешивается, однако с повышением молекулярной массы спиртов создание стабильных смесей становится более вероятным. Начиная с пропанола они смешиваются с дизельным топливом в любых пропорциях. В связи с этим возможно приготовление углеводородоспиртовых смесей по следующей методике: смешивается метан с высокомолекулярными спиртами, а затем двухкомпонентная композиция растворяется в дизельном топливе. Подобное топливо было синтезировано со следующим составом: 50% дизельного топлива, 25% метилового и 25% изобутилового спиртов. При сравнении этого топлива с дизельным в 1,3 раза уменьшилось содержание углеводородов, в основном за счёт повышения содержания кислорода при постоянном содержании водорода.

Метанол как присадку к дизельному топливу можно применять в газообразном виде. При этом метанол должен поступать сначала в испаритель, а затем в каталитический реактор. Полученный синтез-газ может вводиться в опускной трубопровод воздухоудвнной системой дизельного двигателя с турбонаддувом.

Исследования и практика эксплуатации теплосиловых установок показали, что применение добавок воды снижает токсичность продуктов сгорания и повышает эффективность самих установок.

Исследования в Германии показали, что сгорание водномагнитных эмульсий в топках котельных установок даёт следующие результаты:

содержание сажи в уходящих газах снижается с 1-3% до 0-1%;

содержание CO снижается с 0,001% до 0,0005%;

содержание SO<sub>3</sub> снижается с 10 мг/м<sup>3</sup> до 7 мг/м<sup>3</sup>;

содержание твёрдых частиц снижается с 91 мг/м<sup>3</sup> до 7 мг/м<sup>3</sup>.

Существует мнение, что присутствие воды в двигателях внутреннего сгорания нежелательно. Однако мнение о плохой работе ДВС на оводнённом топливе несправедливо. Всё зависит от того, в каком виде вода находится в топливе. Если она присутствует в виде отдельных скоплений т. е. в неорганизованном виде или неравномерно вводится в камеру сгорания, то это действительно вызывает перебои в работе двигателя. Вода в топливе не всегда является вредной механической примесью. Опытами с тяжёлокислородной водой было показано, что вода не только участвует в процессе теплообмена, отбирая часть тепла на своё испарение, парообразование и перегрев паров, но и участвует непосредственно в процессах горения, являясь активным участником горения углеводородного топлива. Поскольку вода и жидкое топливо взаимно нерастворимы, необходимо эти системы превратить в эмульсии механическим путём. Имеющиеся данные о влиянии воды справедливы и для сжигания мазута. Это связано с тем, что устойчивые водномазутные смеси (эмульсии) можно получить используя простейшие средства.

Перспективными могут считаться также смеси топлива с размельчённым углём. При этом возможно создание стабильных суспензий с содержанием влаги 25 – 30%. Такие топлива следует рекомендовать для сжигания в топочных устройствах котельных установок и камерах сгорания газовых турбин.

### **1.4.3. Заменители нефтяных топлив**

В качестве возможных заменителей нефтяных топлив для ДВС рассматривают спирты (метиловый и этиловый) и водород. Эти топлива по своим термохимическим и эксплуатационным показателям наиболее полно удовлетворяют характерным особенностям современных поршневых ДВС.

*Спирты.* Метиловый спирт – метанол и этиловый спирт – этанол обладают высоким ОЧ и низким ЦЧ, вследствие чего их целе-

сообразно использовать в качестве топлива для двигателей с принудительным воспламенением.

Значительное влияние на свойства спиртов оказывает вода. Увеличение концентрации воды повышает плотность, температуры кипения и кристаллизации, теплоемкость и теплопроводность топлива при одновременном ухудшении его энергетических показателей. Теплота сгорания спиртов приблизительно в два раза меньше, чем у нефтяных топлив, поэтому при практически одинаковых энергетических затратах ДВС, работающие на спирте, имеют по сравнению с бензином большие массовые расходы топлива (пропорционально отношению теплот сгорания). Спирты обладают высокой детонационной стойкостью, которая возрастает при добавке воды.

Спирты по сравнению с нефтяными топливами характеризуются более устойчивым сгоранием. Благодаря этому расширяется диапазон устойчивого горения на бедных смесях (до  $\alpha = 1,5-1,6$ ). Сгорание спиртов по сравнению с бензинами характеризуется меньшими задержками воспламенения и большими скоростями горения, более низкими температурами и большой полнотой сгорания. Все это обеспечивает меньший теплоотвод из зоны реакции, повышенный индикаторный КПД, уменьшенный удельный расход энергии на единицу мощности и меньшую токсичность отработавших газов по CO, CN и окислам азота. В табл. 5.1 приведены результаты испытаний карбюраторного двигателя на метаноле и бензине.

Таблица 1.5

Результаты испытаний карбюраторного двигателя

Топливо	Состав отработавших газов, г/цикл		
	CO	CN	NO
Бензин	140	6	8
Метанол	32	5,5	0,7

Высокое значение теплоты испарения спиртов обуславливает повышение величины коэффициента наполнения. Сочетание перечисленных факторов позволяет увеличить мощность двигателя при переходе на спирт на 10-15% (по сравнению с бензином). Использование высоких антидетонационных качеств спиртов позволяет дополнительно увеличить мощность двигателя путем увеличения степени сжатия до 12-14.

Хотя метанол и этанол по сравнению с бензином обладают более высокой испаряемостью (соответственно в 1,8 и 2,4 раза),

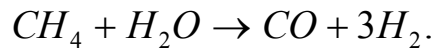
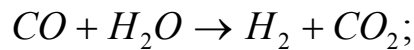
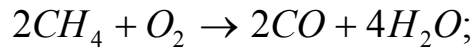
большая теплота испарения этих топлив затрудняет пуск двигателя. Для устранения этого недостатка применяют добавку растворимых в спиртах легкокипящих углеводородов (до 20% бутана, изопентана, диметилового эфира и пр.), интенсивный подогрев впускного тракта и карбюратора, частичную рециркуляцию отработавших газов, а также вводят специальные пусковые системы. Характерной особенностью спиртов является малое сажеобразование (метанол не дает сажи).

Коррозионная агрессивность спиртов и бензоспиртовых смесей проявляется в коррозионном воздействии на сталь, алюминий, магний, цинк и сплавы на их основе. В присутствие воды коррозия значительно возрастает. Спирты интенсивно реагируют со свинцом – образуются аморфные соединения, забивающие топливные фильтры и жиклеры. Большинство прокладочных материалов имеет склонность к набуханию при контакте со спиртами.

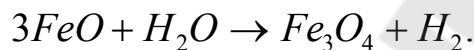
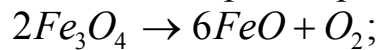
Использование спиртов и бензоспиртовых смесей на автомобиле не требует значительных доработок его конструкции – увеличивается объем топливных баков (при необходимости сохранения заданной величины пробега между заправками топливом); вводятся системы, обеспечивающие запуск холодного двигателя; изменяется тарировка топливodoзирующих устройств с учетом повышенного расхода топлива и заменяются материалы, обладающие пониженной стойкостью к спиртам. Реальным препятствием для широкого практического использования метанола является его высокая токсичность. Для ограничения связанных с этим опасностей требуется надежная герметизация топливных баков и топливоподающей системы.

*Водород.* Водород ( $H_2$ ) является одним из наиболее перспективных видов топлив как для использования в современных типах ДВС (при некоторой их модификации), так и для энергетики будущего. Это топливо эффективно удовлетворяет комплексу требований по энергетическим показателям двигателя и экологическим требованиям обеспечения безотходной технологии.

Первое практическое использование водорода в качестве добавки к топливу для авиационных ДВС относится к 1927 г. Наиболее распространенный современный промышленный способ получения  $H_2$  основан на частичном окислении метана и его конверсии с водяным паром:



Метан является ценным химическим сырьем, поэтому рассматриваются перспективные способы получения  $\text{H}_2$  из воды. К таким способам относится *термодиссоциация воды*, протекающая при температурах 4000-5000 К. Этот способ разработан в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова в виде двухступенчатого цикла с использованием теплоты атомного реактора:



Подсчитано, что термоядерный реактор тепловой мощностью 10 млн. кВт при работе по такому циклу позволит получить 1 млн. т  $\text{H}_2$  в год.

Таблица 1.6

Основные физические свойства  $\text{H}_2$

Температура кипения, К	20,24
Критическая температура, К	32,9
Критическое давление, МПа	1,27
Плотность при нормальных условиях, кг/м <sup>3</sup>	0,08987
Плотность при температуре кипения, кг/м <sup>3</sup>	70,97
Теплота плавления, кДж/моль	0,0965
Теплота испарения, кДж/моль	0,903
Концентрационный диапазон воспламеняемости с воздухом, % по объему	4-75

Высшая теплота сгорания  $\text{H}_2$  равна 120 МДж/кг, что превышает массовую теплоту сгорания всех топлив для ДВС. Однако вследствие малой плотности  $\text{H}_2$  его объемные энергетические характеристики хуже, чем у нефтяных топлив. Объемная теплопроизводительность водородо-воздушной смеси меньше теплопроизводительности смесей на основе бензина (на 15%) и спирта (на 10%). Температура воспламенения водородо-воздушной смеси выше, чем смесей на базе углеводородных топлив, однако благодаря более низкой энергии активации  $\text{H}_2$  для его воспламенения требуется меньшее количество энергии.

Водородо-воздушные смеси сгорают со скоростями, превышающими скорости сгорания смесей на основе углеводородных топ-

лив. Большие скорости сгорания обуславливают высокую жесткость процесса сгорания. Например, при  $\alpha = 1$  скорость нарастания давления в цилиндре примерно в три раза больше, чем при работе на бензо-воздушных смесях. При увеличении  $\alpha$  скорость нарастания давления уменьшается.

При нормальной и низкой температурах водород химически малоактивен. Реакционная способность его значительно возрастает при нагреве, под действием электрического разряда и в присутствии катализаторов. Повышение активности водорода обусловлено образованием атомарного водорода, обладающего высокой реакционной способностью. Высокая диффузионная способность газообразного водорода ( $\text{ГН}_2$ ), с одной стороны, обеспечивает хорошие условия смесеобразования в ДВС, а с другой – снижает пожаро- и взрывоопасность водородо-воздушных смесей, случайно образовавшихся из-за утечек  $\text{H}_2$  (благодаря быстрому его рассеиванию).

Использование  $\text{H}_2$  по сравнению с бензином вызывает снижение мощности двигателя. Это объясняется уменьшением коэффициента наполнения из-за низкой плотности  $\text{H}_2$  и вызываемого этим увеличением относительной доли объема цилиндра, занимаемой топливом. Например, при  $\alpha = 1$   $\text{ГН}_2$  занимает почти 30% объема цилиндра (а пары нефтяного топлива только 2-4% объема).

Вследствие высоких скоростей и температур сгорания водородо-воздушных смесей в отработавших газах ДВС может содержаться значительное количество окислов азота  $\text{NO}_x$ . Для снижения количества  $\text{NO}_x$  в отработавших газах можно применять добавку воды к водородному топливу.

Наиболее сложной задачей при использовании водорода и бензо-водородных смесей в качестве топлива для ДВС является хранение расходного запаса  $\text{H}_2$  на борту автомобиля. Принципиально возможны три способа хранения  $\text{H}_2$ : в сжатом виде в баллонах высокого давления, в сжиженном виде и в химически связанном виде в составе соединений, легко разрушающихся с выделением  $\text{H}_2$  (энергоносителей).

Необходимо отметить также способ получения  $\text{H}_2$  непосредственно на транспортном средстве, который основан на способности ряда веществ ( $\text{Al}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Li}$  и др.) восстанавливать воду до водорода с образованием окислов соответствующих элементов.



## 1.5. Общие сведения о кинетике горения топлива

Независимо от схемы организации горения полное время сгорания любого топлива определяется из времени, затрачиваемого на процесс смесеобразования (времени, необходимого для подвода окислителя к топливу), времени, необходимого для подогрева до температуры воспламенения, и времени, необходимого для химической реакции горения (окисления) топлива:

$$\tau_{\Gamma} = \tau_{\text{CM}} + \tau_{\text{H}} + \tau_{\text{X}}. \quad (1.15)$$

Процесс горения топлива зависит от физической стадии (смесеобразование и подогрев топлива)  $\tau_{\phi} = \tau_{\text{CM}} + \tau_{\text{H}}$  и осуществления реакций горения  $\tau_{\text{X}}$ .

Если  $\tau_{\phi} < \tau_{\text{X}}$ , то этот процесс происходит в кинетической области и, следовательно, время процесса сгорания определяется в этом случае временем осуществления химических реакций:  $\tau_{\Gamma} = \tau_{\text{X}}$ .

Стадия  $\tau_{\phi} > \tau_{\text{X}}$  наступает тогда, когда время транспортировки окислителя значительно превышает время, необходимое для осуществления собственно химических реакций горения. И такой процесс находится в диффузионной области горения.

Когда  $\tau_{\phi} \approx \tau_{\text{X}}$  (если время протекания химических реакций соизмеримо со временем физических стадий), тогда процесс находится в переходной области и полное время сгорания топлива определяется скоростью наиболее медленного процесса.

При сжигании газообразного топлива физическими стадиями процесса являются: образование горючей смеси из газа и окислителя (воздуха) и подогрев ее до температуры воспламенения. Горение газозоудшной смеси протекает достаточно интенсивно с большим и интенсивным выделением тепла. Поэтому ее подогрев до температуры воспламенения незначителен по времени. Кроме того, подогрев часто сопровождается и происходит параллельно с процессом смесеобразования. Поэтому он не требует дополнительного времени. Таким образом, практически основным из подготовительных этапов физических стадий является процесс смешения, и в этом случае  $\tau_{\text{X}} \approx \tau_{\text{CM}}$  зависит от способа подачи в топку газообразного топлива и окислителя.

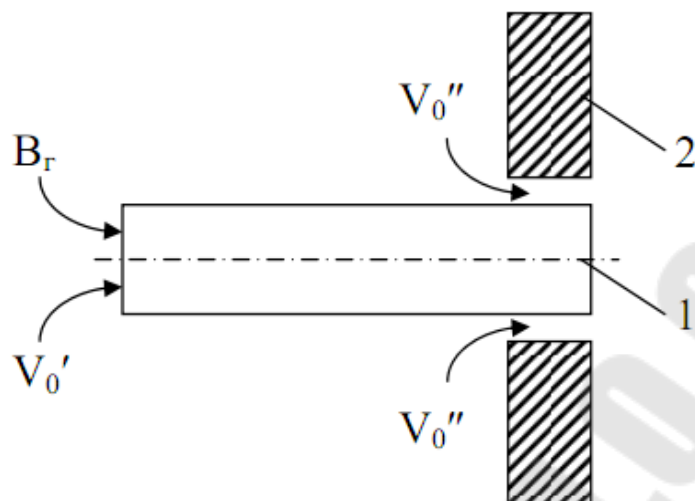


Рис. 1.3. Схема сжигания газообразного топлива: 1 – горелочное устройство; 2 – обмуровка камеры сгорания;  $V_g$  – топливо (газ);  $V_0''$  – первичный воздух (часть воздуха, необходимая для осуществления процесса сгорания, подаваемая в горелочное устройство для осуществления перемешивания топлива и окислителя);  $V_0'$  – количество воздуха, вводимое в топочное устройство, необходимое для осуществления полного сгорания

В общем случае полное количество воздуха необходимое для осуществления полного сгорания топлива:

$$V_d = \alpha \cdot V_0 = V_0' + V_0'', \quad (1.16)$$

где  $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха;

$V_0$  - теоретическое количество воздуха необходимое для сжигания топлива.

Процесс сжигания жидкого топлива определяется так же, как и газообразного, физическими и химическими стадиями. К физическим стадиям этого топлива относятся процессы тонкодисперсного распыления топлива на мелкие капельки (с помощью форсунки), подогрев испарение и образование горючей смеси. К химической стадии процессов относится этап горения этой смеси.

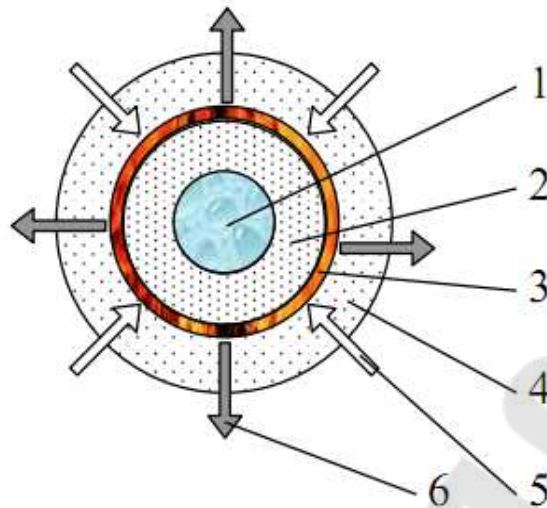


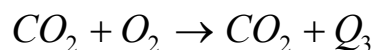
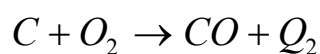
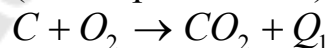
Рис. 1.4. Схема горения капли жидкого топлива: 1 – область жидкости (капелька) топлива; 2 – пары топлива; 3 – зона горения топлива; 4 – область диффузионного мигрирования окислителя и продуктов сгорания; 5 – окислитель (воздух); 6 – продукты сгорания

В кинетике горения твёрдого топлива, следует выделить несколько этапов процесса горения:

- подготовка топлива к процессу горения (подсушка топлива, подогрев, выделение летучих веществ);
- смесеобразование (перемешивание летучих веществ с окислителями);
- воспламенение, гомогенное горение летучих веществ;
- образование кокса и его гетерогенное горение.

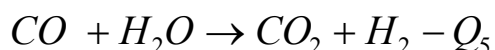
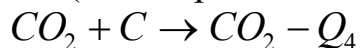
При этом осуществляются следующие реакции горения:

– первичные реакции (экзотермические):



$$Q_1 > Q_2 > Q_3$$

– вторичные реакции (эндотермические):



Основу этих реакций составляют гетерогенные процессы, наиболее длительные по времени. При сравнительно низких температурах до 800 °С скорость химических реакций мала. Поэтому скорость поглощения кислорода во много раз меньше скорости, с кото-

рой кислород поставляется к поверхности горения. Скорость процесса горения лимитируется скоростью химической реакции, т.е. происходит в кинетической области (I область горения).

В области горения 800-900 °С происходит как кинетическое, так и диффузионное горение. Скорость химической реакции становится соизмеримой или равной скорости доставки кислорода к окисляемой поверхности (II область горения).

При высоких температурах (900-1500 °С) происходит процесс выхода  $CO$  с поверхности частиц, т. е. процесс диссоциации. В результате скорость реакции замедляется из-за развития вторичных реакций. Кроме того, поверхность частицы уменьшается из-за поступления  $CO$  через их поры (III область горения).

При температурах более 1500 °С изменяется характер химической реакции, и начинают преобладать вторичные (восстановительные) реакции. В этом периоде углеродные частицы газифицируются, т. к. кислород не достигает их поверхности, а химическая реакция перемещается в газовый поток. Перемещение процесса горения в газовый поток несколько повышает скорость реакции по сравнению с III периодом горения (IV область горения).

С дальнейшим ростом температуры (>2000 °С) начинает сказываться нехватка кислорода в зоне вторичных реакций, т. е. происходит торможение горения (V область горения).

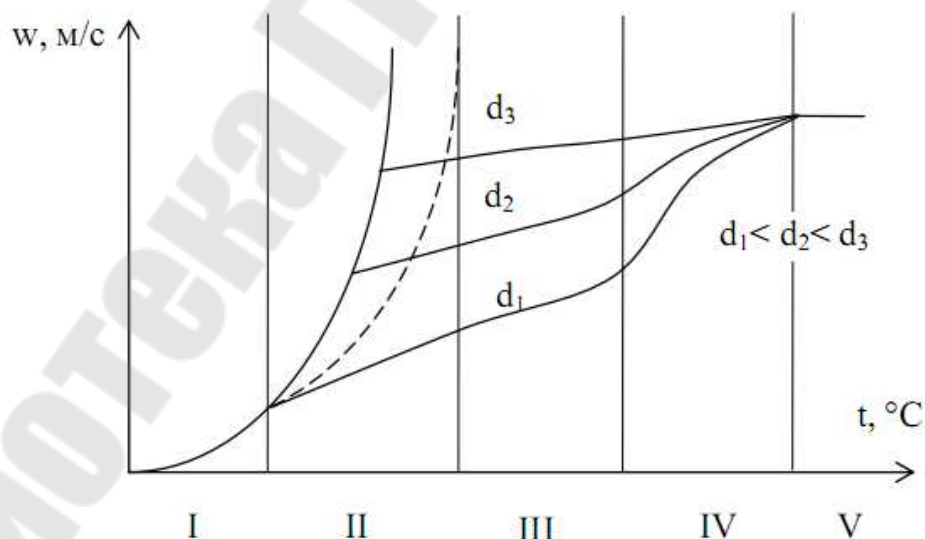


Рис. 1.5. Области горения твердого топлива

## **ТЕМА 2. ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ**

Качественная водоподготовка, рациональный водно-химический режим - это:

- гарант надежности, экономичности, безаварийности теплоэнергетического оборудования и тепловых сетей;
- обеспеченность предупреждения образования всех видов отложений и коррозионных повреждений на внутренних поверхностях теплоэнергетического оборудования, элементах трассы сетевой воды, включая отопительные приборы;
- экономия сжигаемого топлива, так как образующиеся отложения на поверхности нагрева обладают высоким термическим сопротивлением, что вызывает большие потери топлива.

### **2.1. Применение воды в качестве теплоносителя**

В настоящее время вода широко используется в различных областях промышленности в качестве теплоносителя, чему способствует широкое распространение воды в природе и ее особые термодинамические свойства, связанные со строением молекул. Полярность молекул воды, характеризуемая дипольным моментом, определяет большую энергию взаимного притяжения молекул воды (ориентационное взаимодействие) при температуре 10-30 °С и соответственно большую теплоту фазового перехода при парообразовании, высокие теплоемкость и теплопроводность. Значение диэлектрической постоянной воды, также зависящей от дипольного момента, определяет своеобразие свойств воды как растворителя.

Оборудование современных ТЭС и АЭС эксплуатируется при высоких тепловых нагрузках, что требует жесткого ограничения толщины отложений на поверхностях нагрева по условиям температурного режима их металла в течение рабочей кампании. Такие отложения образуются из примесей, поступающих в циклы электростанций, в том числе и с добавочной водой, поэтому обеспечение высокого качества водных теплоносителей ТЭС и АЭС является важнейшей задачей.

Использование водного теплоносителя высокого качества упрощает также решение задач получения чистого пара, минимизации скоростей коррозии конструкционных материалов котлов, турбин и

оборудования конденсатно-питательного тракта. Таким образом, качество обработки воды на ТЭС и АЭС тесным образом связано с надежностью и экономичностью эксплуатации современного высокоинтенсивного котлотурбинного оборудования, с безопасностью ядерных энергетических установок.

Для удовлетворения разнообразных требований к качеству воды, потребляемой при выработке электрической и тепловой энергии, возникает необходимость специальной физико-химической обработки природной воды. Эта вода является, по существу, исходным сырьем, которое после надлежащей обработки (очистки) используется для следующих целей:

а) в качестве исходного вещества для получения пара в котлах, парогенераторах, ядерных реакторах кипящего типа, испарителях, паропреобразователях;

б) для конденсации отработавшего в паротурбинах пара;

в) для охлаждения различных аппаратов и агрегатов ТЭС и АЭС;

г) в качестве теплоносителя в тепловых сетях и системах горячего водоснабжения.

Одновременно с очисткой природной воды для подготовки используемой на электростанциях чистой воды необходимо решать комплексно вопросы, связанные с утилизацией различными методами образующихся при этом сточных вод.

Такое решение является мерой защиты от загрязнения природных источников питьевого и промышленного водоснабжения.

Исходная природная вода  $D_{исх}$  используется в качестве исходного сырья на водоподготовительной установке, а также для других целей на ТЭС и АЭС.

Добавочная вода  $D_{д.в.}$  направляется в контур для восполнения потерь пара и конденсата после обработки с применением физико-химических методов очистки.

Турбинный конденсат  $D_{т.к.}$ , содержащий незначительное количество

растворенных и взвешенных примесей, - основная составляющая питательной воды.

Возвратный конденсат  $D_{в.к.}$  от внешних потребителей пара используется после очистки от внесенных загрязнений. Он является составной частью питательной воды.

Питательная вода  $D_{п.в.}$ , подаваемая в котлы, парогенераторы или реакторы для замещения испарившейся воды в этих агрегатах, представляет собой главным образом смесь  $D_{т.к.}$ ,  $D_{д.в.}$ ,  $D_{в.к.}$  и конденсата регенеративных подогревателей.

Котловая вода, вода парогенератора и реактора - вода, находящаяся в элементах указанных агрегатов.

Продувочная вода  $D_{п.р.}$  - вода, выводимая из котла, парогенератора

или реактора вода на очистку или в дренаж для поддержания в испаряемой (котловой) воде заданной концентрации примесей. Состав и концентрация примесей в котловой и продувочной водах одинаковы.

Охлаждающая или циркуляционная вода  $D_{о.в.}$  используется в конденсаторах паровых турбин для конденсации отработавшего пара.

Подпиточная вода  $D_{в.п.}$  подается в тепловые сети для восполнения потерь.

При эксплуатации ТЭС и АЭС возникают следующие внутристанционные потери пара и конденсата:

а) в котлах при непрерывной и периодической продувке, при открытии предохранительных клапанов, при обдувке водой или паром наружных поверхностей нагрева от золы и шлака, на распыливание жидкого топлива в форсунках, на привод вспомогательных механизмов;

б) в турбогенераторах через лабиринтные уплотнения и паровоздушные эжекторы;

в) в пробоотборных точках;

г) в баках, насосах, трубопроводах при переливе, испарении горячей воды, просачивании через сальники, фланцы и т. п.

Обычно внутристанционные потери пара и конденсата, восполняемые добавочной питательной водой, не превышают в различные периоды эксплуатации на ТЭС 1,2-1,6 %, на АЭС 0,5-1 % их общей паропроизводительности.

На промышленных ТЭЦ, отпускающих пар на различные технологические нужды предприятий, существуют также внешние потери пара и конденсата, поэтому количество добавочной воды для таких ТЭЦ может достигать 10-50 % количества генерируемого пара.

### 2.1.1. Источники загрязнения теплоносителей

Существует несколько источников загрязнений теплоносителя в пароводяных трактах ТЭС и АЭС: примеси добавочной воды, вводимой в цикл для покрытия внутренних и внешних потерь пара и конденсата; присосы в конденсат пара охлаждающей воды в конденсаторах или сетевой воды в теплообменниках; примеси загрязненного конденсата; возвращаемого от внешних потребителей пара на ТЭЦ; примеси искусственно вводимые в пароводяной тракт для коррекции водного режима (фосфаты, гидразин, аммиак, другие разнообразные добавки); продукты коррозии конструкционных материалов, переходящие в теплоноситель. На АЭС примеси, кроме того, могут поступать в тракт в виде продуктов деления ядерного топлива через негерметичные участки оболочек тепловыделяющих элементов и образовываться в активной зоне реакторов за счет процессов воды, а также протекания радиационных превращений и радиационно-химических реакций. В зависимости от типа основного теплоэнергетического оборудования и условий работы вклад и влияние каждого из перечисленных источников (табл. 2.1) в суммарное загрязнение водного теплоносителя ТЭС и АЭС могут значительно варьироваться.

Таблица 2.1

Характеристика загрязнений трактов ТЭС и АЭС

<b>Источники загрязнений</b>	<b>Характеристика загрязнений</b>
Добавочная вода	В зависимости от схемы очистки может содержать в различных концентрациях соли натрия и аммония, кремниевую кислоту, соединения железа, органические вещества, растворенные газы.
Присосы охлаждающей воды	Все примеси природных вод в количестве, соответствующем удельному значению присоса.
Коррозия конструкционных материалов	Оксиды и ионы железа, меди, алюминия, хрома и других элементов.
Возвратный конденсат внешних потребителей пара на ТЭЦ	Оксиды железа, нефтепродукты, ионы кальция и магния, специфические загрязнения определяемые типом пароиспользующего предприятия.



Присос охлаждающей воды в конденсаторах турбин обусловлен более высоким давлением сводной стороны конденсатора по сравнению с паровой, находящейся под глубоким вакуумом. Необходимо иметь в виду, присосы воды наблюдаются практически во всех конденсационных установках (исключая воздушно-конденсационные, так называемые «сухие» градирни) и составляют обычно 0,005-0,003 % количества конденсирующегося пара, повышаясь до 0,01-0,02 % при наличии коррозионных свищей или микротрещин в конденсаторных трубках и примерно 0,2 % при разрыве одной трубки.

### **2.1.2. Влияние примесей воды на надежность работы теплоэнергетического оборудования**

Растворенные в воде вещества вызывают те или иные неполадки в работе энергетического оборудования. В основном это связано с образованием в тепловых агрегатах накипных отложений и коррозии.

При большей щелочности и солесодержании имеет место вспенивание котловой воды и занос солей в пароперегреватель.

В настоящее время в котлах предусматриваются специальные сепарационные устройства, ступенчатое испарение, промывка пара и другие способы, способствующие получению чистого пара. Допускаемое конструкцией котла солесодержание в чистом и солевом отсеках оговаривается заводом-изготовителем в паспортных данных к котлу.

В теплофикационных водогрейных котлах кроме карбонатных отложений при подогреве воды выше 130°C сильно снижается растворимость  $\text{CaSO}_4$ , что потребовало принять нормы качества подпиточной и сетевой воды, исключающие выпадение из раствора гипса (образующего очень плотные накипи).

В теплообменной аппаратуре, работающей при 25-50°C возникают так называемые низкотемпературные отложения, основным компонентом которых является карбонат кальция ( $\text{CaCO}_3$ ).

Образующиеся накипные отложения значительно снижают теплопроизводительность теплообменников (иногда требуется установка дополнительных), а также увеличивают потери напора в трубках.

В подогревателях горячего водоснабжения (подогрев воды до 70°C), использующих недеаэрированную исходную воду, накипные отложения могут быть весьма велики, поэтому применение исходной

воды без предварительной обработки ограничивается соответствующими нормами.

Наряду с карбонатными отложениями в теплообменной аппаратуре идет накопление продуктов коррозии. Довольно характерным является состав отложений, отобранных из подогревателей горячего водоснабжения

(состав приводится в процентах): Ca - 25,96; MgO - 1,97; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 23,46; SiO<sub>2</sub> - 6,2; SO<sub>3</sub> - 0,42; потери при прокаливании составляют 36 %.

В современных котлах, особенно сжигающих высококалорийное топливо (газ, мазут), тепловой поток в экранных трубках может достигать 580-700 кВт/м<sup>2</sup> [500-600 Мкал/(м<sup>2</sup>·ч)]. Образование на внутренней поверхности нагрева незначительных по толщине (около 0,1-0,2 мм) малотеплопроводных отложений приводит к перегреву металла и, как следствие, к появлению отдулин, свищей и даже разрывов экранных труб.

Отложения, образующиеся непосредственно на поверхностях нагрева, принято называть первичной накипью; грубодисперсные частицы, находящиеся в объеме воды (шлам), впоследствии могут оседать на поверхности нагрева, образуя вторичные отложения (вторичная накипь).

Образование отложений на поверхности нагрева происходит вследствие протекания в нагреваемой среде процессов, связанных с образованием труднорастворимых веществ вследствие концентрирования солей при многократном упаривании в котле, питательной воды, а также понижения растворимости ряда веществ с повышением температуры.

По химическому составу накипи подразделяют:

а) на накипи щелочноземельных металлов, которые содержат CaCO<sub>3</sub>; CaSO<sub>4</sub>; CaSiO<sub>3</sub>; Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>; MgO·Mg(OH)<sub>2</sub>; Mg<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>; 5CaO·5SiO<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O. В зависимости от преобладающего аниона они разделяются на карбонатные, сульфатные, фосфатные и силикатные.

б) железнокислые и железнофосфатные накипи;

в) медные накипи.

Как уже отмечалось, карбонатная накипь образуется в теплообменниках, тепловых сетях, конденсаторах турбин и др. В условиях кипящей среды CaCO<sub>3</sub> обычно выпадает в виде шлама.

Сульфатные накипи, как правило, образуют плотные отложения, прочно связанные с металлом.

Силикатные накипи сложны по своему составу ( $\text{CaSiO}_3$ ;  $5\text{CaO} \cdot 5\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ;  $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  и др.), а по своей структуре разнообразны и образуют плотные, пористые и комковатые отложения.

Железоокисные накипи, состоящие в основном из магнетита ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), отлагаются обычно в зоне высоких температур (экранные трубы).

Железофосфатные накипи [ $\text{NaFePO}_4$ ;  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ ] образуются при повышенном содержании в котловой воде железа, фосфата натрия и низкой ее щелочности.

В медных накипях содержится до 30 и более процентов меди с примесями окислов железа, соединений кальция и магния. Медь в накипи присутствует в виде металла и окислов. Такие накипи образуются в зонах высоких температур на стороне трубы, обращенной в топку.

Поступает медь в котел с питательной водой как продукт коррозии латуни и других медных сплавов конденсатного тракта.

Все материалы, из которых выполняется теплоэнергетическое оборудование, в силу своей природы подвергаются коррозии - разъеданию под воздействием среды.

При плохо налаженной деаэрации коррозии подвергаются трубопроводы, теплообменная аппаратура, аккумуляторные баки и другое оборудование.

Скопление продуктов коррозии на участках теплосети с малыми скоростями может привести к увеличению гидравлического сопротивления сети, снижению ее пропускной способности, забиванию коррозионными отложениями местных систем отопления.

Таким образом, примеси, попавшие в пароводяной тракт теплоэнергетических объектов, снижают надежность и повышают аварийность теплоэнергетического оборудования и тепловых сетей.

## **2.2. Примеси природных вод. Показатели качества воды**

Природная вода, разделяемая условно на атмосферную (дождь, туман, снег), поверхностную (реки, озера, пруды, болота), подземную (артезианские скважины, шахтные колодцы) и морскую (морья, океаны), всегда содержит различные примеси. Характер и количество имеющихся в воде примесей определяет качество воды, т.е. характе-

ризует возможность использования ее для различных целей в промышленности и в быту.

Примеси поступают в воду, находящуюся в природном круговороте, из окружающей ее среды. Вода, занимающая около 70 % поверхности Земли, испаряясь, поступает в атмосферу, а после конденсации водяных паров в верхних слоях атмосферы возвращается на поверхность Земли в виде осадков, образуя поверхностные и подземные стоки и водоемы. Подземные стоки создаются при просачивании атмосферной воды в более или менее глубокие слои почвы, где вода собирается над водонепроницаемыми пластами, стекает по ним и выходит вновь на поверхность земли в местах выхода этих пластов, сливаясь с поверхностными стоками. Далее вода в руслах рек и ручьев перемещается к озерам, морям, водохранилищам, завершая этим свой природный круговорот.

Наряду с природным существует производственно-бытовой круговорот воды, создаваемый в результате потребления ее для различных целей (охлаждение, коммунальное водоснабжение и т.п.).

Примеси поступают в воду на всех этапах отмеченных круговоротов. При конденсации влаги в атмосфере в конденсате растворяется кислород, азот, углекислый газ в соответствии с их парциальными давлениями, а в промышленных районах - также значительное число оксидов серы и других продуктов, содержащихся в дымовых газах. Суммарное солесодержание атмосферных осадков составляет в среднем  $10 \text{ мг/дм}^3$ . Просачиваясь через грунт, вода встречается с различными минеральными солями ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{CaCO}_3$ , силикатами и др.) и органическими веществами, растворяет или механически захватывает их. При одновременном присутствии в воде кислорода, органических веществ и микроорганизмов (бактерий), постоянно находящихся в поверхностных слоях почвы, создаются условия для перевода основных составляющих ряда органических веществ в минеральные кислоты (углерода в угольную, азота в азотную, серы в серную, фосфора в фосфорную и т.п.). Образующиеся в подпочвенных водах кислоты взаимодействуют с широко распространенными в природе известняками - карбонатами кальция, железа, доломитами  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  и другими породами, что приводит к поступлению в воду хорошо растворимых бикарбонатов  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Fe}$ .

Коренные горные породы - сложные силикаты (граниты, кварцевые породы), они весьма слабо растворимы в воде и лишь при дли-

тельном контакте обогащают воду растворимыми силикатами в небольшой концентрации (5-15 мг/дм<sup>3</sup>).

При прохождении воды через толщу почвы, захваченные ею механические грубодисперсные примеси отфильтровываются, в связи с чем грунтовые (лежащие вблизи поверхности земли) и артезианские (лежащие более глубоко между двумя водонепроницаемыми пластами) воды характеризуются невысокой концентрацией взвешенных и органических примесей. В то же время десорбция углекислоты из таких вод затруднена в связи со слабым газообменом их с атмосферой, что приводит к интенсивному растворению карбонатных пород и большому насыщению подземных вод бикарбонатами.

Фильтрация воды через почву частично сопровождается ионообменной адсорбцией ионогенных примесей; так, почвенные комплексы хорошо задерживают фосфаты, происходит обмен адсорбированного почвой  $\text{Na}^+$  на  $\text{K}^+$  и т.п. Поэтому, несмотря на примерно одинаковую распространенность натрия и калия в природе, в поверхностной воде среднее соотношение концентраций  $[\text{Na}^+]:[\text{K}^+]$  составляет большей частью 10:1.

Существенно большим разнообразием примесей по сравнению с природными водами характеризуются производственно-бытовые стоки. По характеру загрязнений эти стоки подразделяют на три группы: бытовые сточные воды; производственные сточные воды; стоки, образующиеся при лесозащитных и растениеводческих работах.

Бытовые сточные воды и стоки лесозащитных и растениеводческих работ с применением реагентов имеют более или менее однообразный состав: белковые вещества и продукты их распада, жиры, мочевины, мыло, синтетические моющие средства, удобрения и т.п.

Эти примеси в основном относятся к классу органических веществ и в водной среде окисляются под действием кислорода и микроорганизмов.

Загрязнения производственных стоков определяются главным образом типом предприятия, на котором они образуются. Концентрация примесей (кислот, щелочей, нейтральных солей, нефтепродуктов, органических соединений) в сточных водах, подлежащих переработке и повторному использованию, может достигать несколько граммов на один кубический дециметр воды и оказывать резко отрицательное влияние на водно-химический и биохимический режимы водостока при аварийных сбросах: снижение концентрации кислорода, изменения рН, отравляющее действие, заиливание и т.п., поэтому бескон-

трольный сброс сточных вод в природные водотоки запрещен в законодательном порядке.

### **2.2.1 Выбор и характеристика источника водоснабжения**

Выбор водоисточника и производительности водоподготовительной установки зависит от ряда факторов: концентрации примесей в поверхностных водах, размера бассейна, сезона года, изменения количества осадков по годам и т.д., решение о пригодности данного водоема для использования можно принимать лишь на основе тщательного многолетнего исследования качества и дебита воды в нем.

При выборе источника водоснабжения следует учитывать не только нужды водоподготовки, но и водопотребление котельной, электростанции в целом. Если в районе расположения котельной, ТЭС имеется несколько источников водоснабжения, то выбор того или иного из них должен осуществляться из условия, что качество воды в нем оказывает непосредственное влияние на методы и схему обработки добавочной воды.

Так, если источником является артезианская вода, в которой практически отсутствуют грубодисперсные примеси (ГДП) и органические вещества, то отпадает необходимость в ее предварительной коагуляции. Однако такая вода обычно содержит большое количество ионов двухвалентного железа, что приводит к необходимости применять методы предварительного его удаления из воды перед последующей обработкой. Преимуществом артезианской воды перед поверхностной является ее стабильный состав во все времена года, что в значительной степени облегчает эксплуатацию водоподготовительной установки.

При заборе воды из поверхностного источника следует учитывать, что качество воды в нем меняется не только по сезонам, но и по годам. Так, весной и осенью в такой воде возрастают концентрации ГДП и органических веществ и, наоборот, в летние и зимние месяцы уменьшается солесодержание. Эти обстоятельства следует учитывать при проектировании схемы обработки воды из поверхностных источников, так как водоподготовительная установка (ВПУ) рассчитывается применительно к максимальным концентрациям того или иного вещества в природной воде. Место забора воды следует располагать по возможности дальше от места сброса сточных вод соседних предприятий.

Производительность водоподготовительных установок (ВПУ) должна быть достаточной для покрытия потерь воды и пара в схеме котельной и ТЭС, а также для расхода воды и пара на различные технологические нужды теплоэнергообъектов. Часть потерь на котельной, ТЭС неизбежна и связана с расходом воды и пара на собственные нужды: продувку котлов, водные промывки оборудования, обслуживание установок по очистке конденсата и т.п. Эти потери нормируются на каждой ТЭС и котельной. Другая часть потерь относится к “прочим” расходам на собственные нужды. В целом “прочие” расходы не должны превышать (в процентах общего расхода питательной воды работающих котлов) на ГРЭС, на ТЭЦ с чисто отопительной нагрузкой - 1,2 %; на ТЭЦ с производственной или производственной и отопительной нагрузкой - 1,6 %.

При фактическом расходе питательной воды, меньшем номинального, нормы внутростационарных потерь соответственно увеличиваются, но не более чем в 1,5 раза.

При расчете общих потерь расходы воды и пара на технологические нужды принимаются в соответствии с нормами и учетом возможного повторного использования воды в цикле котельной или ТЭЦ.

### **2.2.2. Классификация, характеристика вод и их примесей**

Природные воды классифицируют по ряду признаков, простейшим из них является солесодержание воды. В соответствии с солесодержанием различают

- пресную воду - солесодержание 1 г/дм<sup>3</sup>;
- солоноватую - солесодержание 1-10 г/дм<sup>3</sup>;
- соленую - солесодержание более 10 г/дм<sup>3</sup>;

Большое распространение получила предложенная О.А. Алехиным система, по которой воды различаются по преобладающему в них аниону: гидрокарбонатный класс вод с преобладающим анионом  $\text{HCO}_3^-$  или суммой анионов  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{CO}_3^{2-}$  (С), сульфатные воды (S), хлоридные воды (Cl). По преобладающему катиону классы вод делятся на три группы: кальциевую (Ca), магниевую (Mg) и натриевую (Na).

Примеси природных вод по степени дисперсности (крупности) подразделяют: на истинно-растворимые (ионно- или молекулярно-дисперсные), распространенные в воде в виде отдельных ионов, мо-

лекул; коллоидно-дисперсные с размером частиц от 1 до 100 нм; грубодисперсные с размером частиц более 100 нм (0,1 мкм).

*Коллоидные примеси* представляют собой агломераты из большого числа молекул с наличием поверхности раздела между твердой фазой и водой. Из-за малых размеров коллоидные частицы не теряют способности к диффузии и имеют значительную удельную поверхность.

Коллоидные частицы не выделяются из воды под действием силы тяжести, не задерживаются обычными фильтрующими материалами (песком, фильтрующей бумагой) и различимы в рассеянном свете (конус Тиндаля). В природных водах в коллоидно-дисперсном состоянии находятся различные производные кремниевой кислоты и железа, органические вещества - продукты распада растительных и животных организмов.

*Грубодисперсные примеси* (так называемые взвешенные вещества) имеют столь большую массу, что практически не способны к диффузии. С течением времени устанавливается определенное седиментационное равновесие, примеси либо выпадают в осадок, либо всплывают на поверхность (при плотности частиц меньше плотности воды).

Длительно оставаясь во взвешенном состоянии, грубодисперсные примеси обуславливают мутность воды. Чем больше размер частиц грубодисперсных примесей, тем быстрее устанавливается седиментационное равновесие, и тем легче выделяются они из воды при отстаивании или фильтрации. Так, скорость отстаивания частиц песка и ила размером 100 и

20 мкм составляет в неподвижной воде при 10 °С соответственно около 7 и 0,4 мм/с.

По химическому составу примеси природных вод можно разделить на два типа: минеральные и органические.

К *минеральным примесям* воды относятся растворенные в ней содержащиеся в атмосфере газы  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ , а также газы, внесенные сточными водами, различные соли, кислоты, основания, в значительной степени находящиеся в диссоциированной форме, т.е. в виде образующих их катионов и анионов.

К *органическим примесям* природных вод относят гумусовые вещества, вымываемые из почв и торфяников, а также органические вещества различных типов, поступающие в воду совместно с сельскохозяйственными стоками и другими типами недостаточно очищаемых стоков.



### 2.2.3 Технологические, качественные показатели воды

В зависимости от характера использования воды различными потребителями определяются и показатели, необходимые для качественной и количественной характеристики воды.

Важнейшими показателями качества воды для использования ее в теплоэнергетике являются

- концентрация грубодисперсных веществ (ГДП);
- концентрация истинно-растворимых примесей (ионный состав);
- концентрация коррозионно-активных газов;
- концентрация ионов водорода;
- технологические показатели, в которые входят сухой и прокаленный остаток, окисляемость, жесткость, щелочность, кремнесодержание, удельная электропроводность и т.д.

*Концентрация грубодисперсных веществ* в воде может быть достаточно точно определена фильтрованием воды через бумажный фильтр с последующим его высушиванием при температуре 378-383 К до постоянной массы. Однако на практике предпочитают использовать методы определения грубодисперсных веществ по прозрачности и мутности воды.

*Прозрачность воды* определяют при повышенных концентрациях ГДП в воде при помощи стеклянной трубки, залитой водой, на дне которой расположен шрифт или крест с шириной линии 1 мм. Высота столба воды, при которой определяется хорошая видимость шрифта или креста, является количественной оценкой прозрачности воды. При малых концентрациях ГДП ( $< 3 \text{ мг/дм}^3$ ) используется нефелометрический метод, основанный на сравнении мутности анализируемой воды с соответствующим эталоном. Концентрация ГДП может быть также определена по разности значений плотного и сухого остатков, полученных при упаривании одного кубического дециметра соответственно нефильтрованной и фильтрованной воды.

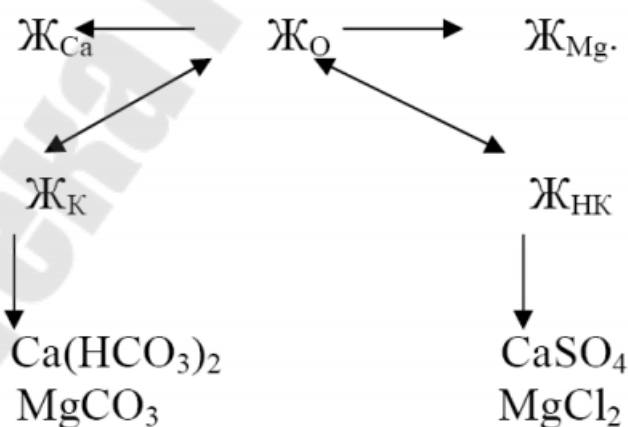
*Сухой остаток* позволяет косвенно судить о солесодержании воды, т.е. о сумме всех анионов и катионов в воде, за исключением ионов  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$ . Однако при образовании сухого остатка несколько изменяется ионный состав примесей за счет разложения бикарбонатов. В сухой остаток входит также часть органических и коллоидных примесей. Прокаливание сухого остатка при температуре 1073 К приводит к сгоранию органических примесей и распаду карбонатов. Поэтому разность значений плотного и сухого остатков позволяет лишь ориентировочно оценить концентрацию органических примесей в воде.

Концентрации отдельных ионов в воде, ( $\text{мг/дм}^3$  или  $\text{кмоль/дм}^3$ ), определяемых методами химического анализа. Правильность проведения анализа должна подтверждаться выполнением закона электро-нейтральности:  $\Sigma A = \Sigma K \text{ ммоль/дм}^3$ .

Возможная ошибка при этом не должна превышать 1 %. Если ошибка превышает 1 %, то следует проверить качество анализа отдельных ионов или повторить весь анализ.

Суммарная концентрация всех катионов и анионов в воде составляет содержание воды, при этом не учитываются анионы кремниевой кислоты из-за неопределенности сведений об их концентрации в ионной форме, полуторные оксиды и ионы  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$ . В случае крепких растворов ионы  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$  следует учитывать при подсчете солесодержания.

Жесткость воды является одним из важнейших показателей, определяющих пути использования воды в теплоэнергетике. Общей жесткостью воды  $J_O$  называется суммарная концентрация ионов кальция и магния выражаемая в  $\text{ммоль/дм}^3$ , а при малых значениях - в  $\text{мкмоль/дм}^3$ . По определяющему катиону общая жесткость воды подразделяется на кальциевую  $J_{Ca}$  и магниевую  $J_{Mg}$ . Часть общей жесткости, эквивалентная концентрации бикарбонат-ионов и карбонат-ионов в воде, называется карбонатной жесткостью  $J_K$ , а остальная часть, эквивалентная содержащимся в воде другим анионам ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и др), - некарбонатной жесткостью  $J_{HK}$ .



Общей щелочностью воды  $\text{Щ}_O$  ( $\text{ммоль/дм}^3$ ) называется суммарная концентрация всех анионов слабых кислот и ионов гидроксида за вычетом концентрации ионов водорода:

$$\text{Щ}_O = \sum C_{An}^{сл.к.} + C_{OH^-} - C_{H^+} \quad (2.1)$$

Характер анионов слабых кислот, обуславливающих общую щелочность, позволяет подразделять ее на гидратную щелочность (равную концентрации ионов  $\text{OH}^-$ ), силикатную ( $\text{HSiO}_3^-$ ,  $\text{SiO}_3^{2-}$ ), фосфатную ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  и  $\text{PO}_4^{3-}$ ), бикарбонатную ( $\text{HCO}_3^-$ ) и карбонатную ( $\text{CO}_3^{2-}$ ).

Обычно в природных водах бикарбонатная щелочь существенно преобладает над другими видами щелочности, поэтому ее значение без большой погрешности выражает общую щелочность воды. Поправка на концентрацию ионов  $\text{H}^+$  при определении щелочности вводится при присутствии в воде слабых кислот в свободном состоянии, так как при их диссоциации образуются в эквивалентных количествах анионы слабых кислот и анионы  $\text{H}^+$ .

*Удельная электропроводность* воды (См/см) характеризуется электрической проводимостью слоя воды, находящегося между двумя противоположными гранями куба с ребром, равным 10-2 м. Она косвенно связана с суммарной концентрацией примеси в истинно-растворенном состоянии (солесодержанием). В чистой воде, не содержащей примесей, перенос зарядов осуществляется лишь ионами  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$ . Удельная проводимость такой воды при температуре 293 К составляет 0,04 мкСм/см. В растворах связь между электропроводимостью и концентрацией ионных примесей зависит от множества факторов, в том числе от температуры, вида ионов, степени диссоциации, что существенно затрудняет измерение. Более определенная связь существует в растворах при постоянных температуре и степени диссоциации.

*Концентрация растворенных газов* в воде зависит от множества факторов: природы газа, температуры воды, степени минерализации воды, парциального давления газа над водой, рН воды и т.п. Это во многих случаях существенно затрудняет их аналитическое определение в технологических процессах и требует специальных методов анализа. Концентрация  $\text{CO}_2$  в природной воде существенно зависит от степени углекислотного равновесия и составляет примерно  $0,5 \text{ мг/дм}^3$  ( $10^{-5} \text{ моль/дм}^3$ ) при температуре 293 К.

Концентрация  $\text{O}_2$  в значительной степени зависит от содержания в воде органических веществ и температуры. При увеличении температуры от 273 до 308 К концентрация кислорода в чистой воде уменьшается от  $14,6$  до  $6,5 \text{ мг/дм}^3$ .

*Показатель концентрации водородных ионов (рН) воды характеризует реакцию воды (кислая, щелочная, нейтральная) и учитывается при всех видах обработки воды.*

В соответствии с законом действующих масс вода частично диссоциирует на ионы  $H^+$  и  $OH^-$ , согласно уравнению



Значение рН водных растворов определяет интенсивность диссоциаций содержащихся в них слабых кислот или оснований. С понижением рН, т.е. с повышением активности (или концентрации) ионов  $H^+$ , процентное содержание недиссоциированных молекул слабых кислот повышается, а содержание их анионов понижается, для катионов слабых оснований наблюдается обратное соотношение, рН природной воды обычно колеблется в пределах 6-8 и зависит в основном от соотношения в воде концентраций  $HCO_3^-$  и  $H_2CO_3$ . Измерение рН основано на определении разности электрических потенциалов (потенциометрический метод) двух помещенных в анализируемый раствор электродов - индикаторного и электрода сравнения.

*Окисляемость воды* - это показатель, имеющий условное значение и представляющий собой расход какого-либо сильного окислителя, необходимого для окисления в определенных условиях органических примесей, которые содержатся в 1 л воды. Обычно для этих целей применяется перманганат калия ( $KMnO_4$ ) или бихромат калия ( $K_2Cr_2O_7$ ), различая соответственно перманганатную и бихроматную окисляемость. Результаты определения перманганатной окисляемости воды выражаются в кислородных или перманганатных единицах ( $O_2$ ,  $KMnO_4$ ), т.е. миллиграмм на кубический дециметр ( $мг/дм^3$ ), различающихся в 3,95 раза. Бихроматная окисляемость обычно превышает перманганатную в 2-2,5 раза, а разность между ними позволяет судить об устойчивости органических примесей к действию окислителей. При определении окисляемости обоих видов происходит окисление не только содержащихся в воде органических веществ, но и некоторых неорганических, например закисного железа, сероводорода, нитритов. Поэтому следует еще раз подчеркнуть, что окисляемость характеризует содержание в воде органических веществ приближенно и условно.

Окисляемость чистых грунтовых вод составляет обычно 1-3  $мг O_2/дм^3$ , в то время как в водах поверхностных источников окисляемость повышается до 10-12  $мг O_2/дм^3$ . Реки болотного происхождения и поверхностные источники в период паводка отличаются очень вы-

сокой окисляемостью, превышающей, например, 30 мг  $O_2/дм^3$ . Сточные воды, содержащие органические вещества и сбрасываемые в водоемы, могут повышать окисляемость воды различных источников. Для суммарной оценки органических загрязнителей применяют метод сорбции из воды органических веществ активированным углем с последующим его высушиванием и экстракцией из него этих веществ хлороформом (метод угольнохлороформного экстракта). В массовых единицах ( $мг/дм^3$ ) оценивают в ряде случаев содержание общего органического углерода в воде.

### 2.3. Предварительная очистка воды

Разнообразие примесей, которые должны быть удалены из воды, а также методов, применяемых при ее обработке на котельных и ТЭС, усложняют поиск оптимальных решений при выборе схем и аппаратов в каждом конкретном случае.

Поэтому очевидна необходимость классификации методов очистки и удаляемых примесей. При этом в качестве классификационных признаков используют:

- физико-химическую сущность методов, применяемых при очистке без учета характера удаляемых примесей и изменения их состояния в процессе очистки;
- характер сил, действующих на примеси, также без учета характера примесей и изменения их состояния;
- характер подлежащих удалению примесей без учета изменения их состояния в процессе очистки;
- изменение состояния примеси в процессе очистки.

Наиболее известны классификации Л.А. Кульского и М.И. Лапшина. В основе классификации Л.А. Кульского лежит различие характера удаляемых примесей.

Загрязненные воды представляют собой гомогенные или гетерогенные системы, которые соответственно подразделяются на ионные, молекулярные, коллоидные растворы и взвеси. К каждой из четырех групп вод (систем) подобраны соответствующие наиболее эффективные методы очистки воды, области их применения, состав очистных сооружений и т.д. Однако в этой классификации не учитывается характер отдельных примесей.

В классификации М.И. Лапшина, наоборот, основным классификационным признаком является характер и состояние удаляемых

при очистке примесей; при этом методы очистки подразделяются на следующие группы:

- методы непосредственного выделения примесей, например отстаивание;
- методы выделения примесей с изменением фазового состояния воды или примеси, например деаэрация;
- методы превращения примесей, например образование трудно-растворимых соединений (известкование);
- биохимические методы.

Обе классификации имеют достоинства и недостатки, но дополняя друг друга, помогают выбору оптимального решения схем ВПУ на котельных и ТЭС с точки зрения как повышения эффективности очистки воды, так и возможности утилизации извлеченных из нее при очистке примесей для предотвращения загрязнений окружающей среды. При выборе метода очистки в настоящее время следует учитывать в первую очередь водоисточник, производительность, который обеспечивал бы надежность, экологичность и экономичность.

Многообразие примесей в природной воде служит причиной того, что очистка добавочной воды для подпитки котлов организуется в несколько стадий на ВПУ (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Стадии водоочистки

На начальном этапе из воды выделяются грубодисперсные и коллоидные вещества, а также снижается бикарбонатная щелочность этой воды. На дальнейших этапах производится очистка воды от истиннорастворимых примесей.

#### Начальный этап очистки воды.

*Предочистка* - необходима для улучшения технико-экономических показателей последующих этапов очистки воды, а также потому, что при отсутствии предочистки применение многих методов на последующих ступенях очистки встречает значительные затруднения. Так, наличие в воде органических веществ приводит к изменению технологических свойств анионитов, способствует их ста-

рению, а следовательно, к резкому (в 4-8 раз) снижению срока службы. Присутствие в воде ионов железа в концентрации свыше  $\text{мкг/дм}^3$  вызывает отравление мембран при очистке воды электролизом. Неудовлетворительная очистка воды от грубодисперсных и коллоидных примесей является одной из причин образования накипей на поверхностях нагрева и ухудшению качества пара. Поэтому в настоящее время предочистке воды в схемах подготовки добавочной и подпиточной воды придается важное значение.

Предочистка воды может быть осуществлена в основном методами осаждения, при применении которых примеси выделяются из воды в виде осадка.

Эти методы называются также реагентными, так как для выделения примесей в воду дозируются специальные реагенты.

К процессам осаждения, применяемым в настоящее время при предочистке воды, относятся коагуляция, известкование и магниезиальное обескремнивание.

Как правило, эти процессы совмещаются и проводятся одновременно в одном аппарате - *осветлителе*, что целесообразно как для улучшения суммарного технологического эффекта процесса очистки воды, так и для снижения капитальных и эксплуатационных затрат.

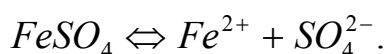
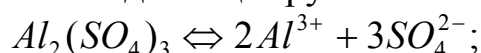
Первичное осветление воды производится в осветлителях, а окончательно очистка от осадка осуществляется при помощи процесса фильтрования, который также относится к предочистке воды, но является безреагентным методом.

На второй стадии вода подвергается очистке химическими (умягчение, обессоливание), термическими (получение дистиллята), мембранными методами.

### 2.3.1 Очистка воды методом коагуляции

Под *коагуляцией* понимают физико-химический процесс слипания коллоидных частиц и образования грубодисперсной макрофазы (флоккул) с последующим ее выделением из воды. Схема коагуляционной структуры показана на рис. 2.2.

В качестве реагентов, называемых коагулянтами, обычно применяют сернокислые соли:  $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}]$  или  $(\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O})$ . Эти соли в воде почти полностью диссоциируют:



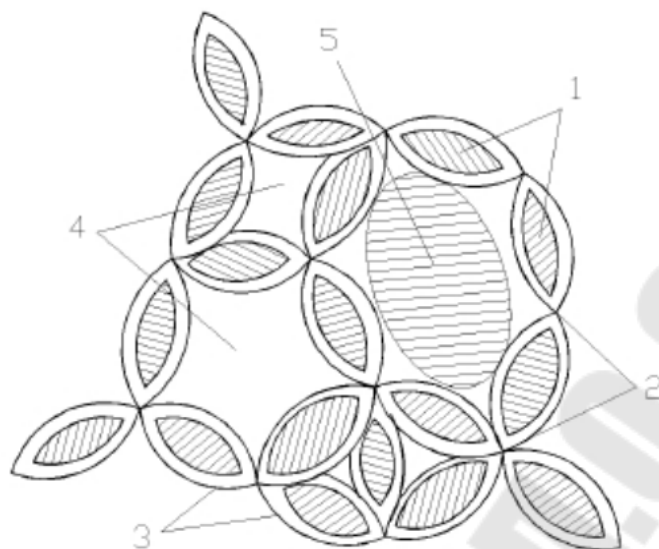


Рис. 2.2. Схема коагуляционной структуры:

1 - частицы колоидно-дисперсной фазы; 2 - дестабилизированные участки поверхности; 3 - участки поверхности, сохраняющие устойчивость; 4 - полости, заполненные водой; 5 - грубодисперсная примесь

Таким образом, при гидролизе коагулянтов:  $Al_2(SO_4)_3$  и  $FeSO_4$  образуются положительные электроны и между отрицательно заряженными частицами дисперсных примесей воды возникают силы притяжения. Образуются укрупненные агрегаты, которые уже подчиняются силе тяготения. Эти агрегаты оседают или могут быть легко отфильтрованы вследствие своих уже достаточно крупных размеров.

Процесс коагуляции имеет скрытую и явную стадии. На скрытой стадии происходит формирование коллоидных гидрооксидов  $Al^{3+}$  или  $Fe^{3+}$  и образование микрохлопьев. Именно на этой стадии коагуляции вода в основном и очищается от первичных примесей. А затем на второй стадии процесса образуются хлопья (флоккулы) размером 1-3 мм, которые, обладая высокой сорбционной способностью, могут дополнительно извлекать примеси воды.

При организации процесса коагуляции с использованием гидролизующихся коагулянтов необходим учет основных факторов, определяющих оптимальное осуществление технологии. Оптимальная доза коагулянта, т. е. то его минимальное количество, которое обеспечивает максимальное снижение концентрации коллоидных и грубодисперсных примесей в обрабатываемой воде, определяется главным образом качественным и количественным составом коллоидных



и растворенных примесей, их физическими и физико-химическими свойствами.

В настоящее время теоретические разработки не дают возможности точного расчетного выбора необходимой дозы коагулянта, что связано, с одной стороны, с отсутствием количественных характеристик различных по составу коллоидных примесей в водах различных типов, с другой - с необходимостью учитывать при расчетах сложность совокупного механизма формирования коагулированной взвеси, когда физические процессы гетерокоагуляции сопровождаются химическими, такими как хемосорбция, образование малорастворимых гидрокомплексов, их полимеризация и кристаллизация, усложняемыми влиянием кинетических факторов. Поэтому оптимальные дозы коагулянта устанавливаются опытным путем для каждого источника водоснабжения в характерные периоды года методом параллельного введения в термостатированные сосуды с определенным объемом воды различных количеств коагулянта с последующей оценкой интенсивности хлопьеобразования, скорости оседания хлопьев и определением остаточных концентраций органических веществ, железо- и кремнесодержащих соединений, ионов алюминия.

Вспомогательные процессы и средства коагуляция обеспечивают интенсификацию и повышение технико-экономической эффективности процесса коагуляции. К их числу относят *флокуляцию* - процесс агрегации частиц, в котором в дополнение к непосредственному контакту частиц происходит их адсорбционное взаимодействие с молекулами высокомолекулярных веществ, называемых *флокулянтами*. При этом ускоряются процессы образования хлопьев и их осаждение, повышается плотность агрегатов, и осадков.

Флокулянты подразделяются на неорганические и органические, природные и синтетические, на ионогенные и амфотерные. Из неорганических флокулянтов используется активная кремниевая кислота; природными органическими флокулянтами являются крахмал, карбоксиметилцеллюлоза и др. Синтетические флокулянты получили более широкое применение из-за лучших флокуляционных свойств, среди них в основном используется в настоящее время универсальный флокулянт полиакриламид (ПАА).

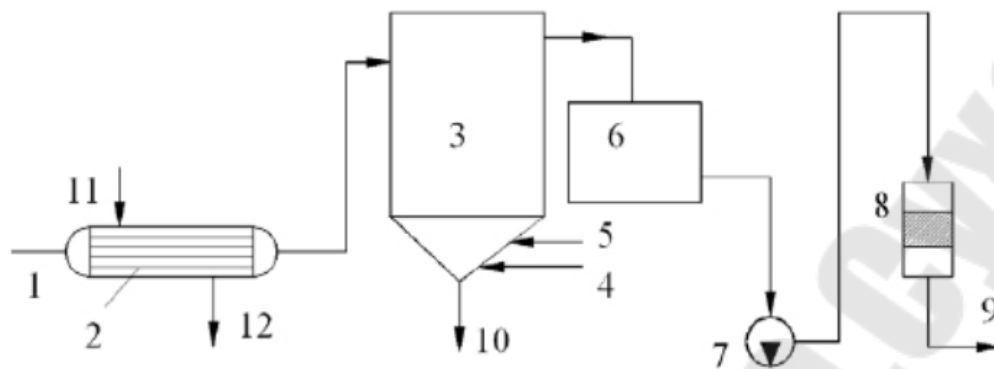


Рис. 2.3. Схема процессов известкования и коагуляции:

1 - исходная вода; 2 - теплообменный подогреватель; 3 - осветлитель; 4 - ввод извести; 5 - ввод коагулянта; 6 - бак осветлённой воды; 7 - перекачивающий насос; 8 - осветлительный фильтр; 9 - на ионитные фильтры или потребление; 10 - сброс осадка с продувочной водой; 11 - греющий пар; 12 - конденсат греющего пара

### 2.3.2 Осаждение методами известкования и содоизвесткования

Известкование воды, т. е. обработка воды  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , применяется для снижения щелочности (декарбонизации) исходной воды, при этом одновременно уменьшаются жесткость и сухой остаток, удаляются грубодисперсные примеси, соединения железа. В подогретую до температуры около  $30\text{ }^\circ\text{C}$  обрабатываемую воду дозируют в виде суспензии (молока) гашеную известь  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Растворяясь, ее компоненты обогащают воду ионами  $\text{Ca}^{2+}$  и одновременно ионами  $\text{OH}^-$ , сдвигая углекислотное равновесие в сторону образования ионов  $\text{CO}_3^{2-}$ . В результате повышения их концентрации достигается произведение растворимости  $\text{CaCO}_3$ . В составе этого соединения в осадок выпадает ион  $\text{Ca}^{2+}$ , как содержащийся в исходной воде, так и введенный с известью.

Качество известкованной воды оценивают по следующим показателям: остаточной щелочности, содержанию взвешенных веществ или прозрачности, жесткости с составляющими ее видами, сухому остатку и стабильности. Как отмечалось, значение фактической остаточной щелочности известкованной воды всегда получают значительно большим расчетного (равновесного) вследствие неполноты кристаллизации образующихся соединений. Вместе с тем в этом случае сохраняются действия теоретических предпосылок – чем больше

остаточная концентрация  $\text{Ca}^{2+}$  в известкованной воде (определяется, по существу, некарбонатной кальциевой жесткостью исходной воды), тем меньше остаточная карбонатная и общая щелочность. Исходя из опыта эксплуатации ВПУ, высказанное положение представлено следующими данными:

Остаточное содержание $\text{Ca}^{2+}$ , ммоль/дм <sup>3</sup>	более 3	1,0-3,0	0,5-1,0
Щелочность, ммоль/дм <sup>3</sup>	0,5–0,6	0,6-0,7	0,7-0,8

Состав компонентов общей щелочности будет зависеть от избытка извести, т. е. рН известкованной воды. Виды щелочности по заданному значению рН можно оценить расчетным путем. При титровании известкованной воды кислотой со стандартными индикаторами обнаруживаются обычно только гидратная и карбонатная щелочности, что вносит определенные противоречия в понимание получаемых результатов.

Содержание взвешенных веществ в известкованной воде при налаженном режиме обработки не превышает обычно 10 мг/дм<sup>3</sup>. Предельно допустимое содержание их не должно быть более 20 мг/дм<sup>3</sup>. В эксплуатационной практике из-за трудоемкости и длительности определения концентрации взвешенных веществ используют косвенный показатель – прозрачность воды.

Малая нестабильность (менее 0,1 ммоль/дм<sup>3</sup>) – обязательное и важное требование к воде обработанной методами осаждения, так как при последующей транспортировке и обработке нестабильной воды происходит образование карбонатных отложений в трубопроводах, на зернах фильтрующей загрузки осветлительных, а иногда и ионообменных фильтров. В таких случаях необходимо использование кислотных промывок и более частая смена фильтрующих материалов.

Эффективность процесса известкования воды зависит от целого ряда факторов, к основным из которых относится правильное дозирование извести удовлетворительного качества, использование в необходимых случаях коагуляции, подогрев воды до строго заданной температуры, использование образовавшегося шлама для углубления процесса обработки, выбор оптимальных режимов движения обрабатываемой воды в осветлителях.

Процесс содоизвесткования как метод умягчения применим к водам практически любого состава в отличие от известкования, при

котором жесткость воды, как указывалось ранее, снижается лишь на значение ее карбонатной составляющей.

Для более глубокого умягчения воды необходимо ввести ионы  $\text{CO}_3^{2-}$ , а для выделения  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  требуется увеличить дозу извести. Это достигается известково-содовой обработкой воды, при которой наряду с известью дозируют также кальцинированную соду  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , которая за счет диссоциации создает в воде избыток ионов  $\text{CO}_3^{2-}$ , способствующих переводу в твердую фазу ионов  $\text{Ca}^{2+}$ .

Исходя из допустимой остаточной щелочности и экономических соображений избыток соды принимают до  $1 \text{ ммоль/дм}^3$  ( $I_{\text{и}} = 0,2-0,35 \text{ ммоль/дм}^3$ ), что обеспечивает снижение общей жесткости в содоизвесткованной воде до  $0,3-0,4 \text{ ммоль/дм}^3$ . Такая глубина умягчения способствовала широкому применению этого метода до начала 30-х годов для получения добавочной воды для котлов электростанций, работающих на низком давлении. Позже этот метод был вытеснен катионообменной технологией умягчения воды. В настоящее время содоизвесткование нашло широкое применение в проектах ВПУ с запрещенным сбросом сточных вод для умягчения регенерационных стоков и их повторного использования.

### 2.3.3. Осветление воды фильтрованием

Даже при хорошо налаженном режиме работы осветлителей не удается получить воду с концентрацией твердой фазы ниже  $10 \text{ мг/дм}^3$ . Такая вода не может быть направлена на дальнейшую очистку и требует дополнительного осветления. В схемах ВПУ это осветление производится при помощи механических фильтров. Фильтрование представляет собой сложный процесс очистки воды от грубодисперсных примесей при течении воды через пористую среду.

Эффективность процесса фильтрования зависит как от физико-химических свойств примесей воды и пористой среды, так и от гидродинамических факторов. В зависимости от соотношения размеров фильтруемых частиц и эффективного диаметра пор удержание частиц может происходить как в объеме слоя (адгезионное фильтрование), так и на его поверхности (пленочное фильтрование).

Если диаметр пор слоя превышает диаметр частиц, последние входят с потоком воды в слой и удерживаются внутри его. Если же диаметр пор меньше диаметра частиц, то они задерживаются на поверхности слоя, образуя пленку. В схемах ВПУ на котельных и ТЭС

чаще применяют адгезионное фильтрование, а в схемах очистки конденсата – пленочное.

#### **2.3.4. Фильтрующие материалы и их характеристики**

Фильтрующие материалы являются основным компонентом многослойных фильтров, фильтров обезжелезивания, угольных фильтров. Они выполняют функции осветления воды, окисления и задержания железа, сорбции органических соединений и свободного хлора.

Для очистки воды от механических примесей в промышленных условиях используются главным образом зернистые «сыпучие» материалы.

Основным требованием, которое предъявляется к таким материалам; является их устойчивость в обрабатываемой воде. Материал не должен загрязнять воду, поскольку любое даже незначительное загрязнение ее обязательно приведет к увеличению стоимости водоочистки. Фильтрующий материал также должен быть дешев и легко доступен.

Применение зернистых материалов для удаления механических примесей при организации многотоннажных производств очищенной воды вызвано особенностью построения их слоя, в котором частицы материала чередуются с пустотами, называемыми обычно порами слоя, соединяясь между собой, поры слоя образуют поровые каналы, по которым протекает очищаемая вода. От формы, размеров и количества таких каналов в единице объема слоя будет зависеть не только гидравлический режим течения воды, но и качество ее очистки.

В качестве фильтрующих материалов на котельных и ТЭС в основном используется кварцевый песок, дробленый антрацит, сульфуголь, катионит КУ-2, целлюлоза, перлит и т.д. В настоящее время предложены и испытаны новые фильтрующие материалы, обладающие повышенной емкостью поглощения и эффективностью очистки воды: керамзит, вулканические шлаки, горелые породы, шунгизит и др. Для очистки воды от ГДП успешно применяют плавающие загрузки из гранул вспененного полистирола, газонаполненных гранул керамзита и др.

Однако из всех упомянутых фильтрующих материалов наибольшее распространение в производстве добавочной воды на ТЭС и АЭС получил антрацит. Он достаточно дешев, а главное химически стоек.

В технологических схемах очистки конденсата используют чаще всего сульфуголь или катионит КУ-2.

Итак, все применяемые фильтрующие материалы должны удовлетворять следующим требованиям: обладать высокой механической прочностью, химической стойкостью, правильно подобранным фракционным составом, по возможности большим коэффициентом формы, так как слой из гладких окатанных зерен фильтрует плохо.

В настоящее время существует достаточно большой ассортимент фильтрующих сред, выпускаемых, как правило, на основе природных материалов. Они характеризуются следующими показателями: размер гранул, плотность гранул, насыпная (объемная) масса, коэффициент однородности зерен, коэффициент формы, механическая прочность, химическая стойкость.

*Кварцевый песок и гравий.* Кварцевый песок используется для удаления взвешенных частиц как один из слоев многослойных фильтров. Гравий правильной сферической формы применяется в качестве поддерживающего слоя и одновременно служит для равномерного распределения потока воды в многослойных, угольных фильтрах, фильтрах обезжелезивания, умягчения. Обладают высокой прочностью и химической стойкостью. Химически инертны, не выделяют растворимых соединений. Используются в бытовых, промышленных и муниципальных фильтрах.

*Гидроантрацит* - каменный уголь, специально подготовленный для фильтрации воды. Изготавливается из качественных низкочольных антрацитов с регламентированными величинами зольности, содержания серы, механической прочности (стираемость, измельчаемость) и химической стойкости. Имеет меньшую плотность, чем у кварцевого песка, поэтому в многослойном фильтре размещается над слоем песка. Однородность гранул по размеру (низкий коэффициент однородности) и их неправильная форма позволяют взвешенным частицам проникать в слой фильтрующего материала на большую глубину. Это приводит к увеличению грязеемкости фильтрующего слоя, продолжительности фильтроцикла, уменьшению сопротивления слоя. Небольшая плотность частиц гидроантрацита позволяет снизить расход воды на обратную промывку. Хорошо задерживает загрязнения слизисто-органического происхождения. Используется, как правило, в многослойных промышленных и муниципальных фильтрах.

*Гарнет* - гранатовый песок, относящийся к классу алмадитов. Служит для удаления взвешенных частиц. Используется в качестве нижнего

поддерживающего слоя. Обеспечивает высокие скорости потока в режиме сервиса. По фильтрующим характеристикам близок к кварцевому песку, но превосходит его по механической прочности, пористости слоя и химической стойкости. Применяется в многослойных фильтрах с высокой производительностью и грязеемкостью.

*Birm* является эффективным и экономичным фильтрующим материалом, служащим для удаления из воды железа и марганца низких и средних концентраций. Действует как катализатор окисления двухвалентного железа в трехвалентное растворенным в воде кислородом. Краснокоричневые хлопья гидроксида железа (3) выпадают в осадок на гранулах фильтрующего материала и удаляются из фильтра обратной промывкой. Обезжелезивание с помощью материала *Birm* возможно в интервале рН от 6,8 до 8,5. При более высоких значениях рН железо находится в трудноудаляемой коллоидной форме. Для эффективной деманганации значение рН должно быть не менее 8,0. Материал не требует применения химических реагентов, регенерация осуществляется обратной промывкой. Используется в напорных и безнапорных фильтрах.

*Активированный уголь* позволяет снизить содержание органических веществ и хлора, удалить запах, цвет, улучшить органолептические свойства воды. Регенерация сводится к периодическим обратным промывкам. Высокой сорбционной ёмкостью и стойкостью к истиранию обладает активированный уголь, изготовленный из скорлупы кокосов. Применяется в бытовых и промышленных фильтрах.

*Manganese Greensand* - фильтрующий материал из минерала глауконита. Служит для удаления железа, марганца и сероводорода. Суммарная концентрация железа и марганца в исходной воде не должна превышать 15 мг/л, сероводорода до 5 мг/л. Железо и марганец окисляются при контакте с высшими оксидами марганца, находящимися на поверхности зерен глауконитового песка. Сероводород окисляется до свободной серы, которая задерживается на поверхности гранул катализатора. Окисленное железо и марганец выпадают в осадок и вместе с серой удаляются обратной

промывкой. Для восстановления окислительной способности катализатора

применяется периодическая или непрерывная схема регенерации. В качестве химического реагента, восстанавливающего окислительную способность катализатора, используется раствор перманганата калия. Материал работает в диапазоне рН от 6,2 до 8,8.

### **2.3.5. Типы осветлительных фильтров. Эксплуатация осветлительного фильтра**

Осветлительные фильтры можно классифицировать по следующим признакам: фракционному составу фильтрующего материала – насыпные и намывные; давлению – открытые и напорные; количеству фильтрующих слоев – однослойные и многослойные; числу параллельно работающих камер – однокамерные и многокамерные; способу фильтрования – однопоточные и двухпоточные. В схемах ВПУ котельных и ТЭС применяются в основном насыпные напорные однопоточные однокамерные фильтры с числом фильтрующих слоев от одного до двух, а также весьма перспективные напорные двухкамерные фильтры. Применение последних позволяет существенно сократить расход металла и площадь, необходимую для установки.

Напорный однопоточный фильтр (рис. 2.4) состоит из цилиндрического корпуса с приваренными к нему сферическими днищами. Внутри фильтра расположены слой фильтрующего материала и дренажно-распределительные устройства, необходимые для равномерного распределения и сбора воды по всей площади поперечного сечения фильтра. Верхнее дренажное устройство чаще всего оформляется в виде отбойного щита, гасящего энергию потока воды, а нижнее расположено на слое кислотоупорного бетона, заливаемого на нижнее днище фильтра, и выполнено в виде трубной системы, состоящей из коллектора с боковыми ответвлениями, снабженными для отвода воды специальными колпачками или щелевыми устройствами. Высота фильтрующего материала, загруженного в фильтр, составляет около одного метра. Часть полости фильтра остается свободной. Это необходимо для выравнивания скорости воды, поступающей на фильтрующий слой, и для возможности расширения слоя при его взрыхлении.

На ВПУ большой производительности для снижения площади, занимаемой механическими фильтрами и экономии металла применяются трех- и двухкамерные фильтры. Камеры в этих фильтрах работают параллельно.



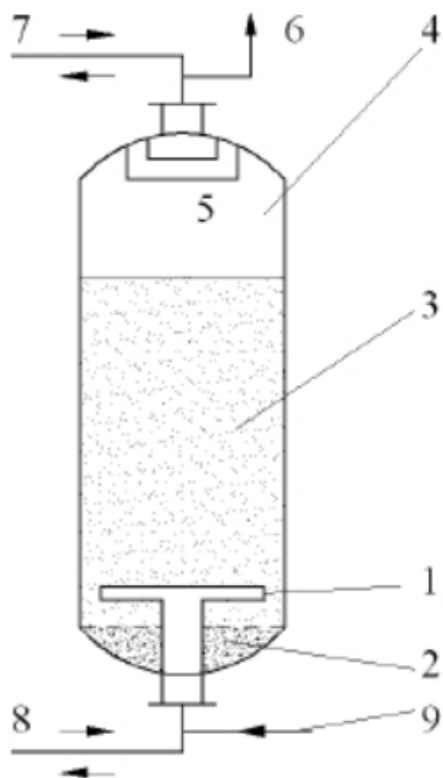


Рис. 2.4. Принципиальная схема вертикального однопоточного механического фильтра:

1 – распределительное устройство; 2 – бетон; 3 – фильтрующий материал; 4 – водяная подушка; 5 – распределительное устройство; 6 – воздушник; 7 – подвод исходной воды и отвод промывочной воды; 8 – выход осветлённой и подвод промывочной воды; 9 – сжатый воздух

Режим эксплуатации механических адгезионных фильтров заключается в обеспечении постоянства расхода воды, своевременном отключении на промывку и промывке. В эксплуатационных условиях фильтр часто отключают по достижении определенного перепада давления (примерно 0,2 МПа). Промывку фильтра от удержанной примеси ведут в течение 20 мин в направлении противоположном направлению воды. При промывке слой расширяется на 30–50 % и вследствие трения зерен между собой освобождается от удержанной примеси, которая с потоком воды выбрасывается из фильтра. В настоящее время промывочную воду направляют в осветлители.

Для интенсификации процесса промывки под слой подают сжатый воздух, что одновременно позволяет ускорять процесс промывки и сокращать расход промывочной воды.

Промывку механических фильтров проводят осветленной водой, поэтому емкость баков осветленной воды должна учитывать кроме часового запаса также и объем воды, необходимой для промывки одного фильтра.

При расчете фильтрованной части предочистки следует иметь в виду, что на ВПУ с осветлителями количество устанавливаемых ме-

ханических фильтров выбирается из расчета скорости фильтрования 10 м/ч, а при прямоточной коагуляции – 5 м/ч. При этом необходимо предусматривать установку не менее трех фильтров (два в работе, один в регенерации), а также еще одного фильтра для перезагрузки фильтрующего материала при ремонте или осмотрах основных фильтров.

#### 2.4. Обессоливание воды

За последние годы происходит постепенное возрастание концентрации минеральных веществ во всех реках, протекающих через промышленные и плотно населенные области. В некоторых небольших реках из-за промышленной и хозяйственной деятельности человека солесодержание повысилось настолько, что воду этих рек в настоящее время следует считать солоноватой, а не пресной. Основными причинами постепенного повышения солесодержания рек является сброс в них высокоминерализованных шахтных и промышленных вод, а также сброс дренажных вод орошаемых земель. Вследствие этого задача обессоливания воды, в частности применяемой для целей тепловой и атомной энергетики, приобретает исключительно важное значение.

В настоящее время разработаны и используются способы частичного или полного обессоливания. Их можно классифицировать следующим образом: способы, основанные на изменении фазового состава воды (дистилляция, гелиоопреснение, вымораживание); мембранные (электродиализ, обратный осмос) и хемосорбционные способы (ионитное обессоливание). На электростанциях наибольшее применение нашли ионитное обессоливание и дистилляция. Мембранные способы используются лишь для частичного уменьшения минерального состава воды, так как получение этими способами глубокообессоленной воды, пригодной для питания современных котлов, до последнего времени считалось неэкономичным.

Итак, необходимо рассмотреть три метода обессоливания воды:

- ионитный;
- термический (дистилляция);
- мембранный (электродиализ, обратный осмос).

### 2.4.1. Физико-химические основы ионного обмена

Вода, прошедшая предочистку, практически не содержит в себе грубодисперсных примесей и в значительной степени освобождена от коллоидных. Однако основная часть примесей в истинно-растворенном состоянии остается в этой воде и должна быть удалена из нее. В настоящее время для этого применяют ионный обмен, а также мембранные и термический методы. Последний метод для получения воды необходимого качества чаще всего используют в комплексе с ионным обменом.

Сущность ионного обмена заключается в использовании способности некоторых специальных материалов (ионитов) изменять в желаемом направлении ионный состав примесей воды. Процесс ионного обмена существенно отличается от процесса адсорбции тем, что если при адсорбции

происходит лишь накопление вещества, сорбируемого из раствора на поверхности какого-либо материала, то при ионном обмене сорбция из раствора ионов одного вида обязательно сопровождается переходом ранее сорбированных ионов другого вида в раствор. Таким образом, при ионном обмене ионы одного вида заменяются ионами другого вида.

Способность ионитов к ионному обмену объясняется их строением.

Любой ионит состоит из твердой основы (матрицы), на которую тем или иным способом нанесены специальные функциональные группы, способные при помещении ионита в раствор к образованию на поверхности ионита потенциалообразующих ионов, т.е. к возникновению заряда. Вследствие этого вокруг твердой фазы создается диффузный слой из противоположно заряженных ионов (противоионов). Появление потенциалообразующих ионов может происходить либо за счет адсорбции функциональными группами ионита из раствора ионов какого-либо знака заряда (например,  $-\text{NH}_3+\text{H}^+ \rightarrow \text{NH}_4^+$ ), либо диссоциации функциональных групп под действием молекул воды (например,  $-\text{SO}_3\text{H} \rightarrow \text{SO}_3^-+\text{H}^+$ ). В последнем случае противоионами, образующими диффузный слой, являются ионы, переходящие в раствор в процессе диссоциации. Ионы диффузного слоя обладают повышенным запасом кинетической энергии и могут выходить из диффузного слоя в раствор, но при этом из раствора в диффузный слой должны переходить ионы того же знака заряда. Таким образом, ионит можно представить как твердый электролит, не-

подвижная часть которого представляет одну его часть, а подвижные противоположные ионы – другую (рис. 2.5).

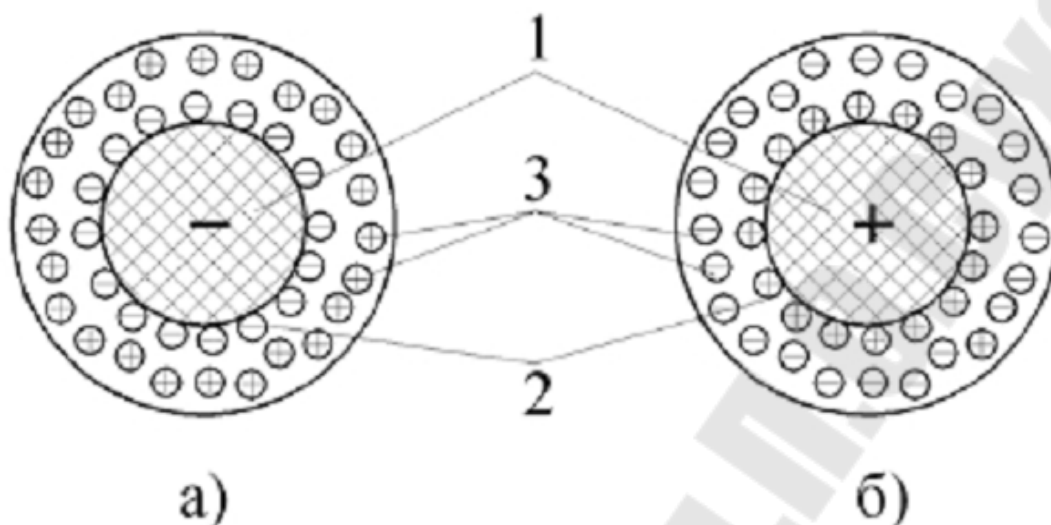


Рис. 2.5. Схема структуры зерна ионита:

а – катионит; б – анионит; 1 – матрица (твёрдый многоатомный каркас ионита); 2 – потенциалообразующие ионы (связанные с каркасом не подвижные ионы активных групп); 3 – ионы диффузорного слоя (ограниченно подвижные ионы активных групп, способные к обмену)

#### 2.4.2. Ионообменные материалы и их характеристики

Все известные ионообменные материалы по химическому составу можно разделить на две группы: минеральные и органические. Минеральные иониты практически не применяются на ТЭС из-за малой емкости поглощения и способности к разложению в кислой среде с выделением кремниевой кислоты.

В настоящее время на ТЭС в основном находят применение лишь специально синтезированные иониты органического происхождения. При синтезе ионитов необходимо создать матрицу и ввести в нее функциональные группы. Имеется несколько путей для этого, но в основном это осуществляется введением функциональных групп в молекулы какого-либо имеющегося нерастворимого в воде органического вещества или получением практически нерастворимого вещества с последующим введением в его молекулу функциональных групп. По первому пути синтеза получают различные марки сульфогуглей. Для этого фракционированный уголь (бурый, антрацит) обрабатывают серной кислотой. При этом происходят процессы гумифи-

кации с образованием карбоксильных групп и сульфирования с образованием сульфогрупп.

Но основное направление синтеза состоит в получении ионитов на основе искусственных смол. Матрица такого ионита представляет собой пространственную сетчатую структуру из углеводородных цепей, которая может быть получена поликонденсацией или полимеризацией. В последние годы все чаще используют полимеризационные смолы, полученные на основе стирола.

Функциональные группы, которые придают материалу смолы ионообменные свойства, присоединяются к бензольным ядрам, заменяя в них атомы водорода. Группы, придающие ионитам свойства катионитов:  $-\text{SO}_3\text{H}$  (сульфогруппа),  $-\text{COOH}$  (карбоксильная) и  $-\text{OH}$  (фенольная). При контакте с водой функциональные группы катионитов диссоциируют с отщеплением ионов водорода, которые образуют диффузный слой. Монофункциональные катиониты, содержащие сульфогруппы, являются сильнокислотными, а содержащие карбоксильные группы – слабокислотными. Имеются также полифункциональные катиониты, содержащие обе группы (например, сульфуголь). Характер группы существенно влияет на обменную емкость катионита в зависимости от pH. Сильнокислотные катиониты осуществляют обмен ионов в широкой области значений pH, тогда как слабокислотные в кислой области резко уменьшают способность ионов к обмену (уменьшается степень диссоциации функциональных групп).

Функциональными группами, придающими материалу смолы анионообменные свойства, являются различные аминогруппы ( $\equiv \text{N}$ ,  $=\text{NH}$ ,  $-\text{NH}_2$ ) и группы четырехзамещенного аммония ( $-\text{NR}_3\text{OH}$ ). При присоединении первых трех групп образуются слабоосновные аниониты, а группа  $-\text{NR}_3\text{OH}$  придает аниониту сильноосновный характер. Аминогруппы сорбируют ионы водорода с образованием комплексов  $-\text{NH}_3^+ = \text{NH}_2^+$  (потенциалообразующих ионов) и последующим образованием диффузного слоя. Группа  $-\text{NR}_3\text{OH}$  диссоциирует с переходом иона  $\text{OH}^-$  в диффузный слой. Слабоосновные аниониты успешно осуществляют ионный обмен лишь в кислых средах, тогда как у высокоосновных обмен анионов происходит в широкой области значений pH.

Качество ионитов определяется рядом физико-химических и технологических свойств, важнейшими из которых являются фракционный состав, насыпная плотность, химическая стойкость, механическая прочность, обменная емкость, кислотность или основность.

В технологии ионного обмена применяются иониты с диаметром зерен 0,3-2 мм. Коэффициент неоднородности засыпаемой в фильтр фракции ионита не должен превышать 2 аналогично условиям засыпки механических фильтров. Во влажном состоянии иониты набухают и увеличивают свой объем, что следует учитывать при заполнении фильтров. Степень набухания определяется коэффициентом КН, значение которого зависит от материала ионита, ионной формы, рН и других факторов и составляет 1,05-2.

При эксплуатации иониты подвергаются механическим нагрузкам (сдавливанию, трению), поэтому они частично истираются, повышается концентрация мелких частиц и, как следствие этого, возрастает гидравлическое сопротивление фильтрующего слоя. Поэтому к ионитам предъявляется требование достаточной *механической прочности*, которое задается через коэффициент истираемости, определяемый как потеря массы в процентах за год. Механически прочные иониты должны иметь коэффициент истираемости не более 0,5 %/год.

*Химическая стойкость* ионитов выражается в их способности противостоять растворяющему действию воды и ее примесей. Под действием среды может также происходить пептизация ионитов, т. е. переход их в коллоидный раствор. Химическая стойкость ионитов зависит от рН среды, природы и концентрации растворенных в ней ионов и, что особенно важно, от температуры, с повышением которой стойкость снижается. Это обстоятельство является основным препятствием, не позволяющим повышать температуру на ионообменных фильтрах свыше 313 К.

*Обменная емкость* является важнейшей технологической характеристикой ионитов. Она выражается количеством ионов, поглощенных единицей массы (моль/дм<sup>3</sup>) или единицей объема (моль/дм<sup>3</sup>) ионита. Различают *полную обменную емкость*, *емкость «до проскока»* и *рабочую*. Обменная емкость, определенная в момент выравнивания концентрации поглощаемого иона в воде и фильтрате, называется полной. Если фильтрование заканчивается в момент проскока поглощаемого иона (концентрация его в фильтрате близка к нулевой), то обменная емкость ионита определяется как емкость «до проскока». Однако в эксплуатации фильтрование часто прекращается в момент, когда концентрация определенного поглощаемого иона в фильтрате составляет некоторое (весьма малое) значение.

В этом случае обменная емкость ионита определяется как рабочая, которая чаще всего настолько мало отличается от емкости «до

проскока», что их можно принимать равными друг другу. Обменная емкость зависит от многих факторов, в том числе от условий регенерации, ионной формы, природы поглощаемых ионов, значения рН воды, скорости потока воды, геометрических характеристик слоя.

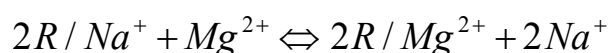
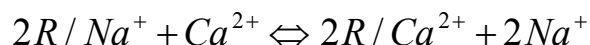
Процесс ионного обмена имеет циклический характер. По истощении ионита требуется восстановление его обменной способности – регенерация, при которой используется обратимость процесса обмена ионов.

Для этого через истощенный слой ионита пропускается регенерационный раствор, содержащий первоначальные обменные ионы.

### 2.4.3. Технология ионного обмена

В технологии водоподготовки для удаления определенных ионов из воды применяют два процесса: катионирование – удаление катионов и анионирование – удаление анионов. В зависимости от обменного иона процессы и аппараты получают названия: Н-катионирование, Н-катионный фильтр; ОН-анионирование, ОН-анионный фильтр и т.п. Соответственно называется и фильтрат, полученный в этих процессах: Н-катионированная вода; ОН-анионированная вода и т.п. Процессы катионирования воды могут иметь вполне самостоятельное значение (для умягчения воды), в то время как процессы анионирования применяются лишь в комплексе с катионированием (в схемах обессоливания воды). Процессы ионирования осуществляют в различных аппаратах, но наибольшее распространение получили насыпные ионитные фильтры.

Na-катионирование. Этот процесс применяется для умягчения воды и имеет самостоятельное значение при подготовке воды малой щелочности для котлов низкого давления и подпитки воды теплосетей. При Na-катионировании воду пропускают через слой катионита, находящегося в исходном состоянии в Na-форме. При этом процессе происходит удаление из воды ионов  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  в обмен на эквивалентное количество ионов  $Na^+$ , согласно следующим реакциям:



где  $R$  – комплекс матрицы и функциональной группы без обменного иона (его принято считать одновалентным). Из приведенных реакций видно, что анионный состав воды при Na-катионировании остается

постоянным, поэтому и суммарная концентрация катионов, участвующих в этом процессе, также остается постоянной.

Однако массовая концентрация катионов в растворе несколько возрастает, поскольку эквивалентная масса иона натрия выше эквивалентных масс ионов кальция и магния. Так, при обмене ионов  $\text{Ca}^{2+}$  на ионы  $\text{Na}^+$  солесодержание воды возрастает в 46/40 раз, поскольку вместо одного сорбированного иона  $\text{Ca}^{2+}$  в раствор поступают два иона  $\text{Na}^+$ . Тот же пересчет при сорбции ионов магния даст увеличение солесодержания в 46/24 раза.

Таким образом, солесодержание Na-катионированной воды несколько выше солесодержания исходной. Поскольку при Na-катионировании не происходит изменения анионного состава примесей воды, щелочность ее не изменяется. Остаточная жесткость фильтрата определяется условиями регенерации катионита и в лучшем случае составляет не более 5 мкмоль/дм<sup>3</sup>.

Регенерация истощенного катионита производится пропуском через него раствора поваренной соли.



## ТЕМА 3. НАГНЕТАТЕЛИ И ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

### 3.1. Общие понятия. Классификация и параметры работы нагнетателей

**Нагнетатели** - это машины для создания потока жидкости и газа. Без нагнетателей самого разного типа и назначения невозможна работа ни одного объекта промтеплотехники и теплоэнергетики. Воздух для сжигания топлива подается в топку печи или котла вентилятором. Пылеугольное топливо подается в горелку мельничным вентилятором. Мазут подается к форсунке насосом. Газ к горелке поступает под действием давления, которое создается газовым компрессором или газодувкой. Продукты сгорания удаляются из котла или промышленной печи дымососом. Паровые котлы ТЭС, ТЭЦ, районных котельных обслуживаются насосами: сырой водой, питательным, рециркуляционным, конденсатным, подпиточным, сетевой воды. Все движение горячей воды в системах теплоснабжения также обеспечивается насосами. Насосы используются в системах смазки, регулирования и других вспомогательных и обслуживающих системах (золоудаление, очистка дымовых газов, и т. д.). Нагнетатели для перемещения капельных жидкостей называются *насосами*. Нагнетатели для подачи газовых сред в зависимости от развиваемого давления разделяют на вентиляторы, газодувки и компрессоры.

**Вентиляторы** - машины, создающие степень повышения давления  $\varepsilon = p_k/p_H < 1,15$  ( $p_H$  - абсолютное давление на входе,  $p_k$  - давление на выходе из машины).

**Газодувки** - машины, работающие при  $1,15 < \varepsilon < 3,0$  без искусственного охлаждения.

**Компрессоры** - машины, создающие давление газа  $\varepsilon > 3,0$  и имеющие искусственное охлаждение полостей машины, а также межступенчатое охлаждение сжатого газа.

**Классификация нагнетателей.** По энергетическому и конструктивному признакам нагнетатели разделяют на классы: лопастные, объемные, струйные, пневматические.

**Лопастные нагнетатели** - это машины, в которых основным элементом является лопасть. К этому классу относятся:

- *центробежные* (насосы, вентиляторы, компрессоры), наиболее распространены в технике. Они компактны, дают высокую производительность, развивают высокое давление и обеспечивают непрерывную подачу жидкости (газа). Жидкость засасывается через всасывающий патрубок (рис. 3.1), поворачивает на 90, попадает в рабочее колесо, вращаемое каким-либо двигателем, подхватывается рабочими лопастями, центробежными силами отбрасывается в спиральный кожух и через напорный патрубок подается в сеть (потребителю);

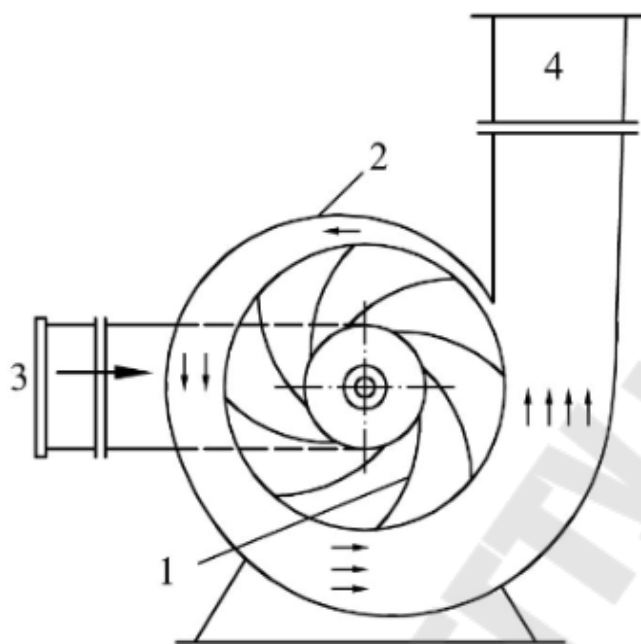


Рис. 3.1. Схема устройства центробежного нагнетателя:  
1 – лопасти; 2 – кожух; 3 – всасывающий патрубок; 4 – напорный патрубок

· *осевые* нагнетатели развивают высокую производительность при низком напоре. Жидкость или газ не изменяют направление. Лопасти специальной конструкции пропеллерного типа крепятся к втулке под некоторым углом (рис. 3.2), захватывают жидкость, сообщают ей энергию и подают в напорный патрубок. Подача жидкости (газа) происходит непрерывно. Осевые нагнетатели широко распространены в теплотехнике, особенно многоступенчатые компрессоры и насосы.

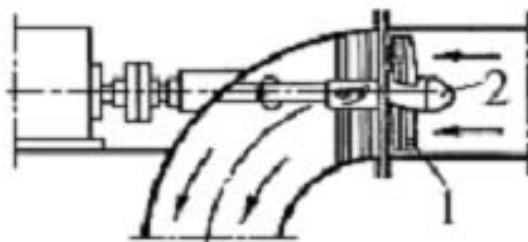


Рис. 3.2. Схема осевого нагнетателя:  
1 – лопасти; 2 – втулка

**Объемные нагнетатели** – это машины, работа которых состоит из всасывания жидкости (газа) и вытеснения ее твердыми элементами (поршнями, пластинами, зубьями). К ним относятся: поршневые, роторные, шестеренчатые и др. Принцип действия некоторых из них:

- **поршневой** нагнетатель имеет корпус (цилиндр), в котором перемещается поршень, совершающий возвратно-поступательное движение (рис.3.3). Через всасывающий клапан жидкость (газ) поступает при движении поршня назад, через нагнетающий (напорный) клапан жидкость подается в сеть. Клапаны работают поочередно и открываются автоматически. Недостатком поршневых машин является периодичность подачи вследствие цикличности работы (всасывание - нагнетание). Для получения постоянной подачи используют многоцилиндровые нагнетатели, цилиндры которых работают со сдвигом по фазе. В поршневых компрессорных установках для обеспечения постоянства подачи используют также ресиверы (промежуточные емкости), в которых происходит выравнивание давления газа перед подачей в сеть;

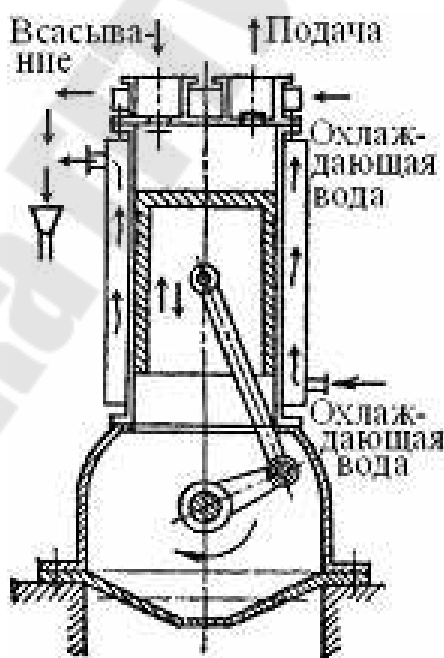


Рис. 3.3. Конструктивная схема поршневого нагнетателя

- **роторный** пластинчатый насос имеет массивный ротор (рис.3.4), расположенный эксцентрично по отношению к статору (корпусу). В прорези ротора вставлены пластины, отжимаемые к

периферии центробежными силами. Жидкость всасывается через входной патрубок, перемещается пластинами и вытесняется в напорный патрубок.

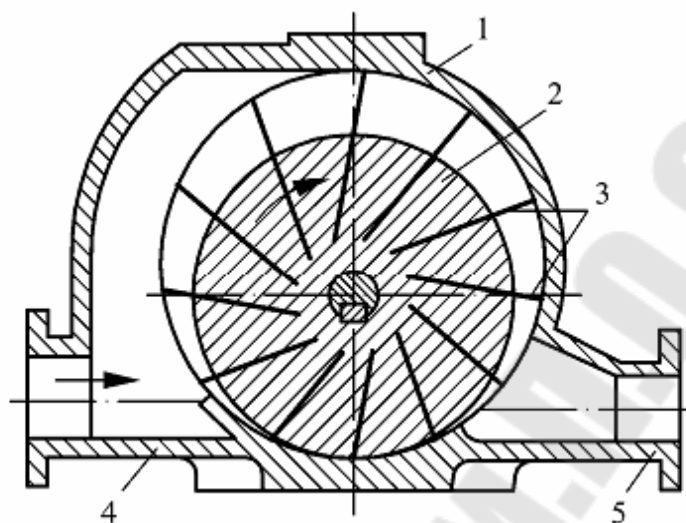


Рис. 3.4. Конструктивная схема роторного компрессора:  
1 – корпус; 2 – ротор; 3 – пластины; 4 – всасывающий патрубок; 5 – подающий патрубок

**Струйные нагнетатели, эрлифты, гидравлические тараны, пневматические подъемники не имеют привода и какихлибо движущихся частей:**

· **в струйном нагнетателе**, например, поток рабочей жидкости с большей кинетической энергией выходит из сопла (рис.3.5), создает разрежение, всасывает жидкость из нижнего резервуара, переходит в расширяющийся патрубок и подает жидкость на высоту  $H$ . Разновидностью струйных нагнетателей являются эжекторы и инжекторы;

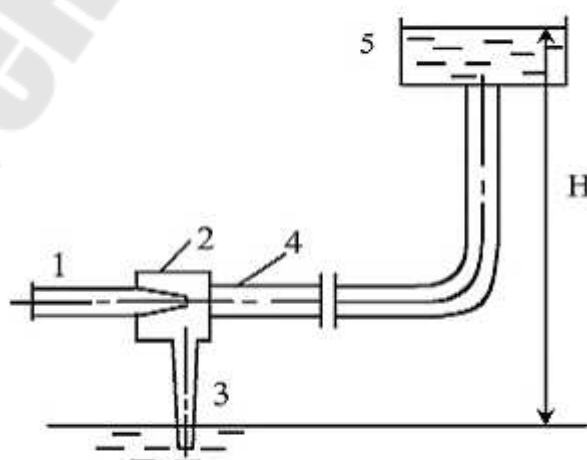


Рис. 3.5 – Схема насоса струйного типа:

1 – сопла; 2 – камера; 3 – нижний уровень; 4 – расширяющийся патрубкок; 5 – верхний уровень

· подъемники типа “эрлифт” или “газлифт” применяют, например, для подъема жидкости с большой глубины (вода, нефть). В обсадную трубу (рис. 3.6) помещена подъемная труба, в нижний конец которой подводится воздух из компрессора; смешиваясь с водой, воздух образует смесь с меньшей плотностью, чем жидкость. За счет разности плотностей ( $\rho_{см} - \rho_{ж}$ ) возникает сила, поднимающая жидкость на высоту  $H$ ; над подъемной трубой располагается отбойник, отделяющий воздух от жидкости сливающейся в резервуар, из которого откачивается потребителю;

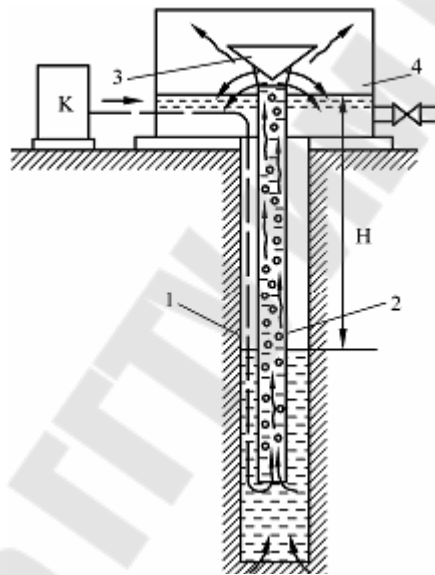


Рис. 3.6. Схема эрлифта:

1 – обсадная труба; 2 – подъемная труба; 3 – конус-отбойник; 4 – камера; К – компрессор

· работа водоподъемного устройства **гидравлический таран** (Г.Т.) основана на принципе гидравлического удара (рис. 3.7). В период запуска вручную открывают клапан 4, через который из резервуара 7 по трубе 6 создается поток воды расходом  $Q$ . Быстрое закрытие клапана 4 вызывает гидравлический удар, т. е. повышение давления до величины “ $p$ ”, при которой открывается клапан 5, через который часть воды с расходом  $q < Q$  поступает в напорный колпак 3 и затем по трубе 2 поступает в верхний бак, преодолев напор  $H$ . Сжатый воздух, находящийся в колпаке 3, выравнивает подачу “ $q$ ”. Когда давление падает до определенного уровня клапан 5 закрывает-

ся, а клапан 4 открывается, что обеспечивает автоматическое повторение цикла. Г.Т. применяют там, где имеется запас воды в резервуаре 7, значительно превышающий потребное количество;

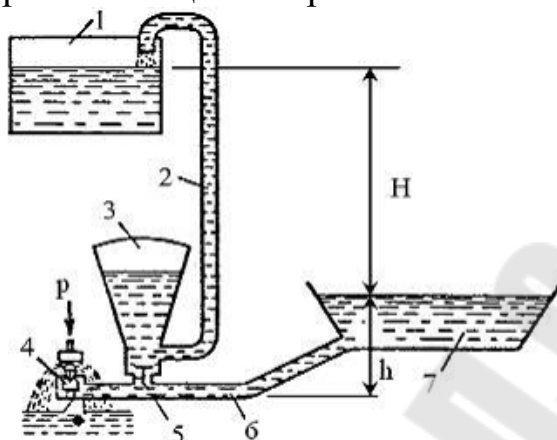


Рис. 3.7. Схема гидравлического тарана:

1 – верхний бак; 2, 6 – трубопроводы; 3 – напорный колпак; 4, 5 – клапаны; 7 – резервуар;  $p$  – усилие, необходимое для открытия клапана;  $h$  – высота падения воды;  $H$  – высота подъема воды

· схема **пневматического подъемника** показана на рис. 3.8. При отключенном компрессоре и открытых клапанах а и б баллон 3 заполняется из резервуара 1. При закрытии клапанов «а» и «б» и включении компрессора жидкость вытесняется через открытый клапан «в» из баллона 3 в бак 2, преодолев высоту  $H$ . Подача осуществляется периодически.

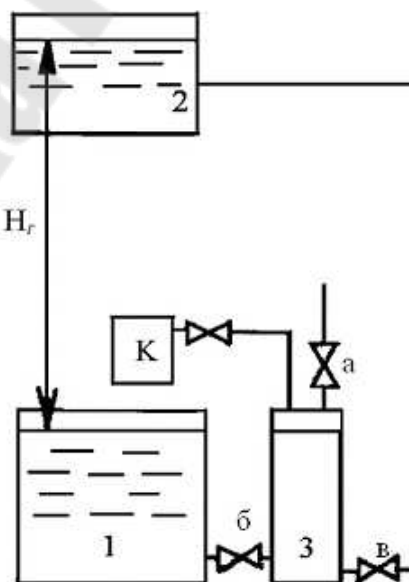


Рис. 3.8. Схема пневматического подъемника для жидкостей:  
1 – резервуар; 2 – верхний бак; 3 – баллон

Нагнетатели без привода имеют низкий коэффициент полезного действия (КПД).

Работа нагнетателей характеризуется следующими параметрами:

- *подача, или производительность* – это количество жидкости, подаваемое нагнетателем за единицу времени. Различают массовую ( $M$ ) и объемную ( $Q$ ) подачу.

- *полное давление*, развиваемое нагнетателем, определяют из уравнения Д. Бернулли по следующей зависимости:

$$p = (p_k^{cm} - p_n^{cm}) + \left( \frac{c_k^2 - c_n^2}{2} \rho \right) + \rho g(Z_k - Z_n), \text{ Па}, \quad (3.1)$$

где  $p_k^{cm}$ ,  $p_n^{cm}$  – статические давления на выходе из нагнетателя (начальное) и на входе в нагнетатель (конечное), Па;

$c_n$ ,  $c_k$  – средние скорости среды, подаваемой насосом, на входе и выходе, м/с. Второе слагаемое представляет собой разность динамических давлений;

$Z_n$ ,  $Z_k$  – высота расположения центров входного и выходного отверстия нагнетателя, м.

- *напор  $H$* , создаваемый нагнетателем;
- *удельная полезная работа*;
- *полезная мощность нагнетателя* – это работа, сообщаемая машиной в секунду подаваемой среде.

## 3.2. Центробежные нагнетатели

### 3.2.1. Теоретические основы. Уравнение Эйлера

Основным элементом центробежной машины является рабочее колесо (рис. 3.9). Оно состоит из двух фасонных дисков и нескольких, обычно кривых, лопастей 3. Диск 1 – задний, ведущий, или основной, жестко крепится на валу 6 и, как правило, составляют единое целое со ступицей 7. Диск 2 – передний, ведомый, покрывающий соединяется с задним с помощью лопастей 3. Жидкость или газ поступает через входную полость 5, поворачивает на  $90^\circ$ , входит в межлопастные каналы, вращается вокруг оси О-О рабочего колеса, под влиянием центробежных сил перемещается к периферии колеса и выбрасывается в канал 4, как правило, спиральный. В некоторых устройствах отвод и подвод выполняется в виде специальных направ-

ляющих лопаточных устройств. Работа центробежных сил на пути от входа в межлопатные каналы до выхода из них приводит к увеличению энергии потока.

По форме лопастей (лопаток) различают рабочие колеса с лопатками, загнутыми назад, с радиальным выходом, и с лопатками, загнутыми вперед.

*Параллелограмм скоростей.* Жидкость, движущаяся вдоль лопасти с относительной скоростью “ $w$ ”, одновременно вращается с окружной скоростью “ $u$ ”. Абсолютная скорость “ $c$ ” является геометрической суммой скоростей “ $w$ ” и “ $u$ ”, т.е. диагональю параллелограмма. Все эти скорости на входе в межлопатный канал имеют индекс “1”, на выходе - “2”. На рис. 2.1 параллелограммы скоростей построены для осевой линии межлопатного канала.

Угол между векторами окружной и абсолютной скоростей обозначен “ $\alpha$ ”, угол между вектором относительной скорости и отрицательным направлением окружной скорости обозначен “ $\beta$ ”. Непосредственно на лопатке угол “ $\beta_{л}$ ” отличается от угла “ $\beta$ ” на входе на угол атаки “ $i$ ”, на выходе – на угол отставания “ $\delta$ ”. Угол “ $\alpha$ ” является режимным, т.е. изменяющимся в зависимости от режима работы нагнетателя; угол  $\beta$  – конструктивный, неизменный для данного нагнетателя. Проекция абсолютной скорости на окружную обозначена “ $c_u$ ”. Эта составляющая скорости представляет собой скорость закручивания потока. Проекция  $c_r$  представляет собой радиальную (или меридиональную) составляющую абсолютной скорости.

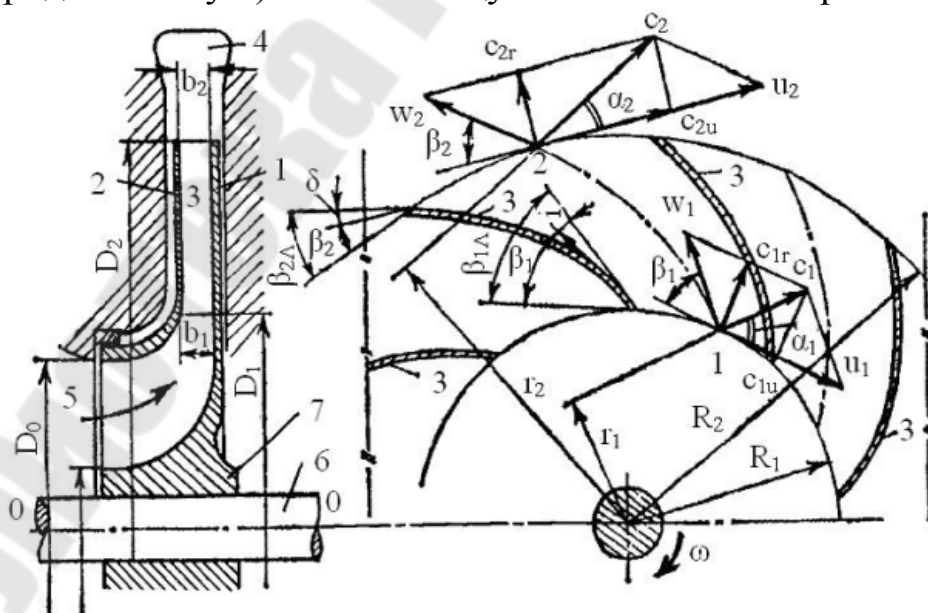


Рис. 3.9. Разрезы колеса центробежной машины. Параллелограммы скоростей на входе и выходе межлопатных каналов



### 3.2.2 Характеристики центробежных нагнетателей

Характеристикой центробежного нагнетателя называют зависимости, изображенные на графике:

$$\begin{aligned}H &= f(Q), \\p &= f(Q), \\N &= f(Q), \\ \eta &= f(Q), \\H_{ст} &= f(Q).\end{aligned}$$

Теоретические характеристики не учитывают потери напора в проточной полости нагнетателя, которые увеличиваются пропорционально квадрату увеличения подачи. Кроме того, чем выше подача, тем больше удар жидкости о входные кромки лопастей и интенсивнее вихреобразование. В результате действительно напор отличается от теоретического на величину потерь  $\Delta H$ . Действительные характеристики получают опытным путем с помощью регулирующего органа (дресселя) на выходном патрубке нагнетателя.

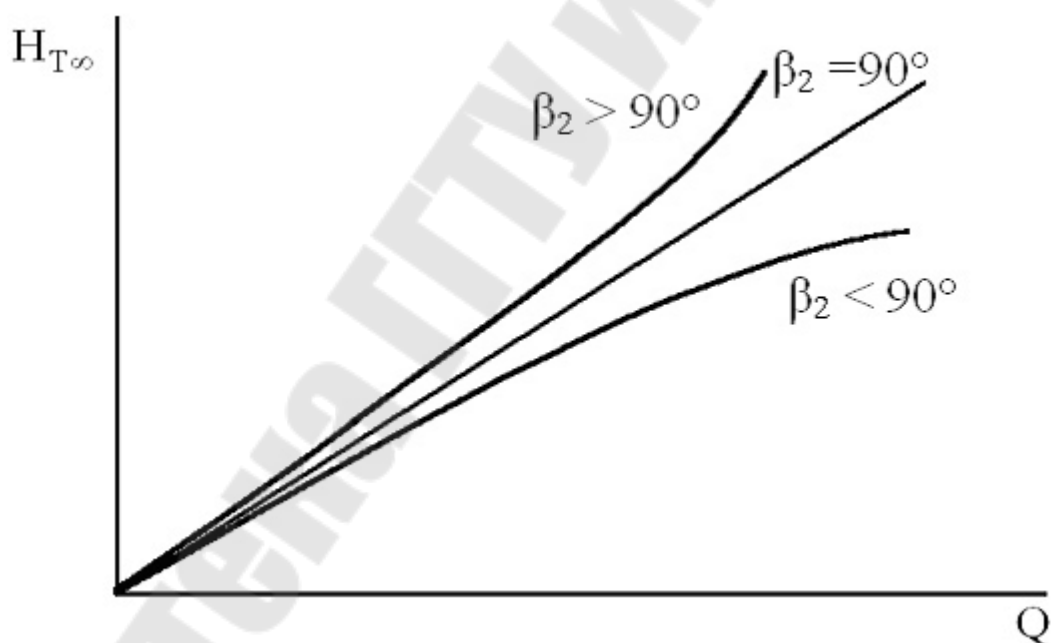


Рис. 3.10. Теоретическая зависимость мощности от подачи при разном направлении лопаток

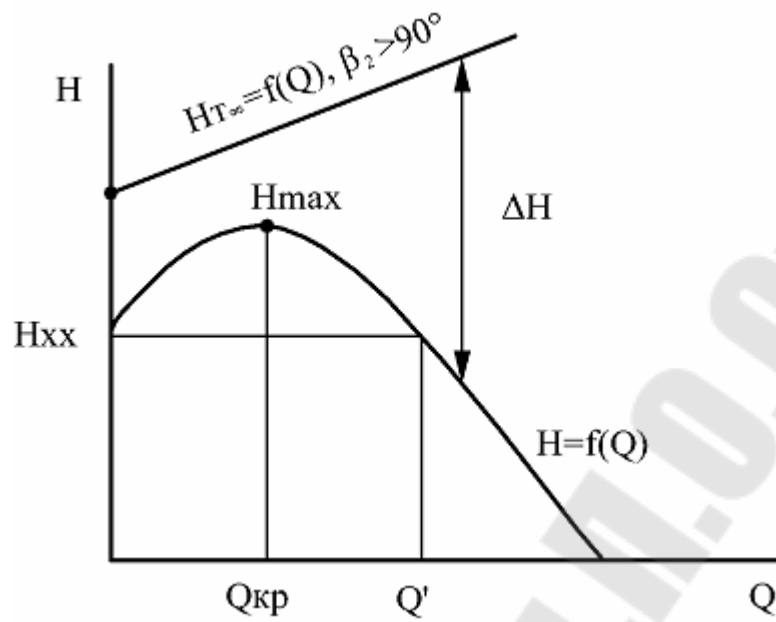


Рис. 3.11. Теоретическая и действительная характеристики,  $\beta_2 > 90^\circ$

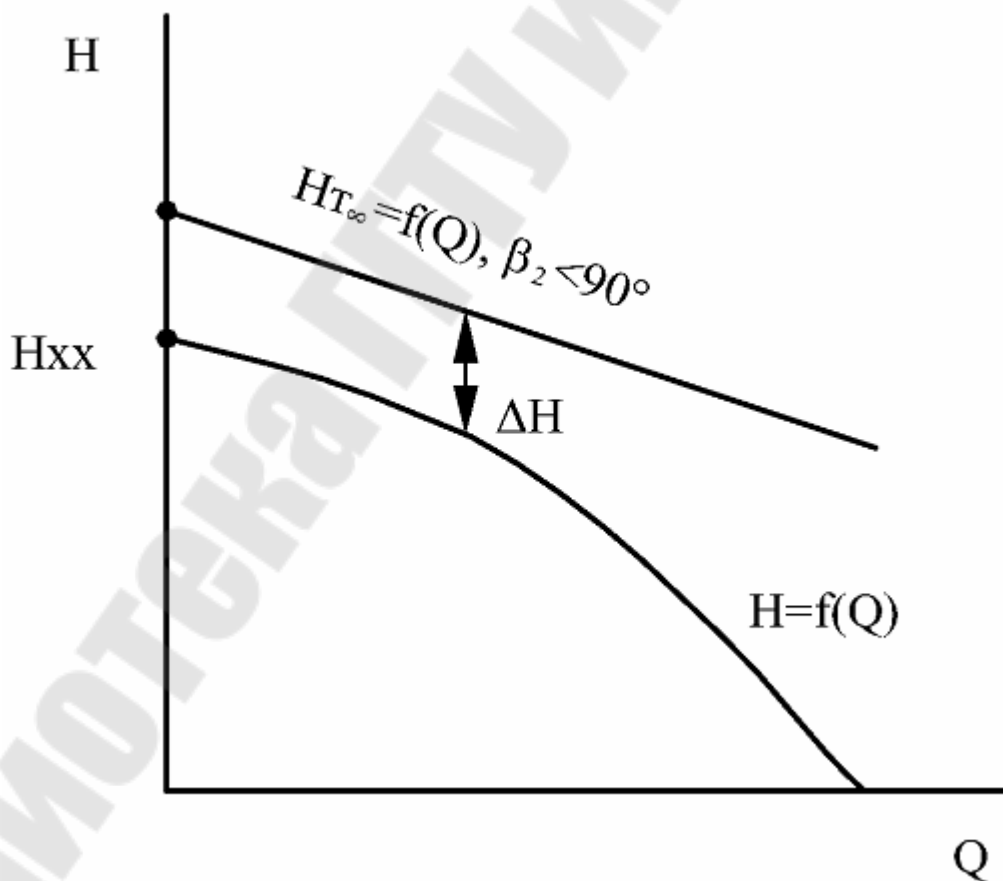


Рис. 3.12. Теоретическая и действительная характеристика,  $\beta_2 < 90^\circ$

Характеристика  $H = f(Q)$  для машин с  $\beta_2 > 90^\circ$  (лопатки загнуты “вперед”) имеют максимум при  $Q = Q_{кр}$ . Зона характеристики от  $Q = 0$  до  $Q = Q_{кр}$  неустойчива, т.е. в этом диапазоне подач напор и подача могут самопроизвольно изменяться (режим помпажа). Поэтому нормально нагнетатель работает только на нисходящей ветви, т.е. при  $Q > Q_{кр}$ .

Выбор нагнетателя производится по характеристикам, которые входят в состав паспорта машины. Например, характеристика вентилятора высокого давления ВВД включает сведения о зависимости давления от числа оборотов машины, а также сведения о КПД.

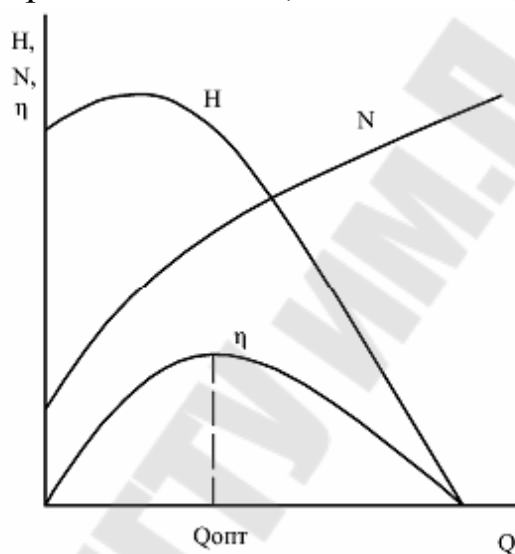


Рис. 3.13. Действительные характеристики центробежного нагнетателя  $H = f(Q)$ ,  $N = f(Q)$ ,  $\eta = f(Q)$

### 3.2.3. Работа нагнетателя на сеть. Последовательное и параллельное соединение нагнетателей

Всякий нагнетатель, создавая поток жидкости (газа), затрачивает на его перемещение энергию, равную величине потерь давления на преодоление сопротивления сети. Как правило, движение в сети развитое турбулентное, поэтому потери пропорциональны квадрату скорости, а, следовательно, и квадрату расхода жидкости.

Для получения реальной характеристики сети следует проводить экспериментальные исследования. При принятии проектных решений следует выполнять особо тщательно гидравлический расчет характеристики сети с учетом зависимости коэффициента трения  $\lambda$  и коэффициентов местного сопротивления  $K_{см}$  от числа Рейнольдса.

Нагнетатель, работая на конкретную сеть, будет развивать параметры  $Q_1$  и  $H_1$  в точке пересечения характеристики  $H = f(Q)$ , нагнетателя и сети  $H_{\text{сеть}} = f(Q)$  (точка А). Все остальные параметры – мощность и КПД –  $(N_1, \eta_1)$  – будут определяться пересечением абсциссы  $Q_1$  (рис. 3.14) с соответствующими характеристиками нагнетателя.

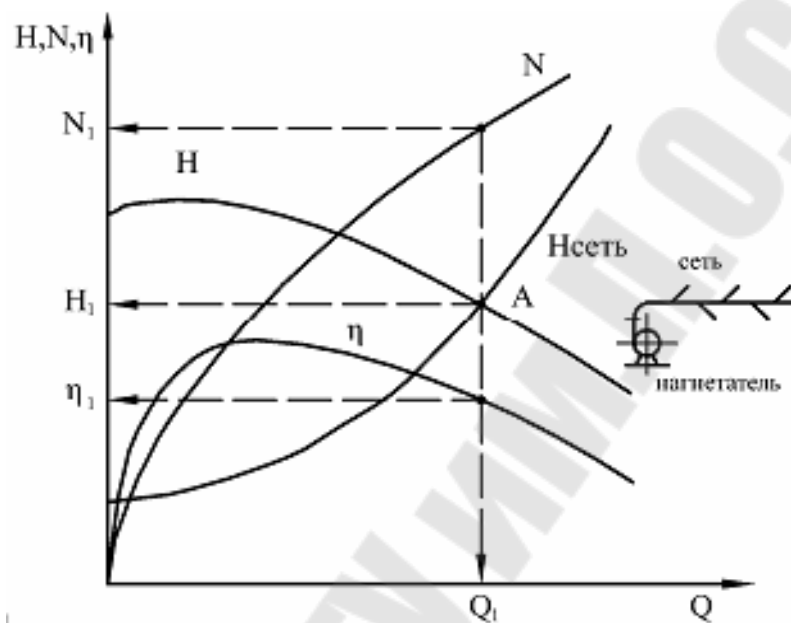


Рис. 3.14. Работа нагнетателя на сеть

Последовательное или параллельное соединение двух или нескольких нагнетателей используют для обеспечения высокой экономичности эксплуатации установок, причем учитываются следующие обстоятельства:

- в производственных условиях бывают случаи, когда тепловая нагрузка объекта или выработка электроэнергии изменяются по каким-либо причинам, например, в зависимости от времени суток или года; соответственно изменяются производительность нагнетателей;
- при регулировании нагнетателей для снижения производительности, как правило, снижается КПД (уход от оптимального режима);
- для обеспечения надежности работы систем устанавливают резервные нагнетатели, причем, чем мощнее нагнетатель, тем выше его стоимость.

При последовательном включении двух нагнетателей жидкость (газ) проходит сначала через первый, а затем через второй

нагнетатель, после чего жидкость поступает в сеть. При параллельном включении жидкость проходит отдельно через каждый нагнетатель и подается в сеть (рис. 3.15).

При последовательном включении преследуется цель увеличения производительности (подачи), при параллельном – давления (напора). Из этого не следует, что при включении, например, двух нагнетателей параметры  $Q$  и  $H$  удваиваются. Изменение параметров определяется характеристиками спаренных нагнетателей и сети.

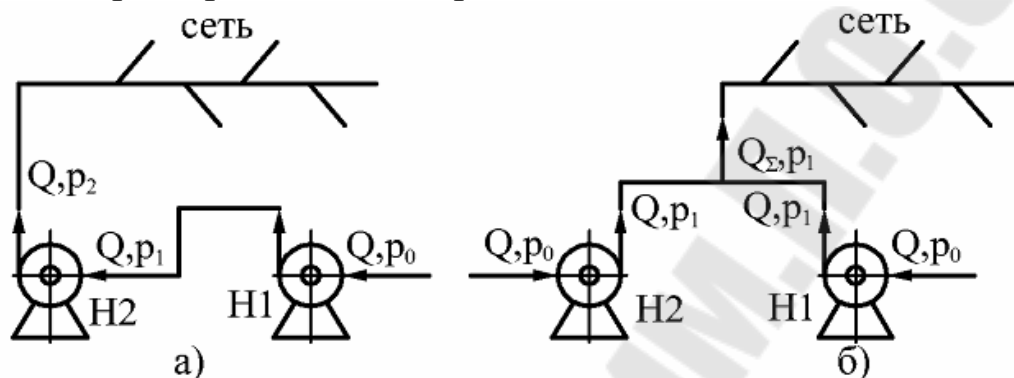


Рис. 3.15. Последовательное (а) и параллельное (б) включение в сеть двух нагнетателей  $N_1$  и  $N_2$

Суммарная характеристика двух одинаковых нагнетателей, соединенных последовательно  $H_{\Sigma} = f(Q)$ , получается путем удваивания ординат характеристики одного  $H = f(Q)$  при неизменной абсциссе. Если при работе одного нагнетателя рабочие параметры  $H_1, Q_1$  получались точкой пересечения  $A_1$ , то при работе двух последовательно соединенных нагнетателей рабочие параметры  $H_{\Sigma 1}, Q_{\Sigma 1}$  определяются точкой пересечения  $A_{\Sigma 1}$ . Цель последовательного соединения нагнетателей наилучшим образом достигается, если характеристика сети крутая (рис. 3.16).

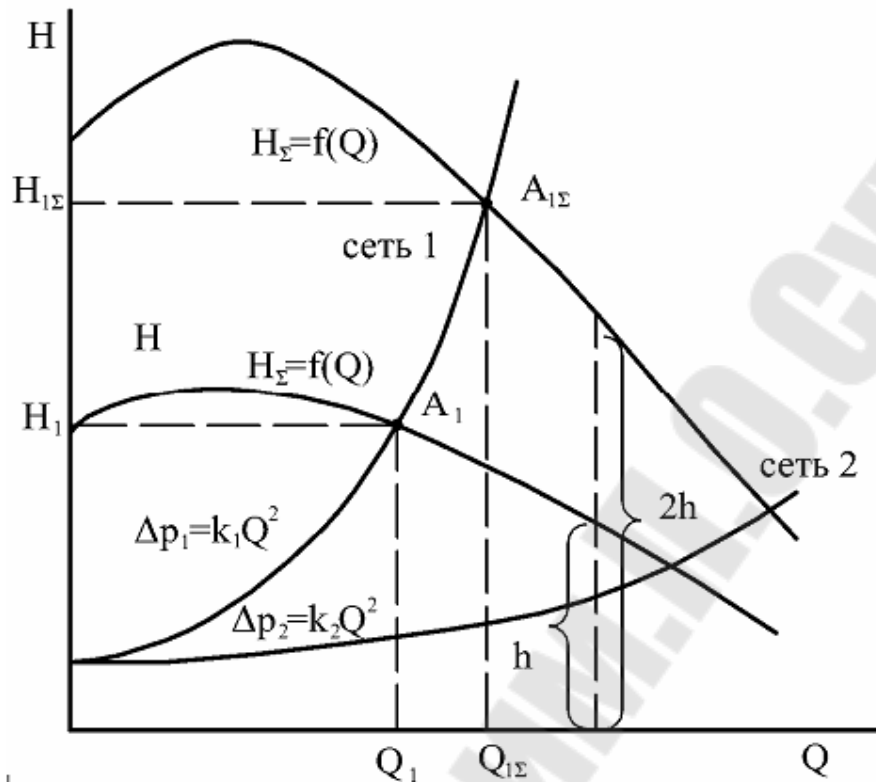


Рис. 3.16. Характеристика двух последовательно включенных нагнетателей

Суммарная характеристика двух одинаковых нагнетателей, соединенных параллельно  $H_{\Sigma} = f(Q)$ , получается путем удваивания абсцисс при неизменной ординате (рис. 3.17). При работе одного нагнетателя на сеть 2 рабочие параметры  $H_2$ ,  $Q_2$  определяются точкой пересечения  $A_2$ , при работе двух параллельно соединенных нагнетателей  $H_{\Sigma 2}$ ,  $Q_{\Sigma 2}$  определяются точкой пересечения  $A_{\Sigma 2}$ . Цель параллельного соединения нагнетателей наилучшим образом достигается, если характеристика сети пологая.

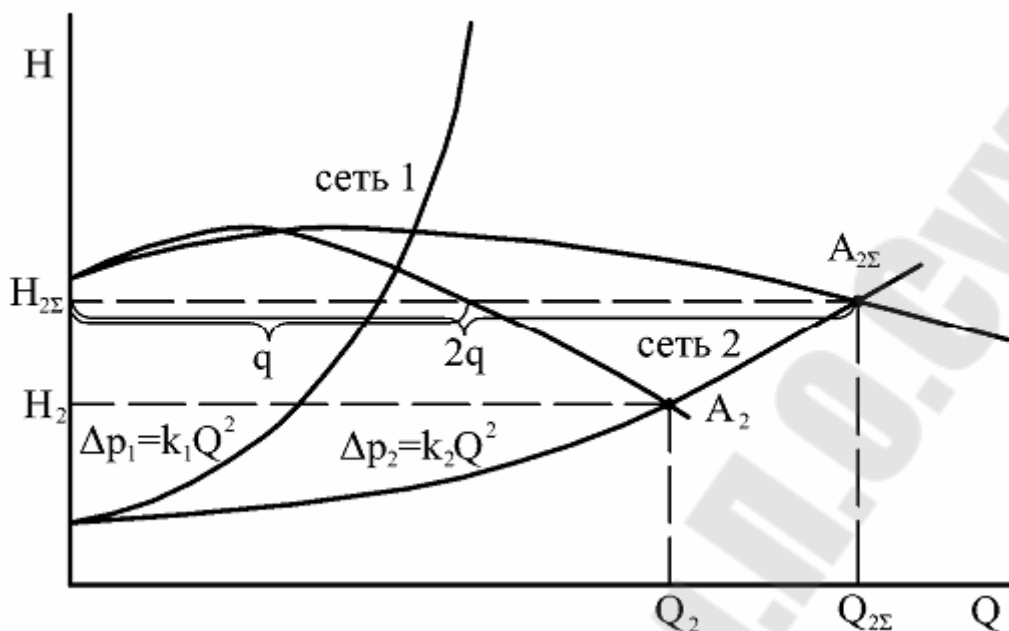


Рис. 3.17. Характеристик двух параллельно включенных нагнетателя

### 3.2.4. Регулирование центробежных нагнетателей

Все способы регулирования подачи можно разделить на две основные группы:

А – регулирование при постоянной скорости вращения рабочего колеса;

В – регулирование изменением скорости вращения рабочего колеса.

К группе А относятся:

А.1. Регулирование дросселем;

А.2. Регулирование направляющим аппаратом на всасывающем патрубке;

А.3. Регулирование устройствами, встроенными в рабочее колесо (изменение геометрии колеса и лопастей).

К группе В относятся:

В.1. Изменение скорости вращения вала нагнетателя без изменения скорости вращения двигателя (зубчатые, ременчатые, фрикционные редукторы; гидравлические и индукторные муфты);

В.2. Различные электрические способы изменения скорости вращения электродвигателя;

В.3. В паротурбинных двигателях – изменение расхода пара в турбине.

### 3.3. Насосы

#### 3.3.1. Классификация по быстроходности

По быстроходности рабочие колеса насосов классифицируются следующим образом:

1. тихоходное колесо,  $ns=40\div 80$ ;
2. нормальное колесо,  $ns=80\div 150$ ;
3. быстроходное колесо,  $ns=150\div 300$ ;
4. диагональное колесо,  $ns=300\div 600$ ;
5. осевое или пропеллерное колесо,  $ns=600\div 1200$ .

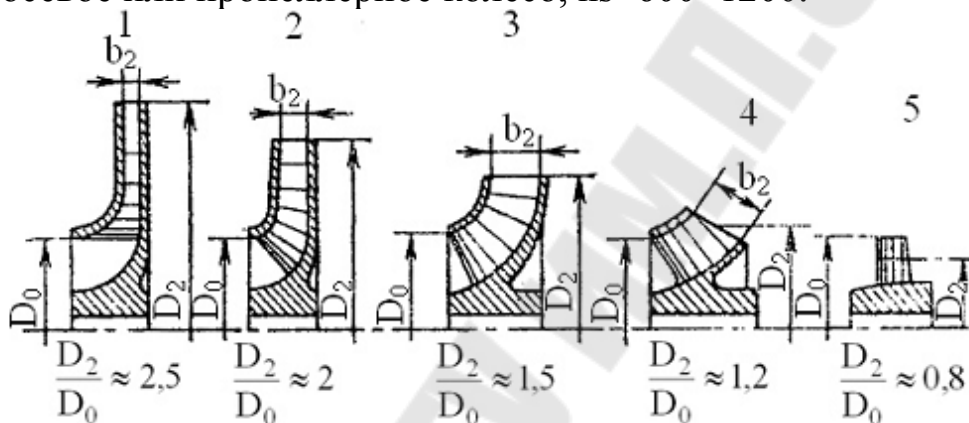


Рис. 3.18. Конструктивные типы рабочих колес:

1 – тихоходное колесо,  $ns=40\div 80$ ; 2 – нормальное колесо,  $ns=80\div 150$ ; 3 – быстроходное колесо  $ns=150\div 300$ ; 4 – диагональное колесо,  $ns=300\div 600$ ; 5 – осевое или пропеллерное колесо,  $ns=500\div 1200$

#### 3.3.2. Установка насосов. Допустимая высота всасывания по условиям кавитации

В обычных конструкциях центробежных насосов наименьшее давление наблюдается на входе в рабочее колесо, особенно на вогнутой стороне лопасти, т.е. там, где относительная скорость  $w_1$ , и соответствующая ей кинетическая энергия  $w_1^2/2$  достигает наибольших значений. Если давление оказывается равным или меньшим давления насыщенного пара  $p \leq p_{н.п.}$ , соответствующего температуре всасываемой жидкости, то возникает явление, называемое **кавитацией**. Физическая картина кавитации состоит во вскипании жидкости в зоне повышенного давления и в последующей конденсации паровых пузырьков при выносе кипящей жидкости в область повышенного давления. При быстрой конденсации парового пузырька (центру кон-



денсации, где возникает вакуум) и в момент смыкания его объема производит вследствие малой сжимаемости жидкости резкий точечный удар; при этом давление в точках смыкания паровых пузырьков при их конденсации достигает нескольких мегапаскалей. Если конденсация пузырька происходит на поверхности лопасти, то удар вызывает местное разрушение металла, называемое питтингом. Работа насоса в режиме кавитации внешне проявляется шумом, внутренним треском, повышенным уровнем вибрации, а также ударами в проточной полости, опасными для насоса.

Возможны два различных случая расположения насоса относительно приемного резервуара (рис. 3.19). Установка рис. 3.19, а характерна для насосов, подающих жидкости с низкой температурой, а установка на рис. 3.19, б – для насосов, подающих жидкости с высокой температурой, а также при всасывании насосами холодной воды из емкостей с достаточно высоким вакуумом. Установки выполненные по схеме 3.2 б, часто встречаются в теплоэнергетике в схемах регенеративного подогрева и питания паровых котлов. Когда насос подает горячую воду, емкость, из которой он всасывает, приходится располагать выше насоса (например, в случае бустерного насоса, всасывающего питательную воду из деаэратора). По соображениям удобства строительных работ и монтажа желательно по возможности уменьшать требуемую расчетом высоту установки приемной емкости. Этого можно достигнуть увеличением диаметра всасывающего трубопровода, уменьшением его длины, а также выбором рациональной конструкции тех элементов всасывающего тракта, которые дают снижение местных потерь напора. В некоторых случаях допустимую высоту всасывания можно изменить уменьшением или увеличением давления в емкости, из которой происходит всасывание.

Основной мерой против кавитации является соблюдение допустимой высоты всасывания  $H_{г.доп}$ , которая рассчитывается по определенной методике. Величина  $H_{г.доп}$ , м. б. как положительная (насос может находиться выше уровня жидкости сосуда, из которого происходит всасывание), так и отрицательная (насос должен находиться ниже уровня).

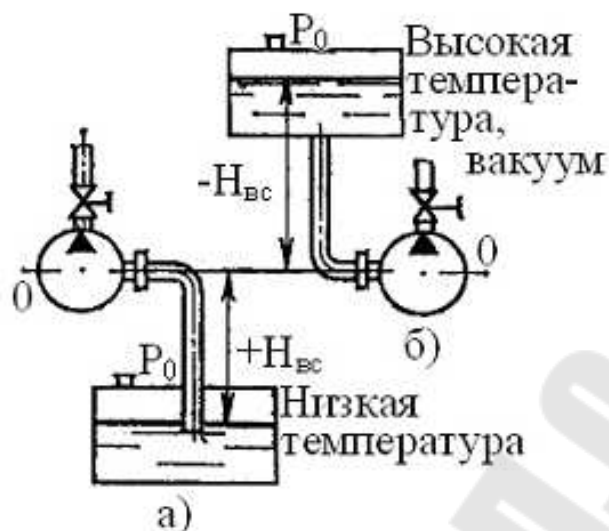


Рис. 3.19. Два случая установки насоса относительно уровня всасываемой жидкости

### 3.4. Тепловые двигатели

Тепловые двигатели составляют наибольшую группу среди первичных двигателей и используют первичные энергетические ресурсы в виде химического или ядерного топлива. Они состоят как минимум из двух преобразователей энергии – теплогенератора и расширительной машины. В теплогенераторе происходит преобразование химической (ядерной) энергии в тепловую энергию рабочего тела: пара или продуктов сгорания. В расширительной машине происходит термодинамический процесс расширения, в результате которого тепловая энергия рабочего тела преобразуется в механическую работу. Теплогенератор и расширительная машина могут быть пространственно как соединены (двигатели внутреннего сгорания), так и разъединены (паротурбинные установки, газотурбинные установки, паропоршневые двигатели, двигатели внешнего сгорания, и т.д.).

В химических, или огневых теплогенераторах преобразование химической энергии топлива в тепловую энергию рабочего тела может происходить в одну или две стадии. Одностадийное преобразование химической энергии в тепловую происходит при горении топлива в камере сгорания с образованием рабочего тела в виде продуктов сгорания при высоком давлении и высокой температуре (двигатели внутреннего сгорания, газотурбинные установки, воз-

душно-реактивные двигатели). Работа одностадийных теплогенераторов характеризуется тепловой мощностью (Вт), объемным теплонапряжением (Вт/м<sup>3</sup>), коэффициентом полезного действия теплогенератора (%). Рабочее тело, поступающее в расширительную машину, имеет заданные температуру и давление, определяемые жаростойкостью материала лопаток, сопел и др., а также моторесурсом. Двухстадийное преобразование химической энергии топлива в тепловую энергию рабочего тела происходит в паровых котлах (парогенераторах) и состоит из стадий: 1) сжигание топлива в топках котлов с образованием высокотемпературных продуктов сгорания, и 2) получение рабочего тела в виде перегретого пара высокого давления в поверхностных теплообменниках путем передачи тепловой энергии от греющих продуктов сгорания к нагреваемому рабочему телу (жидкость, парожидкостная смесь, пар) через стенку поверхности нагрева. Работа двухстадийного парогенератора характеризуется тепловой мощностью (Вт), коэффициентом полезного действия (%), удельным расходом топлива (кг/Дж). Рабочее тело – перегретый пар – имеют начальную энтальпию и температуру перегрева достаточные, чтобы в конце процесса расширения иметь влажность не более 13-14%; в расширительных машинах (паровых турбинах) большой мощности практикуется промежуточный перегрев пара, что дает возможность осуществить процесс расширения до предельно низкого давления с сохранением допустимой сухости пара.

Расширительные машины различают по конструкции рабочих органов – поршневые, роторно-поршневые, лопаточные (турбинные) и сопловые (реактивные). В поршневых машинах основными элементами являются: цилиндр, внутри которого поршень совершает возвратно-поступательное движение, преобразуемое с помощью кривошипно-шатунного механизма во вращательное движение, и органы впуска-выпуска рабочего тела. Последние являются золотниковыми, если рабочее тело подается в готовом виде; в этих машинах впуск производят поочередно с двух сторон поршня, что позволяет сделать процесс непрерывным. Поршневые расширительные машины с внешним приготовлением рабочего тела малоэкономичны и практически вытеснены поршневыми двигателями внутреннего сгорания (ДВС), в которых рабочее тело с температурой до 2200-2400 °С (продукты сгорания) готовятся внутри охлаждаемого цилиндра; в таких машинах применяются органы впуска-выпуска в виде клапанов. По числу ходов поршня (тактов), за ко-

торое совершается один рабочий цикл, различают четырехтактные и двухтактные ДВС (рис. 3.20). По месту и способу приготовления смеси топлива с воздухом различают ДВС с внешним смесеобразованием (карбюраторные) и с внутренним (дизельные). В карбюраторных двигателях применяется принудительное воспламенение (электрические свечи зажигания или форсунки), в дизельных – самовоспламенение за счет более высокой степени сжатия. ДВС используют в основном как транспортные: автомобильные, тракторные, судовые и т.д. для обеспечения непрерывности работы и получения необходимой мощности их делают многоцилиндровыми с однорядным, двухрядным V-и W-образным расположением блоков цилиндров.

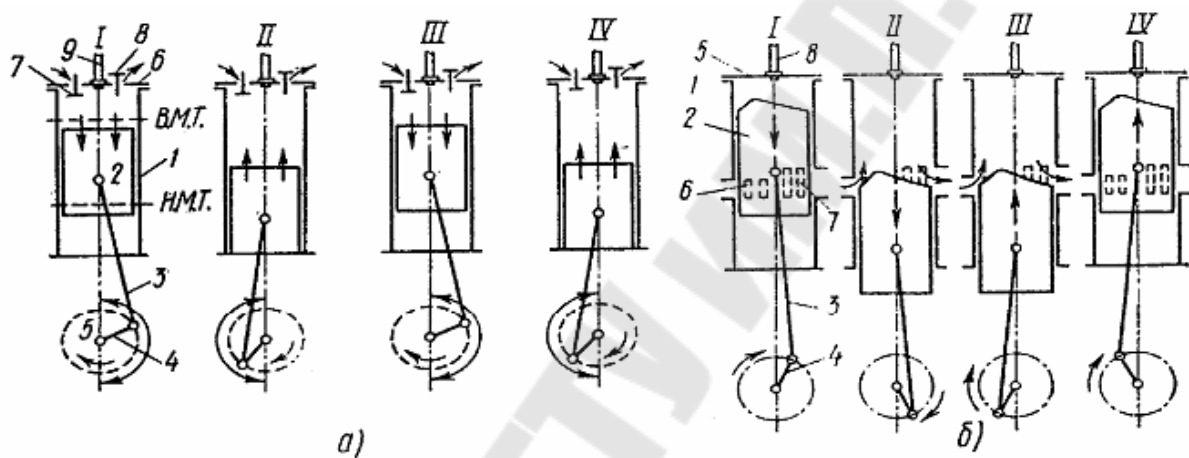


Рис. 3.20. Схемы работы четырех- и двухтактного ДВС:

а – четырехтактный процесс: 1 – цилиндр, 2 – поршень, 3 – шатун, 4 – кривошип, 5 – коленчатый вал, 6 – головка цилиндра, 7 – впускной клапан, 8 – выпускной клапан, 9 – свеча зажигания или форсунка, б – двухтактный процесс: 1 – цилиндр, 2 – поршень, 3 – шатун, 4 – коленчатый вал, 5 – головка цилиндра, 6 – продувочные окна, 7 – выпускные окна, 8 – свеча зажигания или форсунка

Наилучшие результаты по удельной мощности и коэффициенту полезного действия достигаются в турбопоршневых двигателях, которые представляют собой комбинацию поршневого ДВС с турбокомпрессорной установкой, служащей для наддува.

Сопловые расширительные машины в простейшем варианте – это воздушно-реактивные двигатели прямого типа без каких-либо подвижных частей (рис. 3.21). Экономичность таких двигателей, установленных на летательных аппаратах, зависит от числа Маха: при  $M=0,8$  эффективный КПД  $\eta_e=0,06$ , при  $M=3,0$   $\eta_e \approx 0,5$ .

Турбокомпрессорные воздушно-реактивные двигатели работают с высокой экономичностью и на средних скоростях летательных аппаратов ( $M=0,5 \div 1,0$ ), т.к. степень сжатия воздуха лишь частично зависит от скорости набегающего потока.

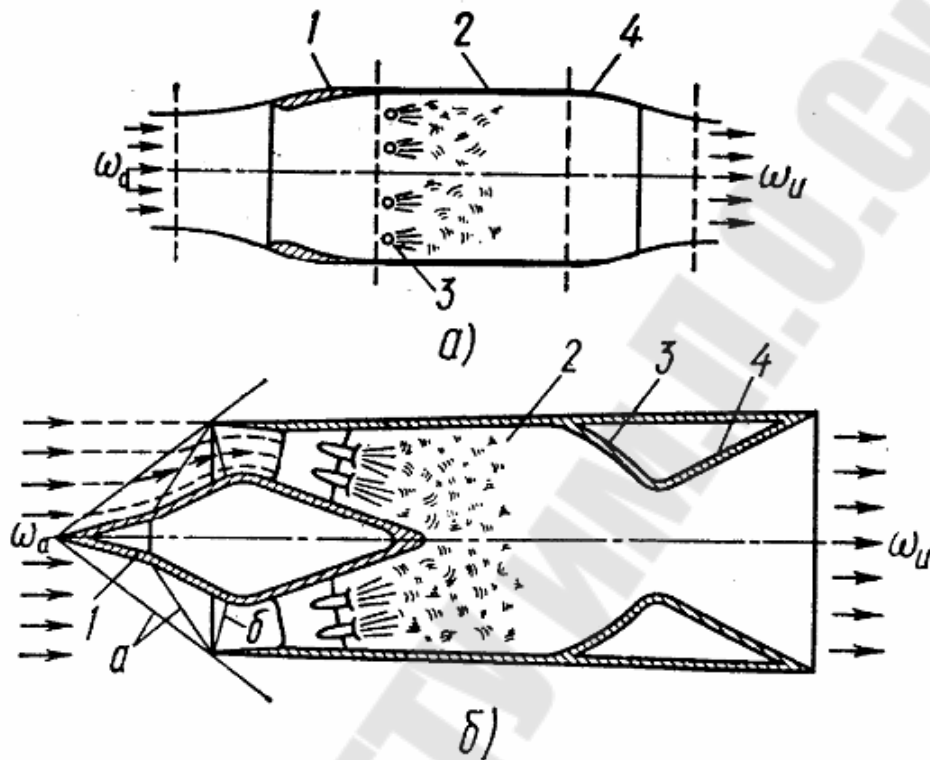


Рис. 3.21. Схемы проточных воздушно-реактивных двигателей:

а - дозвуковых скоростей полета: 1 - входное устройство (диффузор), 2 - камера сгорания, 3 - форсунки подачи горючего; 4 - сопло, б - для сверхзвуковых скоростей полета: 1 - профилированная игла для образования скачков уплотнения, 2 - камера сгорания, 3 - выходное сопло, 4 - выходное сопло - расширяющийся участок; а - косые скачки уплотнения; б - прямой скачок уплотнения

Тепловые двигатели (ТД) можно различать по следующим признакам:

1. Источнику энергии: химические (топливные), ядерные, солнечные.
2. Виду рабочего тела: паровые, газовые, парогазовые.
3. Конструкции расширительной машины: поршневые, турбинные, сопловые (реактивные), комбинированные.

Области применения: стационарные, транспортные, тепло-энергетические (автомобильные, тракторные, судовые, авиационные и т.п.).

Внутри каждого классификационного признака могут быть уточняющие признаки. Например, топливные ТД могут различаться по виду топлива (естественное - искусственное, твердое – жидкое - газообразное). Жидкостные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) разделяют по виду топлива, способу приготовления топливно-воздушной смеси и способу зажигания: карбюраторные и дизельные, и т.д.

Различные типы тепловых двигателей имеют различные показатели экономичности, определяемой коэффициентом полезного действия. Предельные значения эффективного КПД ( $\eta_e$ ) приведены ниже:

двигатели внутреннего сгорания (ДВС)	40-42
паротурбинные установки (ПТУ)	42-43
газотурбинные установки (ГТУ)	35-38
парогазотурбинные установки (ПГТУ)	47-52.

### 3.5. Паротурбинные установки

Паротурбинная установка (ПТУ) включает следующий минимум составляющих элементов (рис.3.22): паровой котел, в котором химическая энергия топлива преобразуется в тепловую энергию водяного пара; пароперегреватель, в котором происходит перегрев насыщенного пара; паровая турбина, в которой тепловая энергия пара преобразуется в механическую энергию ротора, приводящего в движение потребитель, например, электрогенератор; конденсатор, в котором отработанный пар конденсируется; насос, который подает конденсат в паровой котел. Тепловая схема действующей ПТУ, например, тепловой электростанции, работающей с наибольшим коэффициентом использования химической энергии топлива, значительно сложнее.

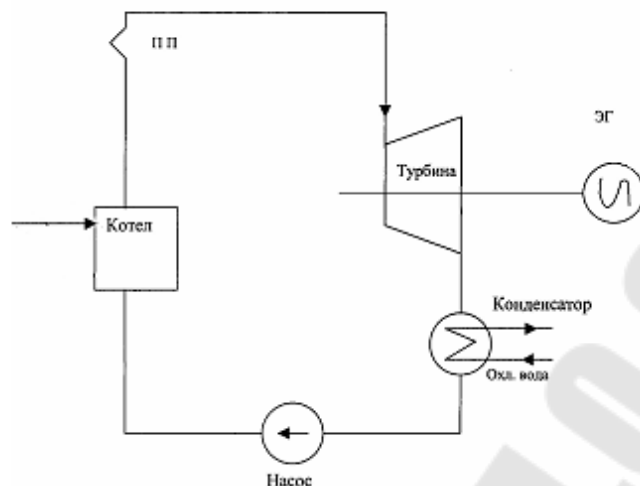


Рис. 3.22. Простейшая тепловая схема паротурбинной установки

Основной составляющей паротурбинной установки является паровая турбина. Первые паровые турбины Густава Лавалья (1883г.) были одноступенчатыми (рис. 3.23). Пар поступал в одно или несколько параллельно расположенных сопел, приобретал в них максимальную скорость при полном расширении от начального давления  $p_0$  до конечного  $p_1$ , и направлялся в рабочие лопатки, расположенные на ободе диска, сидящего жестко на валу турбины, и образующие решетку рабочих каналов.

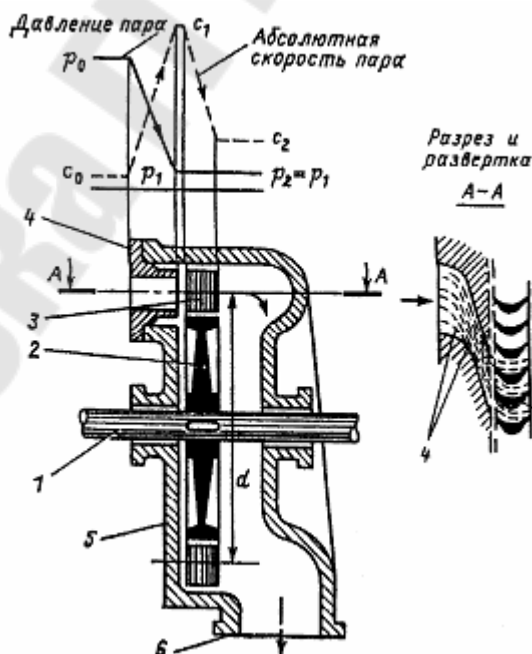


Рис. 3.23. Схематический разрез одноступенчатой активной турбины: 1 – вал; 2 – диск; 3 – рабочие лопатки; 4 – сопловая решетка; 5 – корпус; 6 – выпускной патрубок

Давление до и после рабочих лопаток не изменялось, т.е.  $p_1 = p_2$ . Такие турбины принято называть активными: преобразование потенциальной тепловой энергии пара в кинетическую осуществляется в соплах, а кинетическая энергия пара преобразуется в механическую работу в рабочих лопатках только за счет изменения направления движения потока при постоянном давлении. Скорость вращения в одноступенчатой активной турбине достигает огромных значений (до 30000 об/мин), поэтому ограничен диаметр диска  $d$  по условиям прочности, ограничена пропускная способность по пару, а, следовательно, ограничена и мощность. В 1900 г. Г. Лаваль предложил многоступенчатую активную турбину со ступенями давления, в которой пар расширялся в несколько последовательно расположенных группах сопел, что способствовало увеличению мощности двигателя. Активные турбины со ступенями скорости (турбина Кертиса, 1900 г.) имеют обычно 2-3 ступени и обладают большой мощностью при малом размере и относительно низком КПД, особенно при высоких скоростях пара.

Реактивные турбины (Ч. Парсонс, 1884 г.) состоят из ступеней, включающих сопловые и рабочие лопаточные решетки, и расширение пара происходит как в той, так и в другой решетках, а кинетическая энергия пара преобразуется в механическую работу в рабочих лопатках не только за счет изменения направления движения потока, но и за счет реакции как следствие увеличения относительной скорости при расширении пара в межлопаточных каналах рабочей решетки (рис. 3.24).



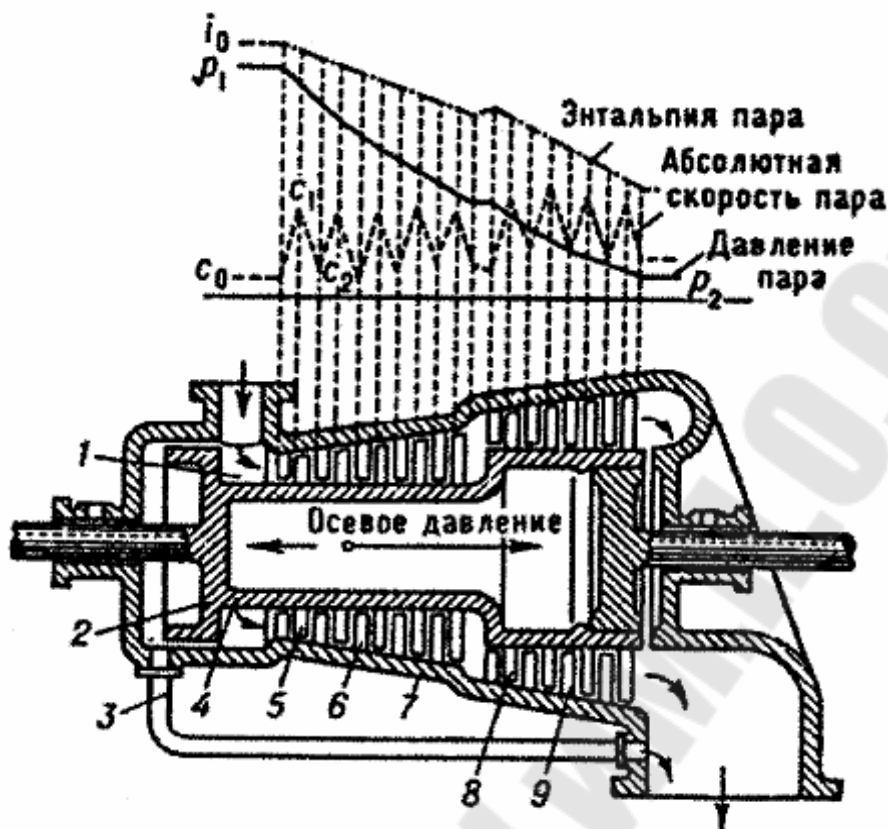


Рис. 3.24. Схематический разрез небольшой реактивной турбины: 1 - кольцевая камера свежего пара; 2 - разгрузочный поршень; 3 - соединительный паропровод; 4 - барабан ротора; 5, 8 - рабочие лопатки; 6, 9 - направляющие лопатки; 7 - корпус.

Классификация паровых турбин возможна по различным признакам:

- принципу преобразования тепловой энергии в механическую:

активные; активные с реакцией; реактивные; смешанные

- параметрам свежего пара:

- турбины среднего давления –  $p = 3,45 \text{ МПа}$ ,  $t = 435 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

- турбины повышенного давления –  $p = 8,8 \text{ МПа}$ ,  $t = 535 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

- турбины высокого давления –  $p = 12,75 \text{ МПа}$ ,  $t = 565 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

- турбины сверхкритических параметров –  $p = 23,55 \text{ МПа}$ ,  $t = 565 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

- направлению движения рабочего тела:

- радиальные (центростремительные и центробежные);

- осевые, или аксиальные

- характеру теплового процесса и конечному состоянию рабочего тела:

- конденсационные паровые турбины, в которых весь расход свежего пара, за исключением отборов на регенерацию, протекая через проточную часть и расширяясь в ней до давления, меньшего чем атмосферное, поступает в конденсатор, где теплота отработавшего пара отдается охлаждающей воде и полезно не используется;

- турбины с противодавлением, отработавший пар которых с давлением, больше атмосферного, направляется к тепловым потребителям, использующим теплоту для отопительных или производственных целей;

- конденсационные турбины с регулируемым отбором пара, в которых часть пара отбирается из промежуточной ступени и отводится к тепловому потребителю при автоматически поддерживаемом постоянном давлении, а остальное количество пара продолжает работать в последующих ступенях и направляется в конденсатор;

В турбостроении приняты следующие обозначения турбин. Первая буква характеризует тип турбины: К – конденсационная, Т – конденсационная с теплофикационным отбором пара, П – с производственным отбором пара для промышленного производителя, ПТ – с производственным и теплофикационным регулируемые отборами пара, Р – с противодавлением, ПР – с производственным отбором и противодавлением. После буквы в обозначении указываются мощность турбины, МВт (если дробь, то в числителе номинальная, а в знаменателе – максимальная мощность), а затем начальное давление пара перед стопорным клапаном, турбины, кгс/см<sup>2</sup>. Под чертой для турбин типов П, ПТ, Р и ПР указывается номинальное давление производственного отбора или противодавление, кгс/см<sup>2</sup>. Например:

- К – 300-240 – конденсационная турбина с номинальной электрической мощностью 300 МВт и начальным давлением пара 240 кгс/см<sup>2</sup> (23,5 МПа);

- Т – 250/300 – 240 – теплофикационная турбина с номинальной электрической мощностью 250 МВт, максимальной электрической мощностью 300 МВт и начальным давлением пара 240 кгс/см<sup>2</sup> (23,5 МПа);

- ПТ – 135/165 – 130/15 – конденсационная турбина с теплофикационным и производственным отборами пара с номинальной электрической мощностью 135 и максимальной 165 МВт, начальным

давлением пара  $130 \text{ кгс/см}^2$  ( $12,75 \text{ МПа}$ ) и давлением производственного отбора  $15 \text{ кгс/см}^2$  ( $1,49 \text{ МПа}$ ).

Конденсационные турбины мощностью свыше  $150 \text{ МВт}$  работают с промежуточным перегревом пара.

Под *номинальной мощностью* понимается наибольшая мощность, которую турбина должна развивать длительное время при номинальных значениях всех других основных параметров.

*Максимальная мощность* – наибольшая мощность, которую турбина должна длительно развивать при отсутствии отборов пара для внешних потребителей теплоты.

*Основные узлы и конструкции паровой турбины.* Паровая турбина является двигателем, в котором потенциальная энергия пара превращается в механическую работу вращающегося ротора. Всякая турбина состоит из неподвижных и вращающихся частей. Совокупность всех неподвижных частей принято называть статором турбины, а вращающихся – ротором. Рассмотрим в качестве примера конструкцию одноцилиндровой конденсационной турбины мощностью  $50 \text{ МВт}$  с начальными параметрами пара  $8,8 \text{ МПа}$ ,  $535 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 3.25). В этой турбине применен комбинированный ротор. Первые 19 дисков, работающих в зоне высокой температуры, откованы как одно целое с валом турбины, последние три диска – насадные. Применение насадных дисков в зоне высокой температуры, как правило, не допускается во избежание ослабления натяга их на валу из-за ползучести. Выполнение же трех последних дисков цельноковаными потребовало бы увеличения диаметра поковки ротора.

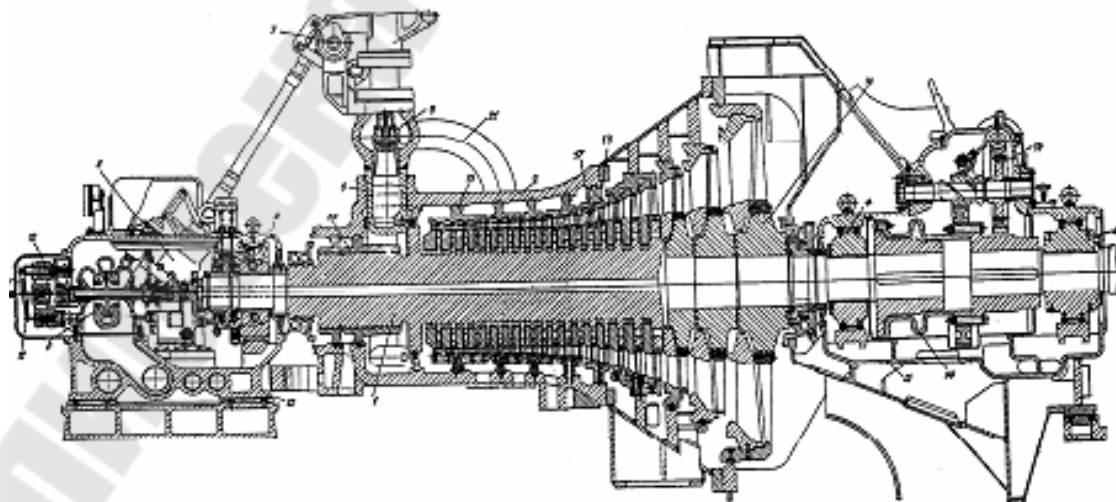


Рис. 3.25. Продольный разрез турбины К-50-90: 1 – ротор турбины; 2 – корпус турбины; 3 – опорно-упорный подшипник; 4 – опорный подшипник; 5 – регулирующий лапан; 6 – сопловая коробка; 7 –

кулачковый вал; 8 – сервомотор; 9 – главный масляный насос; 10 – регулятор скорости; 11 – следящий золотник; 12 – картер переднего подшипника; 13 – валоповоротное устройство; 14 – соединительная муфта; 15 – выхлопной патрубок турбины; 16 – насадные диски; 17 – рабочие лопатки; 18 – диафрагмы; 19 – обоймы диафрагм; 20 – обоймы концевого уплотнения; 21 – перепускная труба (от стопорного к регулирующему клапану)

Совокупность неподвижной сопловой решетки, закрепленной в сопловых коробках или диафрагмах, со своей вращающейся рабочей решеткой, закрепленной на следующем по ходу пара диске, принято называть ступенью турбины. Проточная часть рассматриваемой одноцилиндровой турбины состоит из 22 ступеней, из которых первая называется регулирующей, вторая – первой нерегулируемой, а все остальные, кроме последней, - промежуточными.

В каждой сопловой решетке поток пара ускоряется в сопловых каналах специально выбранного профиля и приобретает необходимое направление для безударного входа в каналы между рабочими лопатками. Усилия, развиваемые потоком пара на рабочих лопатках, вращают диски и связанный с ними вал.

По мере понижения давления пара при прохождении от первой к последней ступени удельный объем пара сильно растет, что требует увеличения проходных сечений сопловых и рабочих решеток, и соответственно высоты лопаток и среднего диаметра ступеней. К переднему торцу ротора прикреплен приставной конец вала, на котором установлены бойки предохранительных выключателей (датчики автомата безопасности), воздействующие на стопорный и регулирующие клапаны и прекращающие доступ пара в турбину при повышении частоты вращения ротора на 10-12% по сравнению с расчетной.

Приставной конец вала с помощью гибкой муфты соединен с валом главного масляного насоса, корпус которого своим всасывающим патрубком прикреплен к приливу картера переднего подшипника.

Главный масляный насос предназначен для подачи масла в систему смазки подшипников турбины и генератора (при давлении 0,15 МПа) и в систему регулирования (при давлении 2 МПа), обеспечивающую автоматическое поддержание заданной частоты вращения ротора турбины. Датчиком частоты вращения является быстроходный упругий регулятор скорости, установленный на конце вала

насоса. Со стороны выхода пара ротор турбины соединен полугибкой муфтой с ротором генератора.

Статор турбины состоит из корпуса, в который вварены сопловые коробки, соединенные с помощью сварки с клапанными коробками, установлены обоймы концевых уплотнений, обоймы диафрагм, сами диафрагмы и их уплотнения. Корпус этой турбины кроме обычного горизонтального разъема имеет два вертикальных разъема, разделяющих на переднюю, среднюю части и выходной патрубков. Передняя часть корпуса – литая, средняя и выходной патрубков – сварные.

К неподвижным частям турбины относятся также картеры ее подшипников. В переднем картере расположен опорно-упорный подшипник, в заднем – опорные подшипники роторов турбины и генератора.

Передний картер установлен на фундаментной плите и при тепловом расширении корпуса турбины может свободно перемещаться по этой плите. Задний же картер выполнен за одно целое с выхлопным патрубком турбины, который при тепловых расширениях остается неподвижным благодаря его фиксации пересечением поперечной и продольной шпонок, называемым фиксунктом, или мертвой точкой.

Передняя часть корпуса турбины соединена с передним картером с помощью специальных лап, предусмотренных на корпусе, и поперечных шпонок, установленных на боковых приливах картера. Благодаря такому соединению тепловые расширения корпуса турбины при прогреве и тепловые укорочения его при остывании полностью передаются переднему картеру, который, скользя по фундаментной плите, с помощью упорного подшипника перемещает ротор на такую величину, как и тепловое удлинение или укорочение корпуса, что обеспечивает неизменность в допустимых пределах осевых зазоров в проточной части турбины между вращающимися и неподвижными элементами.

В заднем картере турбины расположено валоповоротное устройство, предназначенное для медленного вращения ротора при пуске и остановке турбины. Оно состоит из электродвигателя, к ротору которого присоединен червяк, входящий в зацепление с червячным колесом, насаженным на промежуточный валик. На винтовой шпонке этого валика установлена ведущая цилиндрическая шестерня, которая при включении валоповоротного устройства

входит в зацепление с ведомой цилиндрической шестерней, сидящей на валу турбины. После подачи пара в турбину частота вращения ротора повышается и ведущая шестерня автоматически выходит из зацепления из-за проворачивания ее по винтовой шпонке.

Основным назначением валоповоротного устройства является предотвращение теплового искривления ротора и нагрева баббитовой заливки подшипников при остывании и пуске турбины.

Основные узлы системы регулирования рассматриваемой турбины: четыре клапана, регулирующих подачу пара в турбину, распределительный кулачковый валик, проворачиваемый зубчатой рейкой поршневого сервомотора, получающего импульс от регулятора скорости и открывающего или закрывающего клапаны. Профили кулачков выполнены таким образом, что регулирующие клапаны открываются поочередно один за другим. Такое последовательное открытие или закрытие их позволяет исключить дросселирование пара, проходящего через полностью открытые клапаны при сниженных нагрузках турбины, т.е. дросселируется лишь та часть пара, которая проходит через частично открытый клапан.

Эта система парораспределения называется сопловой в отличие от дроссельной, где все количество пара как при полной, так и при сниженных нагрузках проходит через один или несколько одновременно открывающихся клапанов и, дросселируясь, поступает к соплам первой ступени с пониженным давлением. Понижение давления приводит к уменьшению располагаемого теплоперепада и соответствующему снижению экономичности турбины.

Основная потеря теплоты в турбинной установке происходит в ее конденсаторе. Для уменьшения этой потери в корпусе турбины предусмотрено несколько патрубков, через которые пар отбирается из промежуточных ступеней на подогрев питательной воды, подаваемой в котел.

## ТЕМА 4. КОТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

### 4.1. Классификация котельных установок

*Котельная установка* - совокупность котла и вспомогательного оборудования.

*Котел* - устройство, в котором для получения пара и нагрева воды с давлением выше атмосферного, потребляемых вне самого устройства, используется теплота, выделяющаяся при сгорании органического топлива и протекании технологического процесса, а также теплота от уходящих газов.

*По назначению котлы делятся на:*

- 1) Энергетические (для ТЭС)
- 2) Отопительно-производственные.

*По расположению топок бывают:*

- 1) С внутренней топкой (МЗК)
- 2) С внешней (нижней) топкой ДКВР)
- 3) С выносной топкой (ДЕ)

*По способу сжигания топлива:*

1) Слоевые (колосниковые) - для сжигания твердого кускового топлива.

2) Камерные - газообразное, жидкое и твердое пылеобразное топливо сжигается во взвешенном состоянии.

*По перемещению уходящих газов и воды котлы делятся на:*

1) Газотрубные, где продукты сгорания проходят по трубам или паровой трубе, а вокруг труб и паровой трубы движется вода.

2) Водотрубные котлы, в которых вода (пароводяная смесь) проходит по трубам поверхности нагрева котла, а продукты сгорания омывают эти трубы и передают свое тепло воде.

*По конструктивным особенностям котлы делятся на:*

- 1) Цилиндрические
- 2) Горизонтально-водотрубные
- 3) Вертикально-водотрубные с одним или несколькими барабанами

*По движению водяного или пароводяного потока внутри котла:*

1) Естественная циркуляция - осуществляется за счет движущего напора, создаваемого разностью весов столба воды в опускных трубах и столба пароводяной смеси в подъемных трубах.

2) Принудительное движение теплоносителя (осуществляется с помощью искусственных побудителей – насосов), которое в свою очередь осуществляется многократной принудительной циркуляцией и по прямоточной схеме.

В современных отопительных и отопительно-производственных котельных для производства пара используются в основном котлы с естественной циркуляцией, а для производства горячей воды - котлы с принудительным движением теплоносителя, работающие по прямоточному принципу.

Современные паровые котлы с естественной циркуляцией выполняются из вертикальных труб, расположенных между двумя коллекторами (барабанами). Одна часть труб, называемых «подъемными трубами», обогревается факелом и продуктами сгорания топлива, а другая, обычно необогреваемая часть труб, находится вне котельного агрегата и носит название «опускные трубы». В обогреваемых подъемных трубах вода нагревается до кипения, частично испаряется и в виде пароводяной смеси поступает в барабан котла, где происходит ее разделение на пар и воду. По опускным не обогреваемым трубам из верхнего барабана поступает в нижний коллектор (барабан). Кратность циркуляции (отношение расхода воды, проходящего через циркуляционный контур, к расходу пара, производимого в нем) в таких котлах изменяется от 10 до 100.

В паровых котлах с многократной принудительной циркуляцией поверхности нагрева выполняются в виде змеевиков, образующих циркуляционные контуры. Кратность циркуляции в этих котлах изменяется от 5 до 10.

В прямоточных паровых котлах кратность циркуляции составляет единицу, т.е. питательная вода, нагреваясь, последовательно превращается в пароводяную смесь, насыщенный и перегретый пар. В водогрейных котлах вода при движении по контуру циркуляции нагревается за один оборот от начальной до конечной температуры.

*По давлению пара котлы бывают:*

- 1) Низкого давления ( до  $10 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{см}^2$ )
- 2) Среднего давления (  $10 - 100 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{см}^2$ )
- 3) Высокого давления (  $100 - 225 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{см}^2$ )

*По количеству вырабатываемого пара:*

- 1) Малой мощности ( до 25 т/ч)
- 2) Средней мощности ( 25 - 120 т/ч)
- 3) Высокой мощности ( 120 - 220 т/ч)



## 4.2. Котельная установка и ее системы

По назначению котельные установки делят на энергетические, производственные и отопительно-производственные. В энергетических котельных установках вырабатывают пар для привода турбин, в производственных для технологических нужд, а в отопительно-производственных вырабатывают пар или горячую воду для отопления, вентиляции и горячего водоснабжения жилых и производственных зданий.

**Состав котельной установки.** Котельная установка состоит из одного или нескольких котельных агрегатов и вспомогательных устройств, обеспечивающих непрерывную и надежную работу. К вспомогательным устройствам относят:

- питательные насосы для непрерывной подачи воды в котельный агрегат;
- дутьевые вентиляторы и дымосос для подачи воздуха в котельный агрегат и удаления из него в атмосферу продуктов сгорания;
- топливоприготовительные и топливоподающие устройства для непрерывного приготовления и подачи топлива в котельный агрегат;
- золоулавливающее и золошлакоудаляющее оборудование для очистки дымовых газов от золовых частиц с целью охраны окружающей среды от загрязнения и для организованного отвода шлака и уловленной золы;
- водоподготовительные установки для обеспечения обработки исходной (сырой) воды до заданного качества;
- контрольно-измерительную аппаратуру для контроля и автоматического регулирования режима работы котельного агрегата;
- соединительные трубопроводы.

**Питательные насосы** – электроприводные поршневые или центробежные, а также паровые поршневые или паротурбинные насосы, предназначенные для подачи в паровые котельные агрегаты питательной водой и поддержания нормального уровня воды в верхнем барабане.

В каждой котельной устанавливают не менее двух групп питательных насосов с независимым приводом: основные и резервные. В качестве основных применяют, как правило, центробежные насосы с электроприводом с суммарной подачей не менее 110% номинальной паропроизводительности котельной. Резервные – насосы с паровым

приводом. Их подача должна быть не менее 50% номинальной паро-производительности.

**Дутьевой вентилятор** – центробежное устройство, установленное в начале воздушного тракта, подающее воздух в топку и создающее напор, необходимый для преодоления сопротивлений воздухоподогревателя, воздухопроводов, горелок или колосниковой решетки.

**Дымосос** – центробежное устройство, установленное на газовом тракте за котельным агрегатом, создающее на всасывающей стороне разрежение способствующее продвижению продуктов сгорания по газоходам, а на нагнетательной стороне напор, необходимый для преодоления сопротивлений золоуловителя, дымохода и дымовой трубы.

**Естественная тяга** – движущая сила, обусловленная разностью статических давлений между поступающим в топку воздухом и покидающими котельную установку продуктами сгорания, создаваемая дымовой трубой.

Эта сила расходуется на преодоление аэродинамических сопротивлений газового тракта котельной установки.

**Искусственная тяга** – движущая сила создаваемая совместным действием дымососа и вентилятора.

**Топливоприготовление** – совокупность устройств по подготовке топлива для сжигания.

Процесс подготовки твердого топлива для сжигания в камерной топке состоит из следующих стадий:

- удаление металла и щепы с предварительным грубым дроблением в дробильной установке;
- подсушка и размол до состояния пыли с размером частичек от 1 мкм до  $300 \div 500$  мкм в системе пылеприготовления и
- подача готовой пыли в топочные устройства.

**Мазутное хозяйство** котельной состоит из:

- приемно-сливного устройства;
- мазутонасосной станции, где производится грубая и тонкая очистка топлива от механических примесей;
- мазутохранилища
- теплообменников для разогрева мазута до температуры  $(80 \div 120)^\circ \text{C}$  перед подачей к горелочным устройствам.

Газовое хозяйство котельной несложно, относительно невысокой стоимости, надежно в эксплуатации. Газ высокого давления от 0,3 до 0,6 МПа подают к районным газораспределительным станциям (ГРС), где давление его понижают (редуцируют) до  $0,005 \div 0,3$  МПа.

Затем газ среднего давления распределяют по районным или промышленным газораспределительным пунктам (ГРП). Здесь происходит дальнейшее дросселирование газа до давления до  $0,003 \div 0,005$  МПа, которое автоматически поддерживают постоянным независимо от его расхода.

**Золоулавливание** – совокупность устройств по улавливанию летучей золы, находящейся в продуктах сгорания, с целью охраны окружающей среды от загрязнения.

При выбросе из дымовых труб частицы золы рассеиваются в атмосфере и выпадают с течением времени на поверхность земли. Максимальная концентрация твердых частиц наблюдается на расстоянии  $(8 \div 18) \cdot H$  от источника выброса (здесь:  $H$  – высота дымовой трубы).

Золоуловители, применяемые в энергетике, разделяют на следующие основные группы:

- механические сухие инерционные золоуловители, в которых частицы золы отделяются от газа под действием центробежных, инерционных или сил тяжести;

- мокрые золоуловители, в которых частицы золы удаляются из газа промывкой или орошением его водой с последующим осаждением частиц золы на смачиваемых поверхностях или улавливанием частиц на водяной пленке;

- электрофильтры, в которых частицы золы улавливают осаждением их на электродах под действием электрических сил;

- комбинированные золоуловители, в которых используют различные способы очистки.

**Золошлакоудаление** – совокупность механизмов и устройств по удалению из помещения котельной золы и шлака.

Основными способами золошлакоудаления являются: ручное, механизированное, пневматическое и гидравлическое.

Ручное золошлакоудаление применяют в небольших отопительно-производственных котельных. При этом используют узкоколейные вагонетки с опрокидывающимся кузовом.

При механизированном золошлакоудалении применяют скреперные установки, скиповые подъемники, скребковые транспортеры, шлаковыгрузатели.

При пневмошлакоудалении шлак и золу удаляют по двум схемам: нагнетательной и всасывающей. В первой схеме шлак и золу транспортируют воздухом, который подают высоконапорным венти-

лятором, а во второй схеме используют различные вакуумные механизмы.

При гидрошлакоудалении применяют или низконапорные багерные насосы, перекачивающие гидромассу, или высоконапорные гидроаппараты, смывающие золу и шлак в специальные резервуары.

### 4.3. Котельный агрегат и его элементы

**Котельный агрегат** – устройство в котором для получения пара или горячей воды требуемых параметров используют теплоту, выделяющуюся при сгорании органического топлива.

В производственных и энергетических котельных по давлению получаемого пара котельные агрегаты разделяются на следующие: низкого давления ( $0,8 \div 1,6$  МПа), среднего ( $2,4 \div 4$  МПа), высокого ( $10 \div 14$  МПа) и сверхвысокого давления ( $25 \div 31$  МПа). Паровые котельные агрегаты стандартизированы по параметрам вырабатываемого пара (Р и Т) и мощности.

Котельные агрегаты производительностью  $0,01 \div 5,5$  кг/с относятся к котлам малой мощности, производительностью до 30 кг/с к котлам средней мощности и более 30 кг/с (до  $500 \div 1000$  кг/с) – к котлам большой мощности.

Водогрейные котлы унифицированы по теплопроизводительности на восемь типов: 4, 6,5, 10, 20, 30, 50, 100 и 180 Гкал/ч. Котлы теплопроизводительностью ниже 30 Гкал/ч предназначаются для работы только в одном режиме (основном). Котлы теплопроизводительностью 30 Гкал/ч и выше допускают возможность работы как в основном, так и в пиковом режимах, т.е. в период максимального теплопотребления при наиболее низких температурах наружного воздуха.

Для котлов теплопроизводительностью до 30 Гкал/ч температура воды на выходе принимается 432 К, а давление воды на входе в котел – 1,6 МПа. Для котлов теплопроизводительностью 30 Гкал/ч и выше максимальная температура воды на выходе принимается  $450 \div 470$  К, а давление воды на входе – 2,5 МПа.

Более совершенными являются водотрубные паровые котлы. Они имеют развитые поверхности нагрева, состоящие из труб, заполненных внутри водой и пароводяной смесью, а снаружи обогреваемых продуктами сгорания топлива. Котлы относятся к горизонтально-водотрубным, если трубы расположены под углом к горизонту не более  $25^\circ$ , и к вертикально-водотрубным, если трубы идут более круто

или вертикально. В этих котлах путем изменения числа труб в пучках и числа самых пучков удалось увеличить площадь поверхности нагрева, не увеличивая диаметр их барабанов, что в свою очередь дало возможность получить в этих котлах пар высокого давления.

При работе парового котла очень важно обеспечить надежное охлаждение поверхностей нагрева, в которых происходит парообразование. Для этого необходимо соответствующим образом организовать движение воды и пароводяной смеси в испарительных поверхностях нагрева. По характеру организации движения рабочего тела в испарительных поверхностях котельные агрегаты делятся на три типа:

- 1) с естественной циркуляцией;
- 2) с принудительной циркуляцией;
- 3) прямоточные.

Принципиальная схема прямоточного котла показана на рис 4.1.

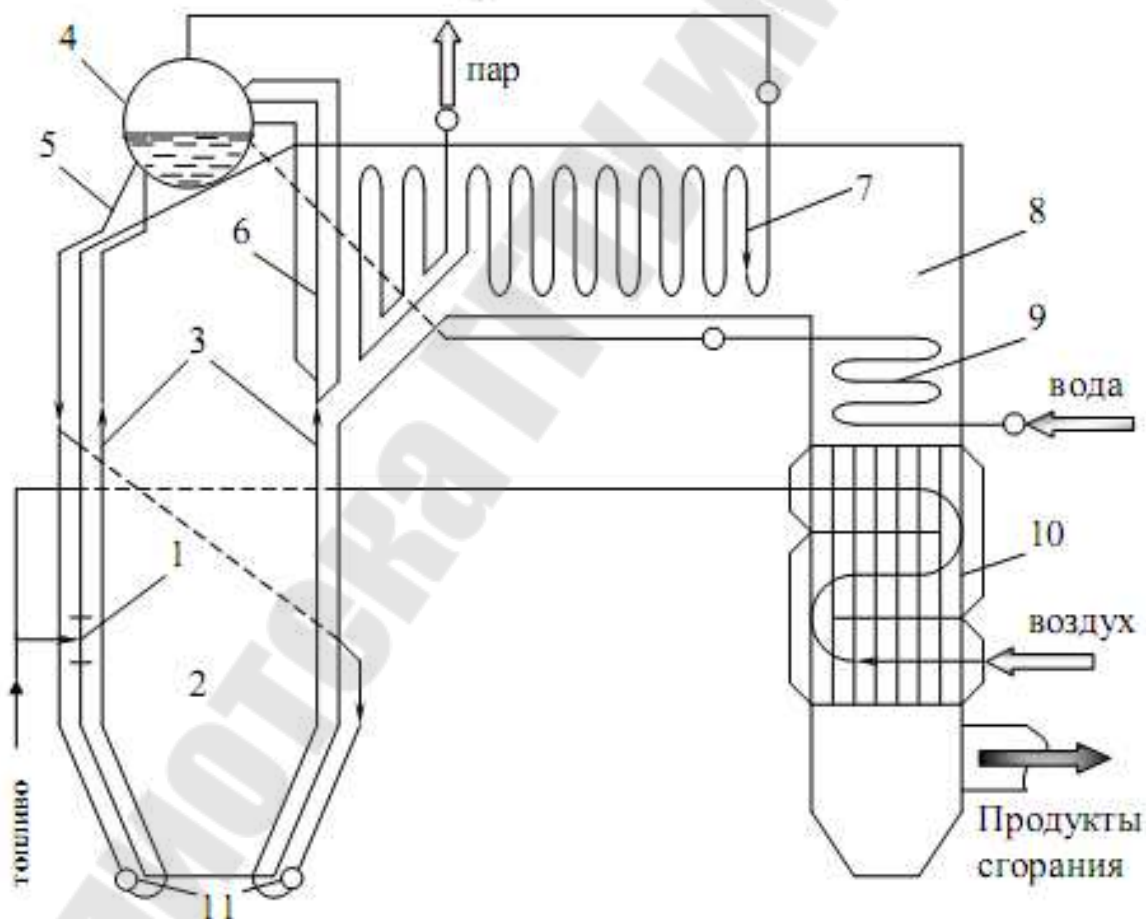


Рис. 4.1. Принципиальная схема прямоточного котла

Работа котельной установки осуществляется следующим образом. Топливо вместе с воздухом, подогретым в воздухоподогревателе 10, поступает в топочную камеру 2 через горелку 1. На стенах топочной камеры расположены экраны 3, состоящие из большого числа вертикальных труб, которые соединены в верхней части с барабаном котла 4, а в нижней части – с коллекторами 11.

Образующиеся в результате процесса горения дымовые газы направляются в газоходы котла, омывая при этом первоначально фестоны 6, расположенные на выходе из топки.

После топочной камеры продукты сгорания проходят через пароперегреватель 7, а затем по опускающему газоходу через экономайзер 9 и воздухоподогреватель 10.

Вода питательными насосами подается в экономайзер, затем она подается в верхний барабан котла. Из барабана вода по опускающим трубам 5 поступает в коллектора. Из коллекторов вода поступает в экранные трубы 3, образуемая в них пароводяная смесь поступает в барабан котла.

Опускающие трубы и коллекторы прокладывают вне топочного пространства. Это создает возможность для осуществления естественной циркуляции воды и пароводяной смеси за счет разности масс столбов воды в опускающих и экранных трубах.

Принудительную циркуляцию воды в паровом котле можно организовать за счет специального насоса, установленного на опускающих трубах.

Принудительная циркуляция воды позволяет увеличить скорость движения и располагать парообразующие трубы в топке любым образом (наклонно, горизонтально), исходя из размещения котла в ограниченных по высоте помещениях и более удобно его конструировать.

**Состав котельного агрегата.** Котельный агрегат в общем случае состоит из:

- топки;
- поверхностей нагрева: топочных экранов, фестона, кипятильных пучков, пароперегревателя, водяного экономайзера и воздухоподогревателя;
- арматуры;
- гарнитуры;
- каркаса;
- обмуровки.

**Поверхности нагрева** – трубчатые поверхности, которые с одной стороны получают теплоту от раскаленного слоя топлива или факела, заполняющего топку, или от движущихся продуктов сгорания с высокой температурой, а с другой стороны отдают теплоту или движущемуся пару, или воде, или воздуху.

Поверхности нагрева подразделяют по преобладающему способу тепловосприятия на радиационные и конвективные, а по происходящим процессам преобразования рабочего тела различают нагревательные (экономайзерные), испарительные (парообразующие или кипяtilьные) и пароперегревательные поверхности.

**Топочные экраны (экранные трубы)** – радиационные поверхности, расположенные в одной плоскости возле внутренней поверхности стен топочной камеры и способствующие уменьшению теплового потока от продуктов сгорания к обмуровке.

Они являются наиболее интенсивно работающими парообразующими поверхностями нагрева, поскольку воспринимают теплоту излучения от горящего слоя или факела топлива, которая в условиях топки является наиболее эффективным способом теплопереноса.

**Фестон** – полурadiационная поверхность нагрева, располагаемая в выходном окне топки и образованная, как правило, трубами заднего экрана, разведенными в несколько рядов.

**Кипяtilьный (котельный) пучок** – система параллельно включенных труб конвективной парообразующей поверхности котельного агрегата, соединенных общими коллекторами или барабанами.

**Коллектор** – горизонтально расположенная, как правило, труба, к которой приварен ряд или ряды труб топочного экрана, фестона или пароперегревателя и имеющая больший диаметр, чем трубы перечисленных поверхностей нагрева, предназначенная для разделения потока рабочего тела (воды или пара) наряд параллельных потоков или их объединения.

**Барабан** – горизонтально расположенный толстостенный полый стальной цилиндр большого диаметра имеющий ряды отверстий цилиндрической формы, в которые вварены или завальцованы трубы кипяtilьного пучка.

Нижний барабан котельного агрегата полностью заполнен водой с температурой насыщения и кроме объединения труб кипяtilьного пучка выполняет роль шлакоотстойника.

Верхний барабан кроме объединения труб кипятильного пучка выполняет роль сепаратора (разделителя) потоков пароводяной смеси поступающей по трубам на влажный насыщенный пар и кипящую воду. Из верхней его части отводят пар в пароперегреватель или к потребителю, а из нижней части вода поступает в опускные трубы контуров циркуляции.

**Пароперегреватель** – устройство состоящее из двух или более коллекторов соединены стальными трубами змеевиками и предназначенное для подсушки влажного насыщенного пара и последующего перегрева сухого насыщенного пара до требуемой температуры.

По способу тепловосприятия пароперегреватели могут быть радиационными, полурadiационными и конвективными.

В зависимости от взаимного направления движения продуктов сгорания и водяного пара их подразделяют на прямоточные, противоточные и пароперегреватели со смешанным током.

**Водяной экономайзер** – устройство состоящее из двух или более коллекторов соединенных стальными трубами змеевиками или из чугунных оребренных труб последовательно соединенных фасонными патрубками-калачами предназначенное для предварительного подогрева питательной воды, поступающей в верхний барабан парового котельного агрегата или нагрева воды, циркулирующей в системах отопления, вентиляции и горячего водоснабжения.

Вода подогревается продуктами сгорания, отходящими из котла, благодаря чему уменьшаются потери теплоты с уходящими дымовыми газами, повышается КПД, и, следовательно, уменьшается расход топлива.

**Воздухоподогреватель рекуперативный** – устройство, состоящее из стального корпуса, тонкостенных труб, двух стальных досок (трубных решеток), к которым приварены концы труб, и двух патрубков один для подачи холодного воздуха, другой для выхода горячего воздуха и предназначенное для подогрева воздуха, подаваемого в топку, за счет теплоты уходящих дымовых газов.

Воздухоподогреватели предназначены для подогрева воздуха поступающего на процесс горения, что уменьшает потери тепла и соответственно увеличивает КПД.

**Арматура** – устройства, устанавливаемые на трубопроводах или сосудах для управления потоками воды или пара путем изменения проходных сечений с помощью перемещения (поворота) рабочего органа (затвора).



К арматуре относят: вентили, задвижки, обратные и предохранительные клапаны и т.п., которые по способу соединения с трубопроводами подразделяют на фланцевые, муфтовые и сварные. По назначению различают арматуру:

- запорную, предназначенную для перекрытия потока;
- регулирующую для изменения расхода среды;
- распределительно-смесительную для распределения среды по определенным направлениям или для смешивания потоков;
- предохранительную для защиты оборудования при отклонении параметров среды за допустимые пределы;
- обратную, автоматически предотвращающую обратное движение среды;
- фазораспределительную, обеспечивающую автоматическое разделение рабочей среды по фазовому состоянию (конденсатоотводчики).

**Гарнитура** – устройства, установленные на стенах топки и газоходов, которые обеспечивают возможность наблюдения за топкой и поверхностями нагрева во время работы котельного агрегата, облегчают проникновение во внутрь его и проведение ремонта.

Это лазы, лючки, гляделки, взрывные клапаны и др.

Лазы устанавливают в топке и газоходах для обеспечения проникновения людей и подачи материала и инструмента при внутренних осмотрах и при ремонте. Их изготавливают, как правило, круглого сечения с внутренним проходом (450 ÷ 500) мм.

Лючки предназначены для ввода в газоходы измерительной и диагностической аппаратуры, инструмента и приспособлений, используемых при ремонте и эксплуатации котельного агрегата.

Гляделки используют для проведения измерений во время испытания котельного агрегата и для визуального наблюдения за протеканием процесса горения и за состоянием внутренних поверхностей топки.

Взрывные клапаны устанавливают на боковых и потолочных стенах топки и газоходов с целью устранения или уменьшения разрушений обмуровки при хлопках и взрывах в топочной камере.

**Каркас** – пространственная рамная металлоконструкция предназначенная для крепления поверхностей нагрева и трубопроводов, ограждений, изоляции, площадок обслуживания и других элементов котельного агрегата.

**Обмуровка** – многослойная конструкция из кирпичей и плит изготовленных из термостойких низко теплопроводных материалов, предназначенная для уменьшения потерь теплоты в окружающую среду, для защиты обслуживающего персонала от ожогов и обеспечения газовой плотности агрегата.

В качестве жаростойких ( $1300 \div 1600$  °С) применяют шамотные изделия. Диатомовые изделия применяют до температуры  $900$  °С, а при более низких температурах применяют перлитные, асбовермикулитные, асбодуритные материалы, асбест, красный кирпич и др.

#### 4.3.1. Паровые котлы

*Котел паровой* - сосуд давления, в котором нагревается вода, превращающаяся в пар. Тепловая энергия, подводимая к паровому котлу, может представлять собой тепло от сгорания топлива, электрическую, ядерную, солнечную или геотермальную энергию. Поскольку котел дает только насыщенный пар, его следует отличать от парогенератора, в состав которого в качестве неотъемлемых и необходимых агрегатов могут входить пароперегреватели, экономайзеры и воздухоподогреватели. Котлы применяются как источники пара для отопления зданий и питания технологического оборудования в промышленности, а также машин и турбин, приводящих в действие электрогенераторы. Самые малые паровые котлы бытового назначения дают ок. 20 кг пара в час при давлениях порядка атмосферного. В то же время котлы крупнейших электростанций производят до 4500 т пара в час при давлениях до 28 МПа. Такие давления называются сверхкритическими, поскольку они превышают критическое давление воды (22,1 МПа), при котором вода превращается в пар. Большой паровой котел такого типа может, потребляя несколько сот тонн пылевидного угля в час, производить столько пара при  $550$  °С, сколько необходимо для выработки 1300 МВт электроэнергии. На рис. 1-3 представлены схемы (с указанием основных агрегатов) одного газотрубного и двух водотрубных котлов. Во всех этих котлах имеется топочная камера, в которой сжигается топливо. Горячие газообразные продукты горения уходят из зоны горения и на своем пути омывают поверхности паробразующих (кипятильных) труб, расположенных в газовом тракте. Проходя по шахте котла, эти газы охлаждаются от максимальной температуры в топочной камере до самой низкой в дымоходе. Тепло, отдаваемое газами, поглощается водой, которая нагревается и испаряется. Процесс испарения вызывает естественную циркуляцию (прину-

дительная циркуляция создается механическими средствами - насосами).

*Типы паровых котлов.* Существуют два основных типа паровых котлов: газотрубные и водотрубные. Все котлы (жаротрубные, дымогарные и дымогарно-жаротрубные), в которых высокотемпературные газы проходят внутри жаровых и дымогарных труб, отдавая тепло воде, окружающей трубы, называются газотрубными. В водотрубных котлах по трубам протекает нагреваемая вода, а топочные газы омывают трубы снаружи. Газотрубные котлы опираются на боковые стенки топки, тогда как водотрубные обычно крепятся к каркасу котла или здания.

#### *Газотрубные котлы*

В современной теплоэнергетике применение газотрубных котлов ограничивается тепловой мощностью ок. 360 кВт и рабочим давлением около 1 МПа. Дело в том, что при проектировании сосуда высокого давления, каким является котел, толщина стенки определяется заданными значениями диаметра, рабочего давления и температуры. При превышении же указанных предельных параметров требуемая толщина стенки оказывается неприемлемо большой. Кроме того, необходимо учитывать требования безопасности, так как взрыв крупного парового котла, сопровождающийся мгновенным выбросом больших объемов пара, может привести к катастрофе. При современном уровне техники и существующих требованиях к безопасности газотрубные котлы можно считать устаревшими, хотя пока еще находятся в эксплуатации многие тысячи таких котлов тепловой мощностью до 700 кВт, обслуживающих промышленные предприятия и жилые здания (рис. 4.2).

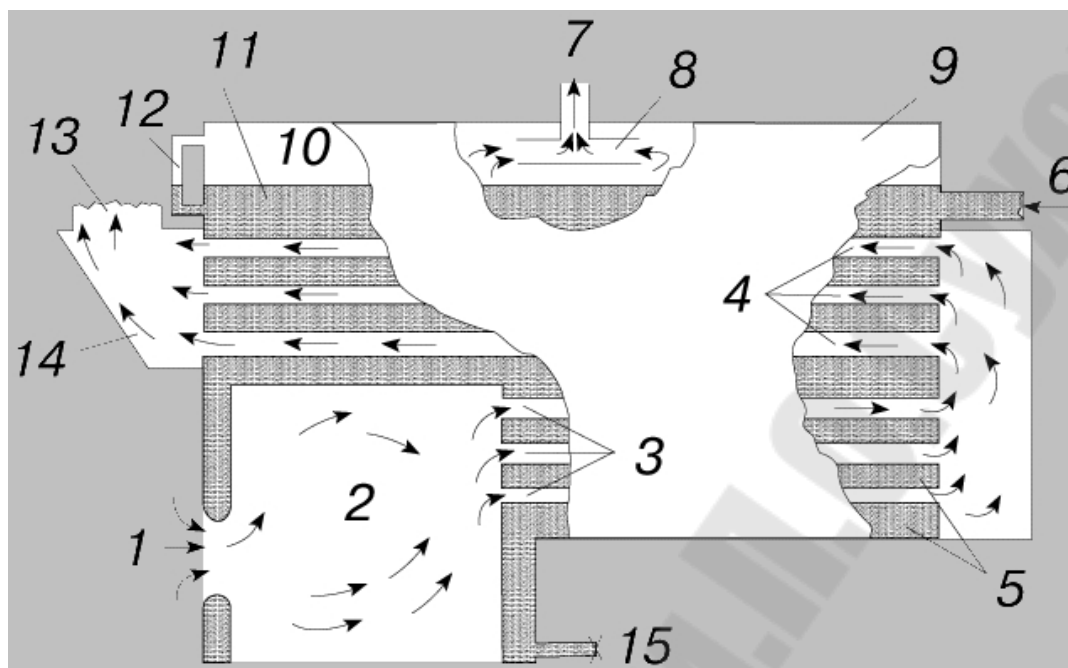


Рис. 4.2. Горизонтальный оборотный дымогарный газотрубный паровой котел:

1 - подвод топлива и воздуха; 2 - топочная камера; 3 - дымогарные трубы прямого прохода; 4 - дымогарные трубы обратного прохода; 5 - задняя трубная решетка; 6 - вход воды; 7 - выход пара; 8 - сепаратор пара; 9 - барабан; 10 - пар; 11 - вода; 12 - водомерное стекло; 13 - дымоход к дымовой трубе; 14 - дымовой короб; 15 - слив

#### *Водотрубные котлы*

Водотрубный котел был разработан в связи с непрерывно растущими требованиями повышения паропроизводительности и давления пара. Дело в том, что, когда пар и вода повышенного давления находятся в трубе не очень большого диаметра, требования к толщине стенки оказываются умеренными и легко выполнимыми. Водотрубные паровые котлы по конструкции значительно сложнее газотрубных. Однако они быстро разогреваются, практически безопасны в отношении взрыва, легко регулируются в соответствии с изменениями нагрузки, просты в транспортировке, легко перестраиваемы в проектных решениях и допускают значительную перегрузку. Недостатком водотрубного котла является то, что в его конструкции много агрегатов и узлов, соединения которых не должны допускать протечек при высоких давлениях и температурах. Кроме того, к агрегатам такого котла, работающим под давлением, затруднен доступ при ремонте. Водотрубный котел состоит из пучков труб, присоединенных своими

концами к барабану (или барабанам) умеренного диаметра, причем вся система монтируется над топочной камерой и заключается в наружный кожух. Направляющие перегородки заставляют топочные газы несколько раз проходить через трубные пучки, благодаря чему обеспечивается более полная теплоотдача. Барабаны (разной конструкции) служат резервуарами воды и пара; их диаметр выбирается минимальным во избежание трудностей, характерных для газотрубных котлов (см. выше). Водотрубные котлы бывают следующих типов: горизонтальные с продольным или поперечным барабаном, вертикальные с одним или несколькими паровыми барабанами, радиационные, вертикальные с вертикальным или поперечным барабаном и комбинации перечисленных вариантов, в некоторых случаях с принудительной циркуляцией.

#### 4.3.2. Водогрейные котлы

*Водогрейный котел* – это устройство, предназначенное для нагрева воды за счет сжигания топлива или использования электрической энергии.

Аналогично паровым котлам существуют два типа водогрейных котлов:

1) *Водотрубный водогрейный котел* – водогрейный котел, в котором вода движется внутри труб поверхностей нагрева, а продукты сгорания топлива снаружи труб.

2) *Газотрубный водогрейный котел* – водогрейный котел, в котором продукты сгорания топлива проходят внутри труб поверхностей нагрева, а вода снаружи труб.

Различают жаротрубные, дымогарные и жаротрубно-дымогарные водогрейные котлы.

Преимущества конструкции жаротрубных (и дымогарных) котлов перед водотрубными:

- меньшие габариты;
- простота очистки поверхностей нагрева от сажевых отложений;
- большой диапазон возможного регулирования снимаемой мощности;
- меньшее гидравлическое сопротивление (а значит и меньшие затраты на насосы и электроэнергию);
- высокая ремонтпригодность.

Но в конструкции жаротрубных котлов есть свои недостатки:

- При неграмотном подходе со стороны проектировщиков и эксплуатационных служб в первые же годы могут возникнуть проблемы в виде вздутий, трещин и течи теплообменника.

- Для предотвращения кипения в водотрубных котлах конструкцией уже предусмотрена скорость воды у поверхности нагрева не менее 1 м/с. А вот у жаротрубного без специальных технических решений она настолько мала, что осадок частиц практически неизбежен. То есть водоподготовка таких котельных сама по себе не решает задачи устойчивости работы. На дне теплообменника при отсутствии защиты его футеровочным сводом образуются вздутия из-за шлама и накипи.

- На трубной доске при недостаточном теплообмене из-за нарушения правильной циркуляции дымовые газы создают локальный перегрев и в сварных швах появляются трещины, которые в дальнейшем только увеличиваются.

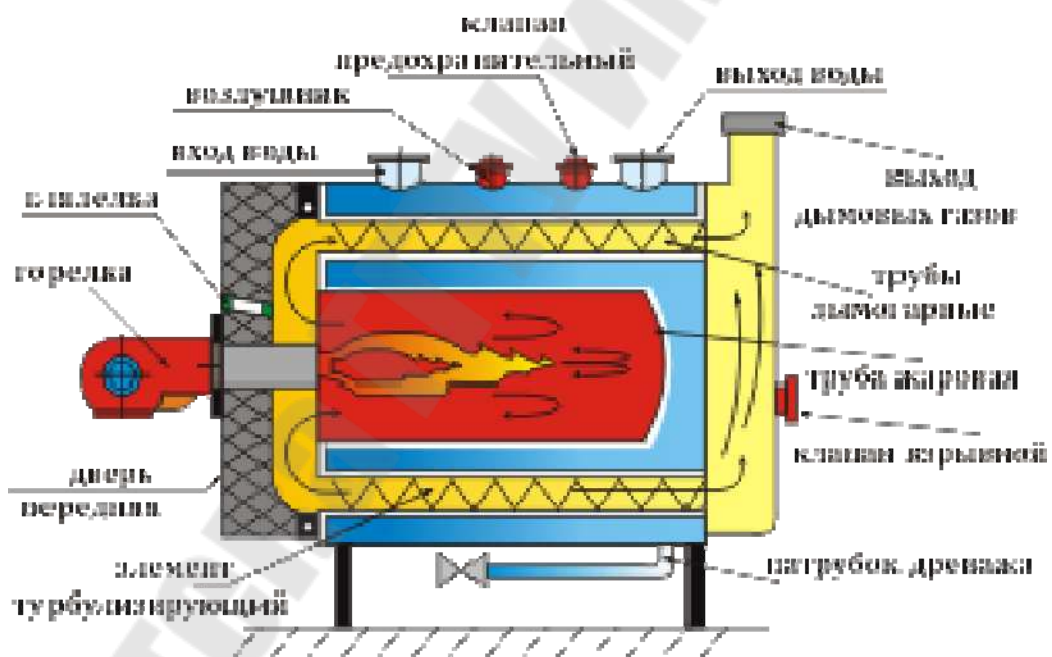


Рис. 4.3. Жаротрубно-дымогарный водогрейный котел

*Прямоточный водогрейный котел* – водогрейный котел с последовательным однократным принудительным движением воды.

*Стационарный водогрейный котел* – водогрейный котел, установленный на неподвижном фундаменте.

*Электрический водогрейный котел* – водогрейный котел, в котором для нагрева воды используется электрическая энергия.

### ***Классификация водогрейных котлов:***

**1) В зависимости от мощности** водогрейные котлы разделяют на:

- котлы малой мощности (теплопроизводительность от 4 кВт до 65 кВт);
- котлы средней мощности (теплопроизводительность от 70 кВт до 1750 кВт);
- котлы большой мощности (теплопроизводительность от 1800 кВт и выше).

**2) По температурному уровню** – в зависимости от температуры получаемого в водогрейных котлах теплоносителя их разделяют на:

- низкотемпературные котлы (температура теплоносителя до 115 °С);
- котлы на перегретой воде (температура до 150 °С, а в отдельных случаях и выше).

**3) По материалу тепловоспринимающих поверхностей** водогрейные котлы разделяют на:

- чугунные;
- стальные.

### **4.3.3. Котлы-утилизаторы**

В зависимости от роли котлоагрегатов в основном технологическом процессе различают котлы-утилизаторы и котлы энерготехнологические.

К котлам-утилизаторам относятся установки, без которых основной технологический процесс может протекать без изменений, к ним относятся котлы-утилизаторы работающие на запечных газах,

К энерготехнологическим котлам относятся установки, без которых основной технологический процесс не может протекать **или** претерпевает существенные изменения при их отключении. К таким относятся системы принудительного охлаждения технологических агрегатов, а также котлы для охлаждения продукционных потоков.

Во всех без исключения установках одним из основных факторов является выбор вида и параметров охлаждающей среды. В котлах, использующих вторичные энергоресурсы осуществляют подогрев сетевой воды. Котлы вырабатывают насыщенный или перегретый пар. Выбор параметров пара определяется свойствами теплоносителя, его химическим составом (запыленность, коррозионная активность), а

также количеством тепла, содержащегося в отходящих газах; возможностями использования тепла на месте (тепловой схемой технологического процесса) на технологические нужды, теплоснабжение или выработку электроэнергии. В связи с этим выбору параметров пара для каждого объекта использования должно быть уделено большое внимание.

Разработка мер по использованию пара за счет вторичных энергоресурсов на технологические нужды, выработку электроэнергии, теплоснабжение и в комбинированных схемах требует детального изучения тепловых балансов производств и разработки типовых решений с учетом технико - экономического обоснования по использованию пара от котла. Параметры пара также зависят от стабильности работы (технологического режима) основного агрегата - печи.

Технико-экономическое обоснование должно производиться при выборе типа котла для каждого конкретного случая.

Таким образом, использование вторичных энергоресурсов любых видов в технологических процессах связано с повышением энергетической эффективности, улучшением показателей технологических процессов и условий защиты окружающей среды, то есть в единый процесс сведены технология и энергетика.

Энерготехнологические котлы и котлы-утилизаторы можно классифицировать по:

- отраслям промышленности, в которых используются вторичные энергоресурсы: котлы для черной и цветной металлургии, химической промышленности; сернокислотного и азотного производств, целлюлозно- бумажной, строительной, нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности;

- уровню температур используемого в котлах теплоносителя: высокотемпературные (температура газов перед охлаждением в котле  $> 1000^{\circ}\text{C}$  и низкотемпературные (температура газов  $< 1000^{\circ}\text{C}$ );

- технологическим агрегатам, за которыми или в которых устанавливаются теплоиспользующие котлы: за мартеновскими пенами, конвертерами, обжиговыми с кипящим слоем, флюминговыми, нагревательными, шлаковозгонными, прокалочными, шахтными, отражательными печами, за печами кислородно-взвешенной плавки, сухого тушения кокса и др.;

- способу передачи тепла в поверхностях нагрева: конвективные (тепло от газов преимущественно отнимается конвекцией); ра-



диационные (тепло преимущественно передается радиационным способом): радиационно- конвективные;

- конструктивному признаку: газотрубные; водотрубные (с принудительной или естественной циркуляцией пароводяной смеси).

На рис. 4.4. показан котел Г-250 с пароперегревателем, с площадью испарительной поверхности нагрева котла  $250 \text{ м}^2$ . Отходящие газы технологического агрегата поступают во входную камеру, проходят через трубы и через выходную камеру удаляются в атмосферу. Испарительная поверхность нагрева выполнена из труб диаметром 50 мм с толщиной стенки 3 мм. В верхней части барабана расположено сепарационное устройство, представляющее собой пароприемный короб и дырчатые листы.

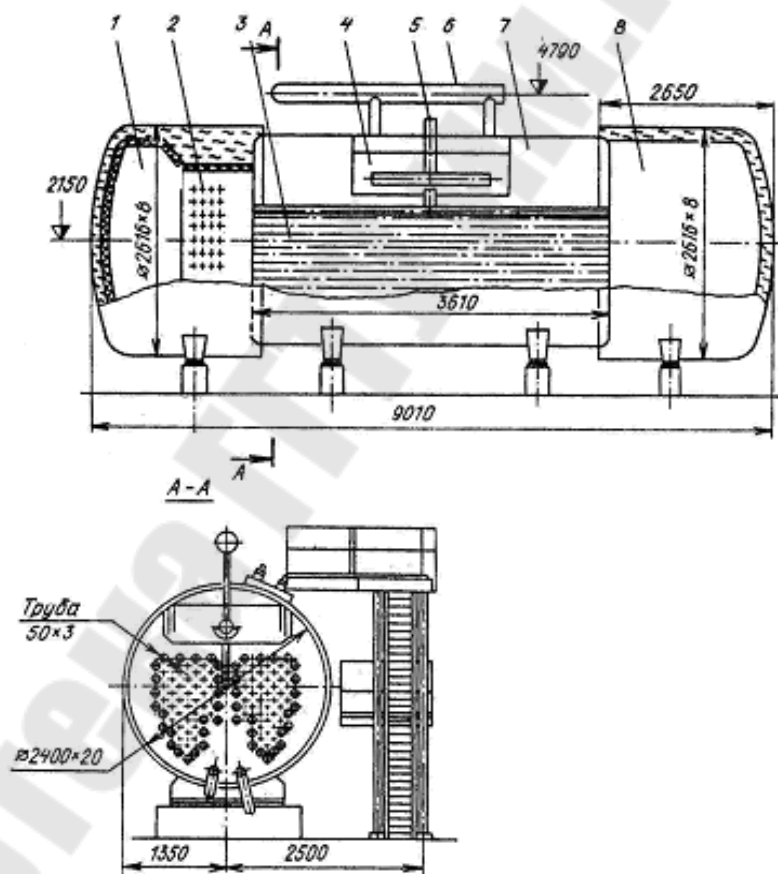


Рис. 4.4. Котел-утилизатор Г-250:

1 – входная камера; 2 – трубы пароперегревателя; 3 – трубы испарителя; 4 – паросепарационное устройство; 5 – подвод питательной воды; 6 – паровой коллектор, 7 – испарительный барабан; 8 – выходная камера

#### 4.4. Каркас и обмуровка котла

Металлическая конструкция, опирающаяся на бетонный фундамент и поддерживающая барабан котла и трубную систему с водой, лестницы и помосты, а иногда и обмуровку, представляет собой каркас котельного агрегата. В настоящее время чаще всего применяют опорные (несущие) и обвязочные каркасы.

Паровые и водогрейные котлы малой мощности обычно имеют обвязочные каркасы, служащие для укрепления обмуровки, гарнитуры и других деталей. Масса металлической части котлов через специальные стойки или рамы передается непосредственно на фундамент.

Котлы вертикальной ориентации большой мощности обычно имеют несущий каркас (рис. 4.5), который состоит из вертикальных колонн 1, горизонтальных балок, горизонтальных ферм 5, раскосов-связей 2 и упрочненной конструкции из балок 6 потолочного перекрытия. Колонны крупных котлов изготавливаются из сварных профильных балок большого размера.

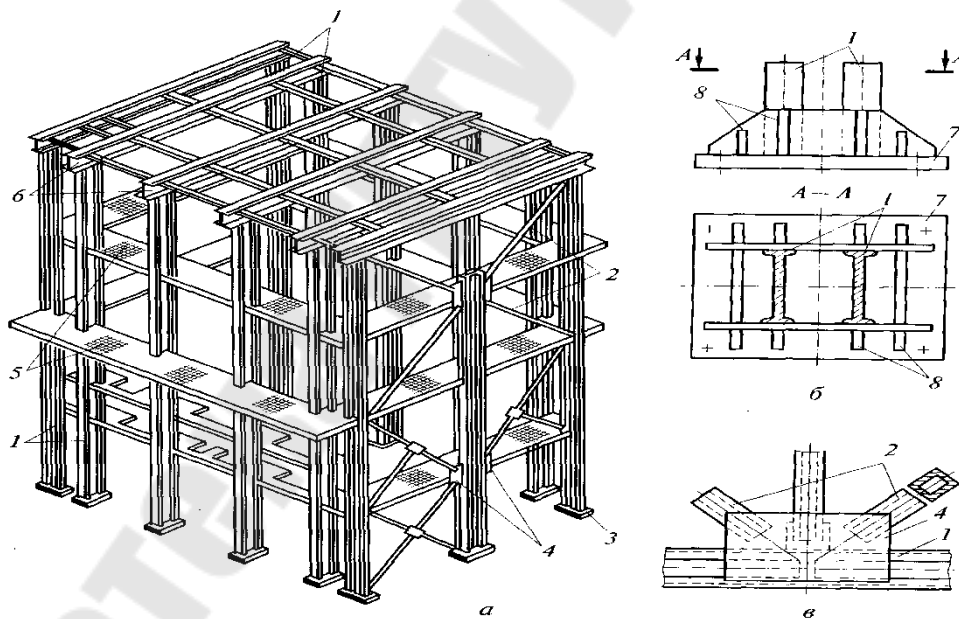


Рис. 4.5. Каркас котла и его элементы:

- а - общий вид; б - башмак; в - сочленение балок с раскосами:  
1 - колонны; 2 - раскосы-связи; 3 - опорный башмак; 4 - накладки;  
5 - горизонтальные фермы (площадки); 6 - балки потолочного  
перекрытия; 7- опорная плита; 8 - ребра жесткости

Для уменьшения удельной нагрузки на фундамент под колонны устанавливают опорные башмаки 3, состоящие из опорных плит 7 и ребер жесткости 8. Раскосы-связи 2 фермы выполняют из профильного проката (швеллера, двутавра), связывая их между собой (сваривая) накладками 4.

Горизонтальные фермы 5, балки и раскосы-связи 2 применяют для придания поперечной устойчивости колоннам и повышения жесткости каркаса.

Для уменьшения термических напряжений в каркасе основные несущие его элементы располагают за пределами газоходов и их обмуровки. Сочленения же оборудованных балок (например, опорных балок поверхностей нагрева конвективной шахты) с балками каркаса выполняются в виде скользящей опоры с одной стороны, при неподвижном креплении – с другой.

Лестницы и площадки, используемые для обслуживания и ремонта котла, часто размещают на горизонтальных фермах или опираются на них. Их выполняют из сортового проката, покрывая проходные площадки просечно-вытяжным или рифленным листом.

Обмуровка котла служит для ограждения топочной камеры и газоходов от окружающей среды и для направления движения потока дымовых газов в пределах котельного агрегата. Она работает при достаточно высоких температурах и резком их изменении и должна обеспечивать минимальные потери теплоты в окружающую среду, быть плотной, механически прочной, простой и доступной для ремонта.

Обмуровки принято условно подразделять на тяжелые, облегченные и легкие, а по способам крепления - на свободно стоящие (на фундаментах), накаркасные (опирающиеся на каркас) и натрубные.

Внутренняя часть свободно стоящей обмуровки (рис. 4.6, а), обращенная в сторону высоких температур, выполняется из огнеупорного кирпича и называется футеровкой. Наружная часть обмуровки, называемая облицовкой, выполняется из строительного кирпича.

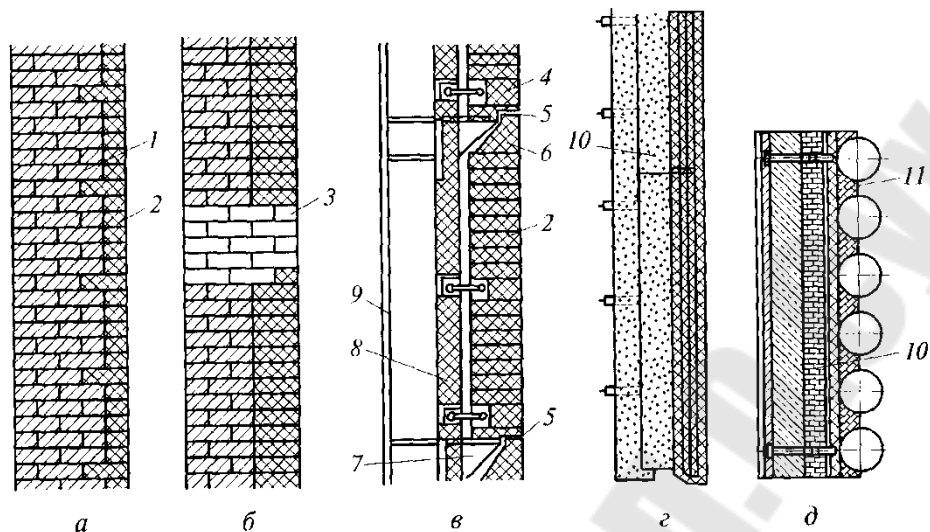


Рис. 4.6. Обмуровка котельного агрегата:

а - свободно стоящая; б - массивная; в - облегченная накаркасная; г - щитовая; д – натрубная: 1, 2 - красный и шамотный кирпич; 3 - перевязочный ярус; 4, 6 - шамотные и фасонные шамотные кирпичи; 5 - температурный шов; 7- кронштейн; 8 - металлическая обшивка; 9 - разгрузочный пояс; 10 - теплоизоляционная плита; 10 - хромитовая или шамотная масса.

Кирпичную массивную (рис. 4.6, б) обмуровку с перевязочным ярусом из огнеупорного материала выполняют в котлах небольшой производительности. Для котлов производительностью 50...75 т/ч и выше применяют облегченную накаркасную обмуровку (рис. 4.6, в), состоящую из слоя шамотного 4 и шамотного фасонного 6 кирпичей, образующих футеровку, и слоя легковесной теплоизолирующей шамотной массы. Через каждые 2,5...3 м устанавливают разгрузочные кронштейны, на которые опирается обмуровка.

Щитовую (рис. 4.6, г) обмуровку выполняют в виде отдельных прямоугольных щитов, которые укреплены на каркасе котла. Щит делают многослойным из огнеупорного бетона, армированного стальной сеткой, и теплоизолирующих слоев.

Натрубная (рис. 4.6, д) обмуровка крепится непосредственно к трубам и состоит из слоя хромитовой или шамотной массы и изоляционного слоя из минераловатных матрасов, на которые нанесена газонепроницаемая магнезиальная обмазка.

## 4.5. Гарнитура котла

Для обслуживания топки и газоходов в котельном агрегате используется следующая гарнитура: лазы, закрываемые дверцы, гляделки, взрывные клапаны, шиберы, поворотные заслонки, обдувочные аппараты, дробеочистка.

Закрываемые дверцы, лазы в обмуровке предназначены для осмотра и производства ремонтных работ при останове котла. Для наблюдения за процессом горения топлива в топке и состоянием конвективных газоходов служат гляделки. Взрывные предохранительные клапаны используются для защиты обмуровки от разрушения при хлопках в топке и газоходах котла и устанавливаются в верхних частях топки, последнего газохода агрегата, экономайзера и в своде.

Размещение, число и размеры предохранительных клапанов выбираются проектной организацией из расчета  $250 \text{ см}^2$  площади взрывного клапана на  $1 \text{ м}^3$  объема топки или газоходов котла.

Взрывные клапаны представляют собой рамки из углового железа круглой или квадратной формы, закрытые листовым асбестом толщиной 2...2,5 мм, плотно закрепленные в соответствующих проемах, сделанных в кладке топки и дымоходах котла. В случае взрыва давлением образовавшихся газов асбестовый картон прорывается, и газы получают выход наружу, благодаря чему давление их падает и снижается возможность опасного разрушения. В момент взрыва створка клапана после разрушения картона откроется, а после выхода газов наружу через газоотводящий короб под действием своего веса или специальных грузов закроется.

При работе на газообразном топливе, чтобы предотвратить скопление горючих газов в топках, дымоходах и боровых котельной установки во время перерыва в работе, в них всегда должна поддерживаться небольшая тяга; для этого в каждом отдельном борове котла к сборному борову должен быть свой шибер с отверстием в верхней части диаметром не менее 50 мм.

Обдувочные аппараты и дробеочистка предназначены для очистки поверхностей нагрева от золы и сажи.

## 4.6. Конструкция топочных экранов

Как указано выше, топочные экраны получают до 50% всего тепловосприятия рабочей среды в котле. Они находятся в зоне наиболее

высоких температур газов и требуют тщательного конструктивного выполнения для обеспечения надежной работы металла труб. По конструкции различают экраны *гладкотрубные*, в которых трубы расположены вдоль стены топки с небольшим зазором 4-6 мм (рис. 4.7) и *газоплотные*, которые могут быть выполнены двух типов: либо из таких же гладких труб, но с вваренными между ними проставками шириной 6-12 мм (рис. 4.7, б), либо с применением специальных плавниковых труб, сваренных между собой (рис. 4.7, в).

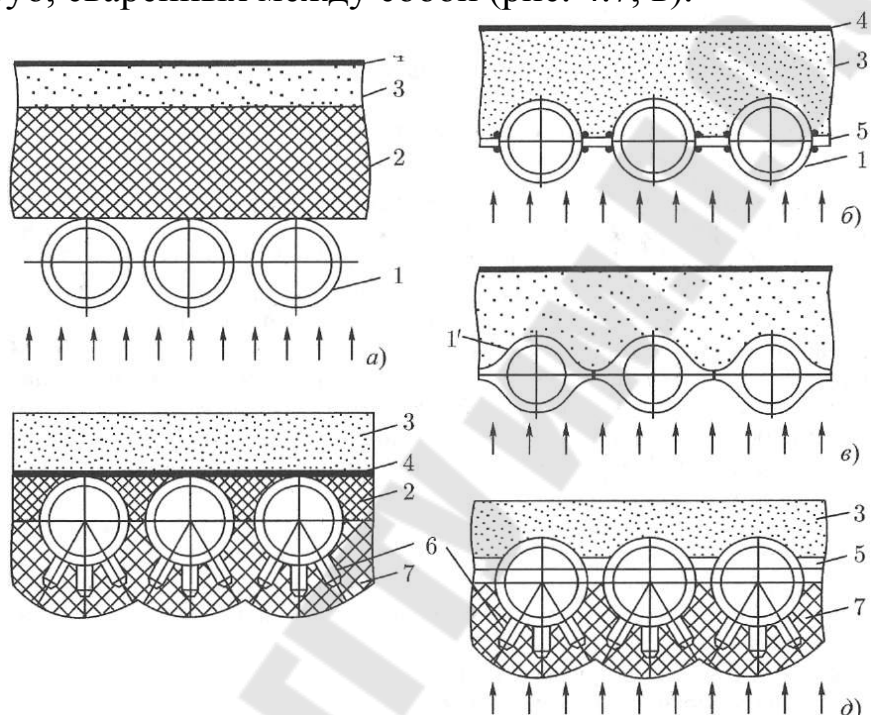


Рис. 4.7. Типы экранирования топки:

а - гладкотрубный экран; б - то же с вварными проставками (мембранный); в - газоплотный экран из плавниковых труб; г - футерованный гладкотрубный экран; д - футерованный мембранный экран: 1 - труба; 1' - плавниковая труба; 2 - огнеупорный бетон; 3 - тепловая изоляция; 4 - уплотнительный слой (обмазка, металлический лист); 5 - металлическая проставка; 6 - приварные шипы; 7 - огнеупорная масса

Экраны из таких сварных между собой панелей образуют монолитную цельносварную газоплотную конструкцию. Их называют *мембранными*.

Для образования в топке зоны устойчивого воспламенения малореакционных топлив, требующих высокой температуры для их интенсивного горения, экраны всех типов на соответствующих участках покрывают огнеупорной массой с закреплением ее на приваренных к

трубам шипах. Такие экраны называют *футерованными* экранами (рис. 4.7, д).

Гладкотрубные экраны применяют в паровых котлах всех систем, работающих под разрежением газового тракта. При естественной циркуляции в целях повышения надежности движения рабочей среды в трубах топочные экраны располагают почти исключительно вертикально и в отдельных случаях круто наклонно. Парообразующие поверхности нагрева прямоточных котлов и котлов с многократной принудительной циркуляцией можно ориентировать в пространстве любым способом, выполняя топочные экраны вертикальными, горизонтальными и подъемно-опускными, поскольку здесь есть возможность организации движения пароводяной смеси со скоростью, предотвращающей нарушение гидравлических режимов.

#### 4.7. Барабаны паровых котлов

Следует отметить многоцелевое назначение барабанов паровых котлов, в частности, в них осуществляются следующие процессы:

- ✓ разделение пароводяной смеси, поступающей из подъемных обогреваемых труб, на пар и воду и сбор пара;
- ✓ прием питательной воды из водяного экономайзера либо непосредственно из питательной магистрали;
- ✓ внутрикотловая обработка воды (термическое и химическое умягчение воды);
- ✓ непрерывная продувка;
- ✓ осушка пара от капелек котловой воды;
- ✓ промывка пара от растворенных в нем солей;
- ✓ защита от превышения давления пара.

Барабаны котлов изготовляют из котельной стали со штампованными днищами и лазом. Внутреннюю часть объема барабана, заполненную до определенного уровня водой, называют водяным объемом, а заполненную паром при работе котла - паровым объемом. Поверхность кипящей воды в барабане, отделяющая водяной объем от парового, называется *зеркалом испарения*. В паровом котле горячими газами омывается только та часть барабана, которая с внутренней стороны охлаждается водой. Линия, отделяющая обогреваемую газами поверхность от необогреваемой, называется *огневой линией*.

Пароводяная смесь поступает по подъемным кипяtilьным трубам, ввальцованным в днище барабана. Из барабана вода по опускающим трубам подается в нижние коллекторы.

На поверхности зеркала испарения возникают выбросы, гребни и даже фонтаны, при этом в пар может попасть значительное количество капелек котловой воды, что снижает качество пара в результате повышения его солесодержания. Капли котловой воды испаряются, а соли, содержащиеся в них, осаждаются на внутренней поверхности пароперегревателя, ухудшая теплообмен, в результате которого повышается температура его стенок, что может привести к их пережогу. Соли могут также откладываться в арматуре паропроводов и привести к нарушению ее плотности.

#### 4.8. Классификация топочных устройств

*Топочное устройство*, или *топка*, являясь основным элементом котельного агрегата, предназначена для сжигания топлива с целью выделения заключенного в нем тепла и получения продуктов сгорания с возможно большей температурой. В то же время топка служит теплообменным устройством, в котором происходит теплоотдача излучением из зоны горения на более холодные окружающие поверхности нагрева котла, а также устройством для улавливания и удаления некоторой части очаговых остатков при сжигании твердого топлива.

В общем случае топка представляет собой камеру, в которую подается топливо (твердое, жидкое, газообразное) и окислитель, обычно воздух. В топке котлоагрегатов продукты сгорания отдают свою теплоту теплоносителю (воде, пару), циркулирующему по трубам, которые размещаются на стенах камеры. В печных топках теплота дымовых газов используется в рабочем пространстве печи для тепловой обработки материалов (или изделий) либо для отопления.

По способу сжигания топлива различают топки:

- со слоевым сжиганием.

**Слоевая топка** - техническое устройство, предназначенное для сжигания твердого кускового топлива, имеющее форму параллелепипеда, разделенного колосниковой решеткой того или иного типа на две части: собственно топку и зольник.

- с факельным (камерным) сжиганием.

**Камерная топка** - техническое устройство предназначенное для сжигания пылевидного твердого, жидкого или газообразного топлив



имеющее форму параллелепипеда с подом (нижнее ограждение) выполненным или с уклоном к центру или плоско и имеющее на вертикальных стенах отверстия (амбразуры) для установки горелок или форсунок.

#### **4.9. Пароперегреватели. Виды, классификация, назначение**

Пароперегреватель предназначен для повышения температуры пара выше температуры насыщения, соответствующей давлению в котле.

Пароперегреватель - один из наиболее ответственных элементов котельного агрегата, так как он работает в наиболее тяжелых температурных условиях. Змеевики пароперегревателя и коллекторы выполняются из углеродистой стали.

Каждый пароперегреватель представляет собой системы цельнотянутых параллельных труб диаметром 28 - 42 мм, изогнутых в виде змеевиков, вальцованных или приваренных к круглым коллекторам. Использование труб небольшого диаметра упрощает гибку змеевиков и увеличивает коэффициент теплоотдачи. Толщина стенок труб зависит от рабочего давления пара и может быть от 3 до 5 мм. Устанавливают пароперегреватели на выходе продуктов сгорания из топki, где их температура находится в пределах 700 - 900 °С.

По своей конструкции пароперегреватели бывают вертикальные и горизонтальные с поперечным омыванием продуктами сгорания. Наиболее широкое распространение получили исключительно вертикальные, так как их крепление получается более простым.

Надежность работы змеевиков зависит от способа подвода насыщенного пара и отвода перегретого пара из него. В зависимости от направления движения газов и пара различают три основные схемы включения пароперегревателя в газовый поток: прямоточную (рис.4.8, а), противоточную (рис. 4.8, б) и комбинированную (рис. 4.8, в).

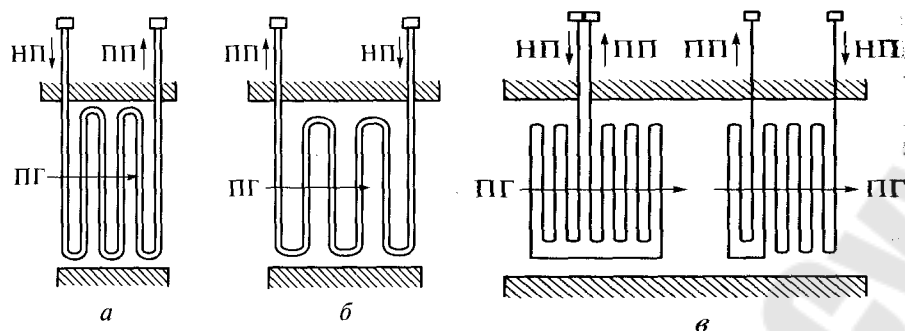


Рис. 4.8. Схемы включения пароперегревателей в газовый поток:  
*а* - прямоточная; *б* - противоточная; *в* - смешанная; стрелками показано движение насыщенного пара (НП), перегретого пара (ПП) и продуктов горения (ПГ)

При прямоточном включении направление движения продуктов сгорания и пара по змеевикам совпадают, т.е. в одном направлении. В такой схеме наиболее высокая температура газов находится в области наиболее низкой температуры пара, что в принципе должно было бы обеспечить низкие температуры металла пароперегревателя. Однако при наличии капелек котловой воды, поступающих с насыщенным паром из сепарационных устройств барабана, соли, содержащиеся в них, будут осаждаться на первых рядах змеевиков, что приводит к резкому повышению температуры металла. В прямоточной схеме движения теплоносителей температурный напор (усредненная по поверхности разность температур между греющей и нагреваемой средой) минимален, что требует наиболее развитых поверхностей нагрева.

При противоточной схеме потоки продуктов сгорания и пара направляются навстречу друг другу. В таком случае змеевики, обогреваемые продуктами сгорания с наиболее высокой температурой, встречают уже перегретый пар и охлаждаются при этом недостаточно. В результате металл змеевиков пароперегревателя работает в наиболее тяжелых температурных условиях. Вместе с тем, температурный напор в этой схеме максимальный и необходимая поверхность теплообмена минимальна, но ее можно применять при нагреве пара до 400 °С.

При комбинированном включении часть змеевиков включается в работу по прямоточной схеме, а часть - по противоточной. Данная схема является наиболее оптимальной по условиям надежности работы. Соотношение противоточной и прямоточной частей пароперегре-

вателя выбирается из условия одинаковых температур металла в начале и в конце змеевика его прямоточной части.

По тепловосприятию пароперегреватели делятся на конвективные и конвективно-радиационные.

Для котлов низкой и средней мощности используют конвективные пароперегреватели, а для котлов с давлением свыше 40 атм. и при температурах нагрева более 250 °С используют конвективно-радиационные пароперегреватели.

Конвективный пароперегреватель обычно устанавливают в горизонтальном соединительном газоходе между топкой и конвективной шахтой котла.

В конвективно-радиационных пароперегревателях конвективная часть устанавливается в газоходе котла, а радиационная - в топке котла.

Температуру пара в котлах с давлением до 2,4 МПа не регулируют. При давлениях более 2,4 МПа для регулировки температуры используют редуционно-охладительные установки (РОУ) или промежуточные пароохладители.

Установки РОУ устанавливают на выходе пара из пароперегревателя и регулирование осуществляется путем впрыска определенного количества конденсата в пар.

Промежуточные пароохладители устанавливают в рассечку между ступенями пароперегревателя. Пароохладитель представляет собой теплообменник по трубкам которого циркулирует питательная вода, а пар поступает в межтрубное пространство. Регулирование температуры перегретого пара производится изменением количества питательной воды, пропускаемой по трубкам пароохладителя.

Котлы с температурой перегрева пара выше 400 °С должны быть снабжены автоматическими регуляторами температуры перегретого пара.

#### **4.10. Экономайзеры. Виды, классификация, назначение**

В экономайзере питательная вода перед подачей в котел подогревается дымовыми газами за счет использования теплоты продуктов сгорания топлива. Наряду с предварительным подогревом возможно частичное испарение питательной воды, поступающей в барабан котла. В зависимости от температуры, до которой ведется подогрев воды, экономайзеры подразделяют на два типа - некипящие и кипящие. В некипящих экономайзерах по условиям надежности их работы подог-

рев воды ведут до температуры на 20 °С ниже температуры насыщенного пара в паровом котле или температуры кипения воды при имеющемся рабочем давлении в водогрейном котле. В кипящих экономайзерах происходит не только подогрев воды, но и частичное (до 15 мас. %) ее испарение.

Для очистки поверхности нагрева водяные экономайзеры имеют обдувочные устройства.

В соответствии с требованиями Госгортехнадзора экономайзеры некипящего типа должны быть отключаемыми по водяному тракту и тракту продуктов сгорания (т. е. должны иметь обводные линии).

Устройство обводного газохода для отключения индивидуального водяного экономайзера по тракту продуктов сгорания необязательно при наличии сгонной линии, обеспечивающей возможность постоянного пропуска воды через экономайзер в деаэратор в случае повышения температуры после него. Сгонной линией пользуются при растопке котла. Схема включения чугунного экономайзера с устройством сгонной линии представлена на рис.4.9.

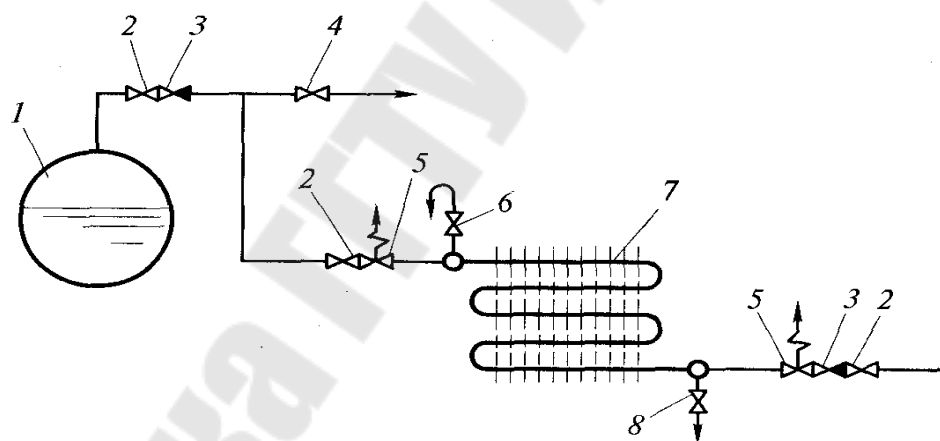


Рис.4.9. Схема включения чугунного экономайзера:

1- барабан котла; 2 - запорный вентиль; 3 - обратный клапан; 4 - вентиль на сгонной линии; 5 - предохранительный клапан; 6 - вентиль воздушника (по стрелке происходит удаление воздуха в процессе заполнения экономайзера водой); 7 - чугунный водяной экономайзер; 8 - дренажный вентиль экономайзера

На входе воды в экономайзер и выходе из него должны быть установлены два предохранительных клапана 5 и два запорных вентиля 2. Кроме того, необходим манометр, воздушник для удаления воздуха при заполнении системы водой, дренажный вентиль 8 на линии для слива воды из экономайзера, обратные клапаны 3.

Стальные экономайзеры (рис.4.10, а) изготавливаются из труб диаметром 28...38 мм, которые изгибают в змеевики 2, вальцованные или вваренные в коллекторы / круглого или квадратного сечений, размещаемые за пределами газохода.

Змеевики располагают в шахматном порядке и подвешивают с помощью специальных подвесок или опирают на опорные балки 3. Для выдерживания заданного шага между змеевиками используются дистанционные гребенки 4.

Схема включения кипящего стального экономайзера приведена на рис. 4.10, б. Такие экономайзеры выполняются неотключаемыми по водяному и дымовому трактам.

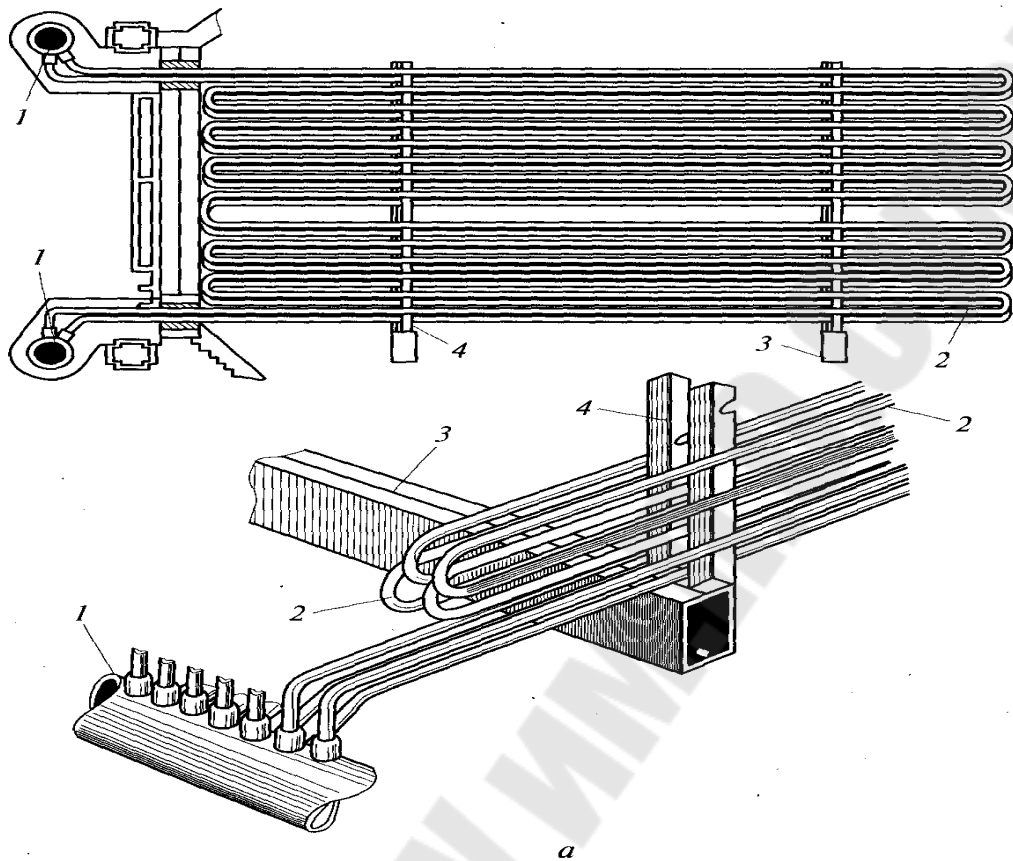


Рис. 4.10. Стальной трубчатый экономайзер:

*a* - общий вид; *б* - схема включения кипящего экономайзера;  
 1 - коллекторы; 2 - змеевик; 3 - опорная балка; 4 - дистанционная гребенка; 5 - барабан; 6 - вентиль воздушника; 7 - выходной коллектор подогретой воды; 8 - экономайзер; 9 - входной коллектор; 10 - вентиль на дренажной линии; 11 - вентиль на линии рециркуляции; 12 - запорный вентиль; 13 - обратный клапан; 14 - предохранительный клапан

Во избежание превращения всей воды, находящейся в экономайзере, в пар при растопке котла и его отключении предусматривается устройство рециркуляционной линии. Эта линия соединяет входной коллектор 9 экономайзера с барабаном 5 котла и обеспечивает поступление воды в экономайзер при ее испарении в периоды растопки и останова, когда питательная вода в экономайзер не подается. На линии рециркуляции имеется вентиль, который открывается при растопке и отключении котла и закрывается при включении котла в паровую магистраль.

Скорость воды в экономайзере принимают с учетом условий предотвращения в них расслоения пароводяной смеси или прилипания пузырьков воздуха к внутренней поверхности. Для некипящих экономайзеров скорость воды должна быть не менее 0,3 м/с, а для кипящих экономайзеров - не менее 1 м/с.

#### **4.11. Воздухоподогреватели. Виды, классификация, назначение**

В современных котельных агрегатах воздухоподогреватель играет весьма существенную роль, воспринимая теплоту от отходящих газов и передавая ее воздуху, он уменьшает наиболее заметную статью потерь теплоты с уходящими газами. При использовании подогретого воздуха повышается температура горения топлива, интенсифицируется процесс сжигания, повышается коэффициент полезного действия котельного агрегата. Вместе с тем при установке воздушного подогревателя увеличиваются аэродинамические сопротивления воздушного и дымового трактов,

В регенеративных воздухоподогревателях передача теплоты от продуктов сгорания к нагреваемому воздуху осуществляется путем попеременного нагревания и охлаждения одной и той же поверхности нагрева.

Воздухоподогреватели предназначены для подогрева воздуха поступающего на процесс горения, что уменьшает потери тепла и соответственно увеличивает КПД.

*Воздухоподогреватели бывают двух типов:*

- 1) рекуперативные (трубчатые);
- 2) регенеративные (вращающиеся).

Рекуперативный воздухоподогреватель состоит из стального кожуха, двух плоских трубных досок и стальных тонкостенных трубок, которые при помощи сварки крепятся в трубных досках.

Продукты сгорания проходят через воздухоподогреватель сверху вниз по трубкам, а подогреваемый воздух между трубок, омывая их в поперечном направлении. Такие воздухоподогреватели могут быть одноступенчатыми, двухступенчатыми и многоступенчатыми.

В целях предохранения обслуживающего персонала от ожогов и уменьшения потери тепла при эксплуатации, наружную поверхность кожуха покрывают тепловой изоляцией.

Регенеративные воздухоподогреватели применяются для котлов средней и большой мощности. Воздух в этих воздухоподогревателях нагревается до  $250^{\circ}\text{C}$  при глубоком охлаждении продуктов сгорания.

Воздухоподогреватель представляет собой вертикальный неподвижный цилиндрический корпус, внутри которого расположен вращающийся ротор, установленный на вертикальном валу. Ротор состоит из секций набранных из пластин обладающих хорошей теплопроводностью. Ротор приводится во вращательное движение при помощи электродвигателя, скорость вращения от 2 до 10 оборотов в минуту.

Принцип работы регенеративного воздухоподогревателя заключается в том, что в одну половину корпуса, сверху подаются продукты сгорания, которые опускаются вниз и пронизывают ротор, за счет чего пластины нагреваются, а продукты сгорания охлаждаются. Во вторую половину корпуса снизу подается подогреваемый воздух, который поднимаясь вверх, пронизывая горячие пластины, нагревается, а пластины охлаждаются. Воздухоподогреватели устанавливаются за экономайзером, а рекуперативные могут устанавливаться и в рассечку между ступенями экономайзера при этом первым по ходу продуктов сгорания должна быть ступень экономайзера. Температура воздуха поступающего в воздухоподогреватель, должна быть не менее чем на  $10-15^{\circ}\text{C}$  выше точки росы продуктов сгорания, во избежание конденсации водяных паров и коррозии поверхностей нагрева.

На рис. 4.11 приведен стальной трубчатый воздухоподогреватель рекуперативного типа, в котором к двум трубным доскам толщиной 20...30 мм приварены стальные трубы 2 наружным диаметром 33...40 мм с толщиной стенки 1,2...1,5 мм.

Дымовые газы (продукты горения) движутся по трубам 2 сверху вниз, а воздух поперечным потоком обтекает расположенные в шахматном порядке трубы снаружи.

Воздухоподогреватель может быть разделен поперечными перегородками 3 по воздушной стороне на два, три, четыре и даже пять



ходов. Снаружи секции заключены в кожух 4 из листового железа, покрытый теплоизоляцией толщиной 60...70 мм.

В воздушных перепускных коробах предусмотрены направляющие лопатки 5 для более равномерного обтекания воздухом труб воздухоподогревателя.

Для компенсации температурных удлинений труб и кожуха в воздухоподогревателе предусмотрен линзовый компенсатор 6.

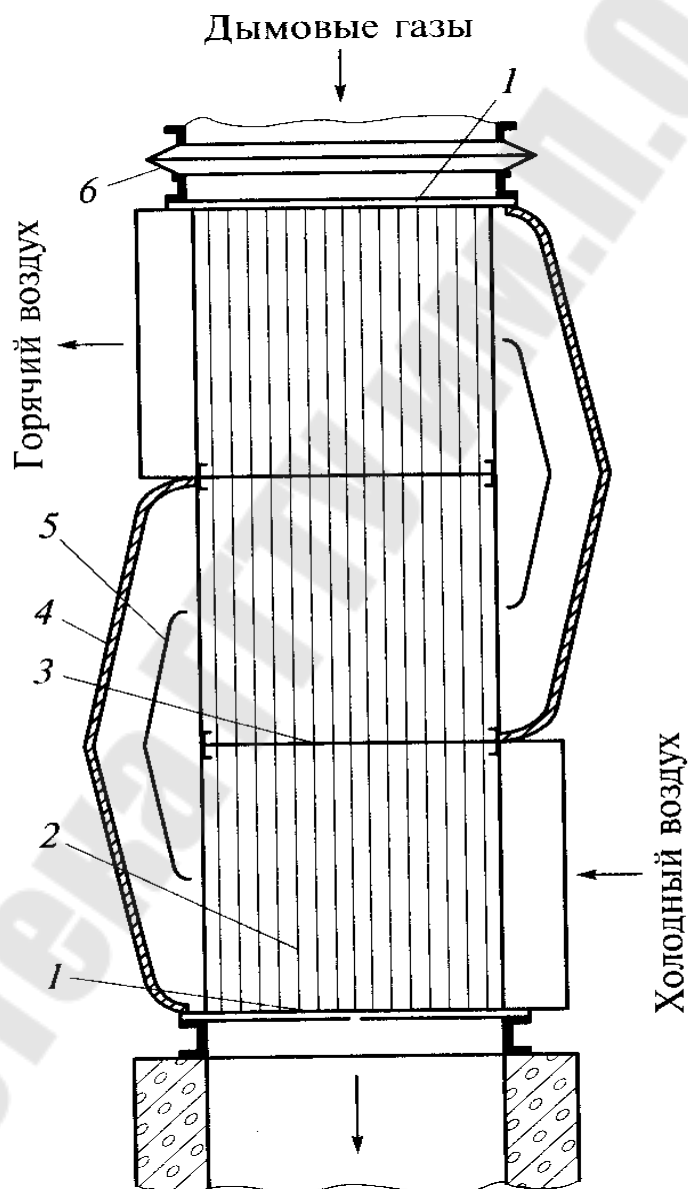


Рис. 4.11. Воздухоподогреватель рекуперативного типа:  
1 - трубные доски; 2 - трубы; 3 - перегородка; 4 - кожух;  
5 - направляющая лопатка; 6 - линзовый ком

В трубчатых воздухонагревателях при заданной невысокой температуре уходящих газов можно подогреть воздух до определенной температуры (не выше 300...320 °С). Для подогрева воздуха до более высоких температур (380...420 °С), например, при сжигании влажных топлив, вместо одноступенчатой применяют двухступенчатую компоновку воздухонагревателя, устанавливая между ступенями I и II экономайзер, что позволяет увеличить температурный напор на ступени II и уменьшить ее поверхность нагрева.

## **ТЕМА 5. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ**

### **5.1. Введение в высокотемпературную теплотехнологию и энергетику теплотехнологии**

*Теплотехнология* – совокупность способов преобразования исходных сырья, материалов, полуфабрикатов в заданный товарный продукт на основе изменения их теплового состояния.

*Теплотехнологический процесс* - элемент теплотехнологии, включающий в себя совокупность элементарных (теплофизических, физических, химических, механических и др.) процессов, обеспечивающих конкретное, технологически регламентированное тепловое воздействие на сырье, материалы, полуфабрикаты на отдельных этапах производственного цикла (например, теплотехнологические процессы, реализуемые в промышленных печах, сушильных установках, выпарных аппаратах и т. д.).

*Степень (стадия) теплотехнологического процесса* - часть теплотехнологического процесса, требующая для реализации обеспечения своих, специфических теплотехнических, технологических и организационных условий (переход от одной ступени к другой связан с изменением температурного и теплового режимов, состава газовой атмосферы, источника энергии и т. д.). В общем случае теплотехнологический процесс может быть представлен как последовательная совокупность нескольких ступеней. К числу одноступенчатых относятся многие варианты нагрева термотонких тел в нагревательных печах. Двух-, трех- и многоступенчатыми являются процессы нагрева

термомассивных тел, термической обработки металла, керамики в различных нагревательных печах.

*Теплотехнологическая схема производства* – наглядная (графическая) иллюстрация последовательной совокупности теплотехнологических и других технологических процессов производства того или иного продукта.

*Схема теплотехнологического процесса* – наглядная иллюстрация последовательной совокупности элементарных процессов теплотехнологического процесса.

*Теплотехнологический реактор* (аппарат, рабочее пространство теплотехнологической установки) - одно- и многокамерное устройство, в пределах которого осуществляются все стадии данного теплотехнологического процесса (например, металлургический конвертер, рабочее пространство доменной печи, методической нагревательной печи, мартеновской печи, вращающаяся печь с холодильником и циклонными теплообменниками производства цементного клинкера, сушилки, выпарные аппараты, ректификационные колонны, совокупность элементов парового котла и др.).

*Теплотехнологическая установка* - совокупность теплотехнологического реактора (аппарата, рабочего пространства) и эксплуатационно связанного с ним технологического, теплотехнического, энергетического, транспортного, приемно-распределительного и другого оборудования, непосредственно обеспечивающая реализацию данного теплотехнологического процесса и работающая в едином технологическом ритме (например, совокупность оборудования котельной установки).

*Теплотехнологическая установка с элементами внешнего теплоиспользования (теплоэнергоиспользования)* - теплотехнологическая установка с пристроенными или встроенными в структурную схему установки элементами (устройствами) для использования отходов теплоты (энергии) этой установки с целью получения энергетической или другой технологической продукции (печи с котлами-утилизаторами, испарительным охлаждением и т.д.).

*Теплотехнологическая система* – совокупность теплотехнологических установок и эксплуатационно связанного с ними технологического, теплотехнического, энергетического, транспортного, приемно-распределительного и другого оборудования, обеспечивающая в пределах данного предприятия переработку исходных материалов в заданный продукт или полуфабрикат.

*Теплотехнологический комплекс* – совокупность теплотехнологических систем, производственно связанных с ними технологических, теплотехнических, энергетических, транспортных, приемно-распределительных и других устройств, установок, систем, включая источники технологического сырья, топлива, электроэнергии, обеспечивающая всю последовательность теплотехнологических процессов преобразования исходного сырья в заданную продукцию как в пределах данного предприятия, так и вне его.

*Промышленный теплотехнологический комплекс* – совокупность отдельных теплотехнологических комплексов, формирующих техническую базу основных производств народного хозяйства.

*Комбинированная система (установка) технологического или технологического и энергетического назначения* – система (установка), органически связывающая две (или более) разнородные по производимому продукту паритетные технологические или технологические и энергетические системы (установки) с целью достижения наиболее высокой энергетической и общей эффективности выработки одновременно задаваемых видов продукции и уровней их производства и являющаяся альтернативным решением раздельного, выполненного на современном научно-техническом уровне варианта выработки этих видов продукции.

*Тепловая схема теплотехнологической установки (оформления теплотехнологического процесса)* – наглядная (графическая) иллюстрация состава и размещения источников энергии, состава и последовательности перемещения теплоносителей и рабочего тела (тел) в технологических и других элементах установки.

*Теплотехнический принцип (способ) реализации технологического процесса* – характерная совокупность тепловых, аэродинамических, механических и других условий организации термической обработки сырьевых материалов, полуфабрикатов, изделий в теплотехнологическом реакторе (аппарате, рабочем пространстве установки).

*Термодинамически идеальная теплотехнологическая установка* – установка, наделенная некоторыми предельными свойствами, теоретически обеспечивающими минимальный расход топлива (теплоты) на проведение теплотехнологического процесса. К числу этих свойств (принципов) относятся: неограниченные возможности организации теоретического противотока рабочего тела (технологически обрабатываемого материала) и теплоносителя (продуктов сгорания топлива, технологических газов и т. д.) и предельно (принципиально возмож-

ного) регенеративного теплоиспользования; предельно высокая тепловая герметичность ограждения установки; неограниченные возможности интенсификации внешнего теплообмена, следствием чего является завершенность этого вида теплообмена; неограниченные возможности интенсификации процесса горения (окисления) топлива, вследствие чего в уходящих газах установки при коэффициенте расхода окислителя  $\alpha \geq 1,0$  отсутствуют потери от неполноты горения топлива; неограниченные возможности интенсификации внешнего массообмена и переноса массы в теплотехнологических реакторах (аппаратах); предельно низкое самопотребление энергии; теплотехнологический процесс теоретически реализуется наилучшим образом, но в принципиально возможных рамках.

*Энергетика теплотехнологии* – новая область промышленной энергетики и новая научная дисциплина, призванная обеспечивать (изучать) условия реализации предельно высокого, экономически обоснованного энергосберегающего эффекта в теплотехнологических установках и системах при строго регламентированных технологических требованиях, при комплексном учете и решении проблемных задач ресурсосбережения, охраны окружающей среды, экономии пресной воды, при наиболее благоприятном производственном комфорте для человека.

При этом основой содержания профессиональной деятельности инженера-энергетика теплотехнологии являются:

1) разработка концепции интенсивного энергосбережения теплотехнологических комплексов и систем, отдельных технологических установок и производственных линий, включающей:

- диагноз и объективную оценку качества и эффективности использования топливно-энергетических ресурсов, материалов и экологической обстановки, основанные на сравнительном анализе характеристик действующих объектов (теплотехнологических установок, систем, комплексов) и их термодинамически идеальных моделей, формируемых на принципах безотходной технологии, энергосберегающих тепловых схем и оборудования;

- прогноз возможного уровня энергоматериалосбережения и радикального улучшения экологической обстановки, основанного на сравнительном анализе характеристик действующих объектов и их практических моделей, формируемых в условиях предельно глубокого научно-технического прогресса;

- состав конкретных мероприятий и технических предложений по реализации интенсивного энергосбережения;

2) создание теплотехнологических установок и систем нового поколения, отличающихся предельно высокими энергоматериалосберегающими и экологически совершенными характеристиками;

3) разработка мероприятий и внедрение технических решений, обеспечивающих радикальную энергетическую модернизацию действующих теплотехнологических установок и систем.

В основу классификации теплотехнологических процессов можно положить управляемые средствами теплотехники физические или физико-химические явления, лимитирующие длительность рабочего цикла, производительность установки и качество продукции. Исходя из этого, можно выделить технологические процессы, определяемые:

1) интенсивностью подвода теплоты к поверхности обрабатываемого материала (интенсивностью внешнего теплообмена);

2) интенсивностью подвода массы извне к реагирующей поверхности

обрабатываемого материала (интенсивностью внешнего массообмена);

3) интенсивностью переноса теплоты внутри обрабатываемого материала;

4) интенсивностью молекулярного переноса массы внутри обрабатываемого материала;

5) интенсивностью перемешивания фаз (твердых, жидких) в зоне их термической обработки;

6) скоростью собственно химического реагирования;

7) скоростью разделения целевых и сопутствующих продуктов.

## **5.2. Структурные схемы теплотехнологических реакторов**

Классификация теплотехнологических реакторов по наиболее общей особенности их конструктивного оформления приведена на рис. 5.1. Высокотемпературные теплотехнологические установки, в которых все стадии теплотехнологического процесса осуществляются в конструктивно единой камере, относят к группе установок с однокамерным реактором. Установки, в которых различные стадии теплотехнологического процесса осуществляются в конструктивно отдельных камерах, относят к теплотехнологическим установкам с много-

камерным реактором. Многокамерный вариант реактора свойствен ряду новых разрабатываемых схем теплотехнологических установок.



Рис. 5.1. Классификация теплотехнологических реакторов

Высокотемпературные теплотехнологические установки с однокамерным однозонным реактором характеризуются относительно равномерным температурным полем греющих газов в объеме и, как правило, циклическостью их действий. Примером таких установок являются мартеновские печи. Установки с однокамерным однозонным реактором и циклическим действием в наименьшей мере удовлетворяют современным требованиям.

Высокотемпературные теплотехнологические установки с однокамерным, но многозонным реактором отличаются непрерывностью действия и неравномерным полем температуры газов в объеме (по пути движения газов). Установки с многозонным реактором по ряду позиций более прогрессивны по сравнению с установками, имеющими однокамерный однозонный реактор.

Высокотемпературные теплотехнологические установки с многокамерным секционированным реактором характеризуются набором конструктивно однотипных камер (секций), в которых осуществляются отдельные однотипные стадии технологического процесса с применением однотипных теплотехнических принципов. В этих камерах могут использоваться автономные источники энергии. Высокотемпературные установки с многокамерным комбинированным реактором характеризуются наличием конструктивно различных отдельных камер, обычно имеющих различные источники энергии.

В многозонном и многокамерном реакторе можно выделить следующие зоны и камеры:

1. Зоны и камеры предварительной тепловой или тепловой и физико-химической обработки исходных материалов (ЗПТО, КИТО).

Эти зоны и камеры обеспечивают начальную технологическую обработку исходных материалов в теплотехнологическом процессе, реализуемом в реакторе.

2. Зоны и камеры основной технологической обработки материалов (ЗОТО, КОТО). В этих зонах и камерах или завершается технологический процесс в целом, или проводится его решающая стадия, которой преодолевается температурный и тепловой барьер технологического процесса и создаются наиболее благоприятные условия для его завершающих стадий.

3. Зоны и камеры технологической дообработки материалов (ЗТД, КТД). Здесь полностью завершаются стадии теплотехнологической обработки материала или перед его выдачей из реактора, или перед подачей в зону (камеру) технологически регламентированного охлаждения.

4. Зоны и камеры технологически регламентированного охлаждения технологического продукта (ЗТРО, КТРО). В отличие от этих зон и камер устройства, в которых осуществляется технологически нерегламентированное охлаждение продукта, относят к теплотехническим элементам технологической установки.

Структурная схема теплотехнологического реактора показана на рис. 5.2.

Э (ПКГ) <sub>о.г.</sub>	К(З) ПТО	К(З) ОТО	К(З) ТД	К(З) ТРО	Э (ПКГ) <sub>м</sub>	Э (ПКГ) <sub>о.с.</sub>
----------------------------	-------------	-------------	------------	-------------	-------------------------	----------------------------

Рис. 5.2. Структурная схема высокотемпературного теплотехнологического реактора

В установках с многозонным и нечетким конструктивным делением на зоны выделение ЗОТО может быть проведено исходя из удобства расчетного анализа и проектирования. Часто граница ЗОТО определяется исходя из условия, что температура отходящих из этой зоны газов равна или больше конечной температуры обрабатываемого материала в этой зоне.

В высокотемпературных топливных теплотехнологических установках используется широкий набор источников энергии:

- топливо с воздушным окислением (ТВ);
- топливо с обогащенным кислородом воздухом (ТОВ);
- топливо с технологическим кислородом (ТК);



- продукты горения топлива (ПГ) от смежных огнетехнических установок (ДГ - дымовые газы, т. е. продукты практически полного сгорания топлива; ВТ - продукты неполного сгорания топлива);

- комбинированные источники энергии, к числу которых относятся ТВ и ТК при их совместном использовании; ТВ (ТК) совместно с электроэнергией (ЭЭ); ТВ совместно с ПГ; другие варианты сочетаний источников энергии.

В общем случае, кроме отмеченного, в высокотемпературных теплотехнологических установках в качестве источника энергии используются экзотермические реакции тепло технологических процессов, электроэнергия, солнечная энергия, высокотемпературные теплоносители атомных реакторов (в перспективе).

На рис. 5.3 приведены структурные схемы теплотехнологических реакторов (на примере топливных печей) с различными вариантами размещения источников энергии и схемами перемещения рабочих тел и теплоносителей. Применительно к топливным печам, как правило, зоны (камеры) основной технологической обработки в качестве преимущественного источника энергии имеют непосредственно топливо, зоны (камеры) предварительной тепловой обработки - дымовые газы от ОТО; зоны (камеры) дополнительной технологической обработки могут иметь различные источники энергии (ТВ, ЭЭ, ПГ, ТК).

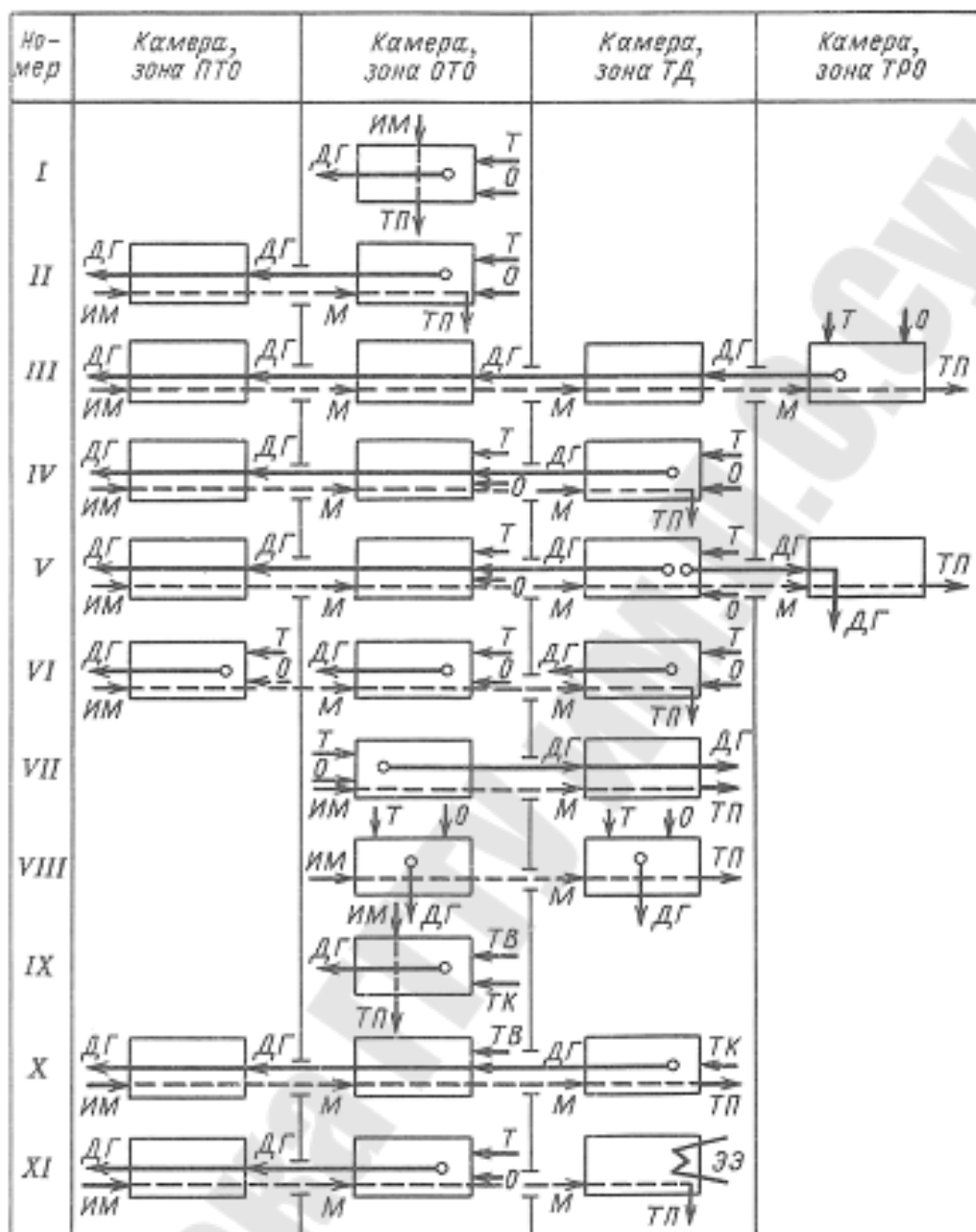


Рис. 5.3. Структурные схемы теплотехнических реакторов, схемы размещения источников энергии и перемещения рабочих тел и теплоносителей (на примере топливных печей):

ТВ, ТК, ЭЭ - соответственно топливно-воздушный, топливно-кислородный и электрический источники энергии, V-VIII - схемы с одним видом источника энергии; IX-XI - схемы с комбинированным источником энергии; Т, О, ДГ - соответственно топливо, его окислитель, дымовые газы; ИМ, М, ТП - соответственно исходный материал, материал, технологическая продукция

### **5.3. Классификация и виды высокотемпературных теплотехнологических процессов. Классификация высокотемпературных теплотехнологических установок**

Современные промышленные технологии основываются на применении органического и ядерного топлива. Широкое внедрение в теплотехнологии высокотемпературных процессов в настоящее время ставит ряд энергетических и экологических задач. Поэтому такое большое внимание уделяется высокотемпературным теплотехнологическим процессам и установкам.

Высокотемпературные процессы часто являются основой промышленных технологий получения целевого продукта из исходного сырьевого материала (известь, нефть, сланцы, угли, газ и др.) в процессе его тепловой обработки. К ним относятся физические, химические и массообменные процессы, обеспечивающие заданное превращение исходного сырья.

Физические теплотехнологические высокотемпературные процессы. Одним из способов получения целевого конечного продукта или полупродукта для смежных технологий являются физические теплотехнологические процессы (подогрев, испарение, термообработка, тепловая активация, рафинирование и др.), протекающие в высокотемпературных установках и обеспечивающие изменение только физических свойств исходного сырьевого материала.

Принято различать виды воздействия: нагрев сырьевого материала ниже температуры плавления, плавление сырья и нагрев до испарения расплава.

Получаемые в физическом теплотехнологическом процессе продукты (основная тепловая обработка, физические превращения и доработка технологического материала) классифицируются следующим образом:

1) полупродукт (сырье для смежных технологий) или целевой конечный продукт бытового и промышленного назначения;

2) обезвоженные промышленные и бытовые отходы, подлежащие захоронению (дальнейшей технологической переработке).

Длительность физического высокотемпературного теплотехнологического процесса является фактором, определяющим эффективность теплотехнологии и производительность огнетехнического оборудования.

Различают следующие физические высокотемпературные теплотехнологические процессы:

- тепловой активации металлов (сплавов) - выполняется в высокотемпературных огнетехнических установках перед последующим горячим формообразованием (прокатка, ковка, штамповка);
- термической обработки - вызывает разные по природе структурные изменения, позволяет управлять кристаллической структурой металлов и сплавов и получать продукт с требуемым комплексом механических и физических свойств (отпуск, направленная кристаллизация и др.);
- плавления - получение стали и чугуна перед последующим розливом в формы, получение сплавов и твердых растворов заданного состава, термическое рафинирование, направленная кристаллизация и выращивание монокристаллов;
- испарения - селективное расплавление и др.;
- термического обезвоживания - эффективное средство снижения загрязнения окружающей среды от жидких отходов. Полученный сухой остаток используется как сырье для других технологий или захороняется.

Химические высокотемпературные теплотехнологические процессы. В химической теплотехнологии исходное технологическое сырье претерпевает химические изменения (к примеру, деструктивная переработка нефти, мазута, газойлей и др.).

Различают следующие типы реакций: термическое разложение, соединение, обмен и окисление-восстановление.

Как и в физическом теплотехнологическом процессе, основной характеристикой здесь могут служить время и скорость протекания процесса.

Длительность процесса складывается из времени предварительной обработки сырья в зоне технологической подготовки высокотемпературной установки и времени основной обработки и дообработки. Все технологические переходы (подготовка, основная обработка и дообработка) выполняются в соответствующих технологических зонах установки.

В основу классификации теплотехнологических процессов можно положить управляемые средствами теплотехники физические или физико-химические явления, лимитирующие длительность рабочего цикла, производительность установки и качество продукции. Исходя из этого, можно выделить технологические процессы, определяемые:

- 1) интенсивностью подвода теплоты к поверхности обрабатываемого материала (интенсивностью внешнего теплообмена);
- 2) интенсивностью подвода массы извне к реагирующей поверхности обрабатываемого материала (интенсивностью внешнего массообмена);
- 3) интенсивностью переноса теплоты внутри обрабатываемого материала;
- 4) интенсивностью молекулярного переноса массы внутри обрабатываемого материала;
- 5) интенсивностью перемешивания фаз (твердых, жидких) в зоне их термической обработки;
- 6) скоростью собственно химического реагирования;
- 7) скоростью разделения целевых и сопутствующих продуктов.

#### **5.4. Материальные и тепловые балансы. Основы энергосберегающей теплотехнологии. Структура уравнений материальных балансов. Структура уравнений тепловых балансов**

*Материальные балансы*, являющиеся аналитическим, табличным или графическим выражением закона сохранения массы в высокотемпературном теплотехнологическом процессе, широко используются в практике планирования и учета расхода минеральных ресурсов. Они служат для проверки правильности определения удельных расходов исходных компонентов или удельного выхода продуктов процесса, являются исходной базой для составления тепловых балансов высокотемпературной теплотехнологической установки и элементов ее тепловой схемы.

Различают следующие разновидности материальных балансов высокотемпературных теплотехнологических процессов (ВТП):

- ✓ материальный баланс компонентов;
- ✓ материальный баланс веществ;
- ✓ материальный баланс химических элементов.

Обычно уравнения материальных балансов составляются в килограммах (компонентов, веществ, элементов) на килограмм технологического продукта (технологического сырья). Выбор тех или иных единиц измерения диктуется исключительно соображениями удобства составления и использования материального баланса; необходимо только внимательно следить за тем, чтобы выбранную единицу имели все без исключения слагаемые уравнения материального баланса.

Уравнение материального баланса компонентов, кг/кг технологического продукта:

$$m_{m.c} + m_m + m_{ок} + m_{в} + m_{обм} = 1 + m_{шл} + m_{ун} + m_{г.о}, \quad (5.1)$$

где  $m_{m.c}$ ,  $m_m$ ,  $m_{ок}$ ,  $m_{в}$  – удельные расходы технологического сырья, топлива, окислителя и восстановителя;

$m_{обм}$  – удельный износ футеровки теплотехнологического реактора;

$m_{шл}$ ,  $m_{ун}$ ,  $m_{г.о}$  – удельные выходы шлака, уноса частиц и газообразных отходов.

*Тепловой баланс теплотехнологического реактора.* Основными инструментами, с помощью которых оценивают достигнутый уровень полезного энергоиспользования и выявляют пути дальнейшей рационализации энергопотребления, служат: тепловые балансы ТР, его отдельных зон, теплотехнических элементов ВТУ; тепловые и энергетические балансы высокотемпературной теплотехнологической установки в целом.

Уравнение теплового баланса ТР, являющееся аналитическим выражением закона сохранения энергии, в наиболее общем случае имеет вид:

$$\begin{aligned} Q_{эл}^T + Q_{х.т.} + Q_{ф.т.} + Q_{ок.} + Q_{т.м.} + Q_{в} + Q_{экз.} = \\ = Q_{т.п.} + Q_{энд.} + Q_{ш.о.} + Q_{ун.} + Q_{о.г.} + Q_{в.г.} + Q_{н.г.} + Q_{о.с} + Q_{ак} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Использованные здесь обозначения раскрыты в табл. 5.1. Единицы величин (5.2) выбирают с учетом специфики теплотехнологического процесса и содержания конкретной задачи, решаемой с использованием этого уравнения; во многих случаях удобнее составлять уравнение (5.2) в килоджоулях на килограмм технологического продукта (кДж/кг) или в киловаттах.

Таблица 5.1

## Структура теплового баланса теплотехнологического реактора

Название статьи прихода	Обозначение	Название статьи расхода	Обозначение
Электроэнергия как источник теплоты	$Q_{эл}^T$	Теплота технологического Продукта	$Q_{т.п.}$
Химическая энергия топлива	$Q_{х.т.}$	Тепловой эффект эндотермических реакций	$Q_{энд.}$
Теплота топлива	$Q_{ф.т.}$	Теплота отходящих газов	$Q_{о.г.}$
Теплота исходных технологических материалов	$Q_{т.м.}$	Теплота выбивающихся газов	$Q_{в.г.}$
Теплота окислителя	$Q_{ок.}$	Теплота шлаковых отходов	$Q_{ш.о.}$
Теплота восстановителя	$Q_{в.}$	Тепловая энергия в уносе	$Q_{ун.}$
Тепловой эффект экзотермических реакций в технологической зоне	$Q_{экз.}$	Потери теплоты от неполноты горения топлива при:	$Q_{н.г.}$
<b>Всего:</b>	$Q_{прих.}$	- химическом недожоге	$Q_{х.н.}$
		- механическом недожоге	$Q_{м.н.}$
		- Потери теплоты в окружающую среду:	$Q_{о.с.}$
		- теплопроводностью через обмуровку	$Q_{о.с.}^T$
		- излучением через отверстия окна	$Q_{о.с.}^{изл.}$
		- через поверхность охлаждаемых элементов	$Q_{о.с.}^{охл.}$
		- с транспортными Устройствами	$Q_{о.с.}^{тр.}$
		- Расход теплоты на разогрев обмуровки	$Q_{ак.}$
		<b>Всего:</b>	$Q_{расх.}$

## ТЕМА 6. ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

Теплообменными аппаратами называются устройства, предназначенные для передачи теплоты от греющего теплоносителя к нагреваемому.

Тепловые процессы, происходящие в теплообменниках: нагрев, охлаждение, кипение, конденсация, испарение, затвердевание, плавление, сублимация, кристаллизация и т. д. Часть из этих процессов сопровождается не только тепло-, но и массообменом.

Теплообменные аппараты можно классифицировать по следующим признакам:

- по принципу действия: поверхностные (рекуперативные и регенеративные) и смесительные;
- по назначению: испарители, конденсаторы, подогреватели, паропреобразователи, холодильники и т. д.;
- по конструктивным признакам: кожухотрубчатые, змеевиковые, спиральные, пластинчатые и т. д.

Кроме того, классификация теплообменников может быть по фазовому состоянию теплоносителей, по направлению их движения и другим признакам.

**Рекуперативными** называются теплообменники, в которых теплообмен между теплоносителями происходит через разделяющую их стенку. Они могут работать как в непрерывном, так и в периодическом режимах. Большинство рекуперативных теплообменников работают в непрерывном режиме. В таких теплообменниках поддерживают постоянные во времени расходы, температуры теплоносителей на входе и выходе из аппарата. Изменение параметров теплоносителей происходит только при переходе из одного стационарного режима в другой.

**Регенеративными** называются теплообменники, в которых греющий и нагреваемый теплоносители попеременно омывают одну и ту же поверхность нагрева (насадку). Регенеративные теплообменники также могут работать в непрерывном и периодическом режимах.

Поверхность нагрева при соприкосновении с теплоносителем получает тепло и аккумулирует его, а затем отдает холодному теплоносителю или наоборот.

На рис. 6.1 представлены рекуперативные, регенеративные и смесительные теплообменники.



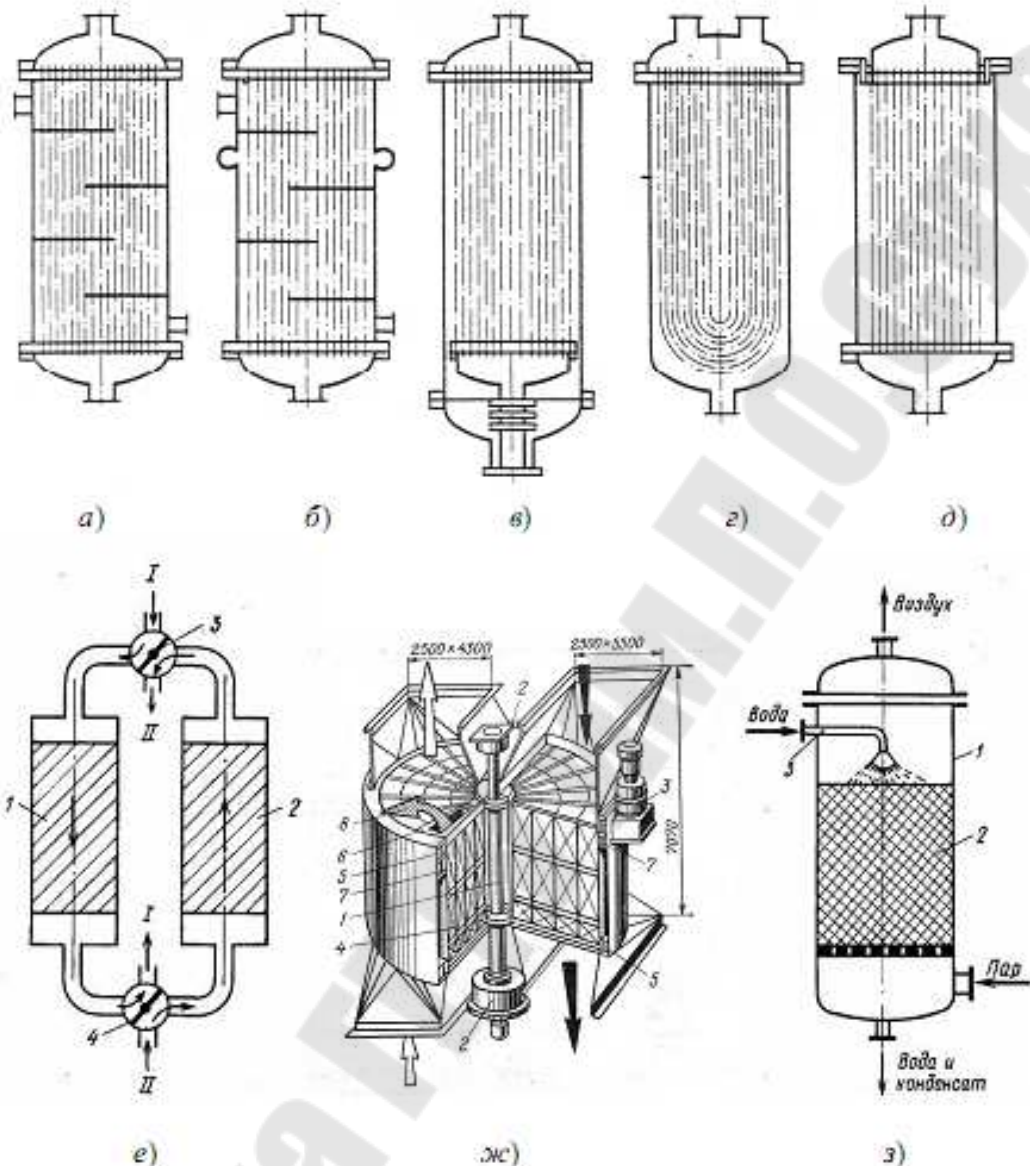


Рис. 6.1. Схемы рекуперативных и регенеративных теплообменников: а–д – рекуперативные кожухотрубчатые теплообменники: а – с неподвижными решетками; б – с температурными компенсаторами на кожухе; в – с плавающей головкой; г – с U-образными трубками; д – с сальником на плавающей головке; е – регенеративный теплообменник периодического действия: 1, 2 – насадка; 3, 4 – клапаны; I, II – холодный и горячий теплоносители; ж – регенеративный теплообменник непрерывного действия: 1 – вал ротора; 2 – подшипники; 3 – электродвигатель; 4 – насадка; 5 – наружный кожух; 6, 7 – радиальное и периферийное уплотнение; 8 – утечка воздуха; з – насадочный смесительный теплообменник: 1 – корпус; 2 – насадка; 3 – распределительное устройство

**Смесительными** называются такие теплообменники, в которых теплообмен между теплоносителями происходит при непосредственном их контакте и смещении. Для увеличения поверхности контакта теплоносителей и интенсификации процесса теплообмена между ними на пути движения теплоносителей размещают насадку. Смесительные теплообменники различной конструкции довольно широко применяются в различных отраслях промышленности.

**Теплоносителями** называются движущиеся среды, обменивающиеся теплотой или применяемые для передачи теплоты от более нагретых тел к менее нагретым. В качестве теплоносителей применяются газообразные, жидкие и твердые вещества.

*Теплоносители классифицируют по различным признакам:* по назначению (теплоносители, хладоносители, хладагенты, сушильные агенты и т. д.); по агрегатному состоянию (однофазные и многофазные); по диапазону рабочих температур и давлений (высокотемпературные, среднетемпературные, низкотемпературные, криогенные).

Высокотемпературные теплоносители: дымовые и топочные газы с температурой до 1500 °С; минеральные масла, кремнийорганические и дифенильные соединения, расплавы солей и жидкие металлы.

Среднетемпературные теплоносители: вода, водяной пар и воздух.

Низкотемпературные теплоносители: хладагенты (аммиак, фреоны, двуокись углерода и др.).

Криогенные теплоносители: сжиженные газы (азот, кислород, воздух, водород и др.).

Теплоносители, с точки зрения технической и экономической целесообразности их применения, должны удовлетворять следующим требованиям:

– быть доступными, широко распространенными и недорогими.

В противном случае дорогие теплоносители увеличивают капитальные и эксплуатационные затраты;

– иметь достаточно высокие значения теплоемкости, теплоты парообразования, плотности, теплопроводности, но малую вязкость;

– должны обладать термостойкостью, быть химически неагрессивными по отношению к материалам аппаратуры, химически стойкими, не давать отложений на теплопередающей поверхности при длительной работе теплообменника;

– быть безвредными для обслуживающего персонала; обладать невоспламеняемостью, взрывобезопасностью и экономичностью.

Рассмотрим некоторые из наиболее широко применяемых теплоносителей.

**Вода** как теплоноситель получила очень широкое распространение, особенно в отопительных и вентиляционных системах. Воду можно транспортировать на значительные расстояния (до нескольких километров) и при этом снижение температуры воды в изолированных трубопроводах составляет не более  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  на 1 км. Достоинством воды как теплоносителя является ее невысокая стоимость, нетоксичность, пожаровзрывобезопасность, относительно высокий коэффициент теплоотдачи, высокая теплоемкость и др. Горячую воду получают в водогрейных котлах или на ТЭЦ и котельных в специальных водонагревательных установках.

**Водяной пар** как теплоноситель получил большое распространение вследствие своих преимуществ перед другими теплоносителями:

– высокое значение удельной теплоты парообразования позволяет передавать большие тепловые потоки при относительно малых расходах водяного пара;

– относительно высокие значения коэффициентов теплоотдачи при конденсации водяного пара позволяют получать небольшие поверхности нагрева;

– возможность достаточно простого регулирования режимов процесса теплообмена в аппаратах.

Недостатком водяного пара как теплоносителя является большое значение давления насыщения при высоких температурах насыщения (порядка  $300\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), что влечет за собой резкое увеличение металлоемкости и габаритов теплообменной аппаратуры.

**Дымовые и топочные газы** широко применяются в качестве теплоносителей в сушильных установках как сушильный агент, либо, если их применение недопустимо по условиям загрязнения материала золой или сажей, они используются как греющий теплоноситель для нагрева воздуха, который применяется далее уже как сушильный агент. Недостатком газообразных теплоносителей является:

– большие теплотери при их транспортировке при высоких начальных температурах;

– повышенный расход электроэнергии на транспортировку газообразных теплоносителей из-за малых значений плотности, коэффи-

циентов теплоотдачи и больших значений массовых и объемных расходов;

– из-за малых значений коэффициентов теплоотдачи теплообменная аппаратура имеет большие поверхности теплообмена и получается громоздкой;

– вследствие малых значений удельной теплоемкости газообразные теплоносители должны подаваться в аппараты с высокой температурой. Это влечет за собой необходимость изолирования газопроводов, что приводит к удержанию теплоиспользующих установок и повышению эксплуатационных затрат.

**Высокотемпературные капельные теплоносители** нашли применение в промышленности для ведения высокотемпературных процессов. К ним относятся минеральные масла, кремнийорганические соединения, расплавы солей и металлов, дифенильные смеси и др. Они должны обладать следующими свойствами: высокими коэффициентами теплоотдачи; высокой температурой кипения при атмосферном давлении; низкой температурой затвердевания; термической стабильностью; нетоксичностью; пожаровзрывобезопасностью; химической неагрессивностью; экономичностью.

**Новые высокоэффективные высокотемпературные капельные теплоносители** (периолифторэфиры и полифторалкилкарбонаты) имеют температуру затвердевания ниже  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  и температуру кипения в 1,5–2 раза выше, чем вода. Кроме того, они являются гидрофобными и более устойчивыми к загрязнению. Их недостаток – высокая стоимость.

К **низкотемпературным теплоносителям** относятся хладагенты и хладоносители. Их температура кипения или затвердевания ниже  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . К хладагентам относятся аммиак  $\text{NH}_3$ , двуокись углерода  $\text{CO}_2$ , фреоны, углеводороды. К хладоносителям относятся, в основном, растворы  $\text{NaCl}$  и  $\text{CaCl}_2$ . Низкотемпературные теплоносители применяются в холодильной технике.

## 6.1. Рекуперативные теплообменные аппараты

Современные рекуперативные теплообменники поверхностного типа непрерывного действия весьма разнообразны по конструкции и назначению, поэтому рассмотрим только основные и наиболее широко применяемые.

*Кожухотрубчатые теплообменники* получили наибольшее распространение и они предназначены для работы с теплоносителями жидкость–жидкость, газ–жидкость, пар–жидкость, газ–газ и представляют собой аппараты, выполненные из пучков труб. Концы труб для обеспечения плотности их соединения развальцованы в трубных решетках (досках) или приварены к ним. С торцов аппараты ограничены крышками с патрубками. Трубное и межтрубное пространства в теплообменниках разобщены и каждое из них может быть разделено перегородками. Для получения многоходового теплообменника по трубному пространству перегородки устраивают в крышках, а для многократного пересечения трубного пучка по межтрубному пространству перегородки устанавливают в последнем. В кожухотрубчатых теплообменниках теплоэнергоустановок и тепловых сетей обычно используют трубы внутренним диаметром от 12 до 38 мм. Длина трубного пучка составляет 0,9–6 м. Теплообменники с трубами меньшего диаметра используют в транспортных машинах в топливных и масляных контурах.

Кожух кожухотрубчатого теплообменника изготавливают из листового металла толщиной не менее 4 мм. Толщина стенки кожуха определяется максимальным давлением рабочей среды и диаметром аппарата. К кожуху привариваются фланцы для соединения с крышками (днищами) аппарата. Крышки кожухотрубчатых теплообменников имеют форму плоских плит, конусов, сфер, чаще выпуклых или выгнутых эллипсов.

Кожухотрубчатые теплообменники выполняют жесткой конструкции и с компенсирующими устройствами для компенсации температурных напряжений, возникающих в результате различия температурных расширений труб и кожуха; одно- и многоходовыми; прямо-, противо- и поперечноточными, горизонтальными и вертикальными.

*Секционные теплообменники* (рис. 6.2) представляют собой один из типов трубчатых аппаратов и их применяют в самых различных отраслях промышленности. Они представляют собой несколько последовательно соединенных секций, каждая из которых есть не что иное, как кожухотрубчатый теплообменник с малым числом труб и кожухом небольшого диаметра.

Достоинствами секционных теплообменников являются: при одинаковых расходах теплоносителей в трубном и межтрубном пространствах скорости их почти одинаковы, что обеспечивает повышенные коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи по сравнению с

кожухотрубчатыми теплообменниками; удобство подбора и изменения в случае необходимости площади поверхности теплообмена.

Недостатки секционных теплообменников: высокая стоимость единицы поверхности нагрева из-за высокой доли дорогостоящих элементов аппарата – трубных решеток, фланцев, переходных камер, компенсаторов, калачей и т. д.; большая металлоемкость на единицу поверхности нагрева; значительные гидравлические сопротивления, что вызывает повышенный расход электроэнергии на привод насоса.

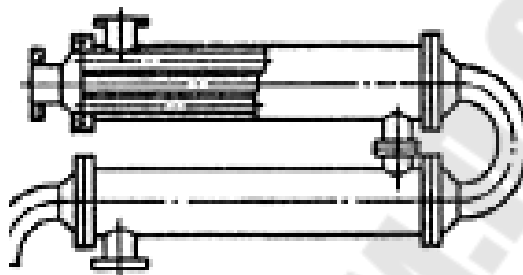


Рис. 6.2. Секционный теплообменник

*Пластинчатые теплообменники* имеют плоские параллельные поверхности теплообмена, которые образуют каналы для прохода теплоносителей (рис. 6.3). Такие теплообменники желательно применять для теплоносителей с примерно одинаковыми коэффициентами теплоотдачи. Для интенсификации процесса теплообмена и повышения площади поверхности теплообмена пластинам придают различные профили. Пластинчатые теплообменники изготавливают из различных металлов и сплавов с толщиной листа 0,5–2 мм и расстоянием между пластинами 2–6 мм. Компактность таких теплообменников больше, чем у кожухотрубчатых и спиральных и достигает  $300 \text{ м}^2/\text{м}^3$ .

Достоинствами пластинчатых теплообменников является возможность работы их при больших перепадах давления между теплоносителями (до 12 МПа), простота изготовления, достаточно высокая компактность.

Недостатки: трудность в обеспечении герметичности между теплоносителями.

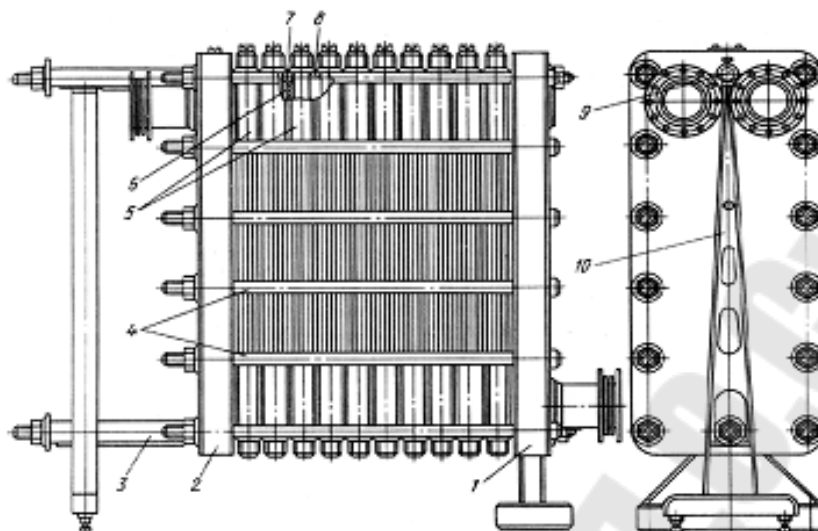


Рис. 6.3. Пластинчатый теплообменник:

1 – неподвижная плита; 2 – подвижная плита; 3 – нижняя штанга; 4 – стяжные болты; 5 – сварные блоки пластин; 6 – глухая втулка; 7 – кольцевая прокладка; 8 – проходная втулка; 9 – верхняя штанга; 10 – стойка

## 6.2. Регенеративные теплообменные аппараты

Регенеративным теплообменным аппаратом называется устройство, в котором теплота от одного теплоносителя к другому передается с помощью подвижной или неподвижной насадки.

Регенеративные теплообменные аппараты (регенераторы) широко применяют в теплоэнергетике и низкотемпературной технике. Основными областями их использования являются металлургическая промышленность, крупные воздуходелительные установки, газовые холодильные машины и др. Устройство регенераторов может быть различным. Например, схема регенераторов воздуходелительной установки представлена на рис. 6.4. Для непрерывной работы необходимо иметь два аппарата, каждый из которых представляет собой цилиндрический кожух, внутри которого находится пронизанная для газов аккумулярующая теплоту насадка. Горячая среда (прямой поток) проходит через регенератор I сверху вниз, где охлаждается в результате отвода теплоты к насадке, при этом последняя нагревается. Время взаимодействия горячей среды с насадкой называется периодом нагрева  $\tau_1$ .

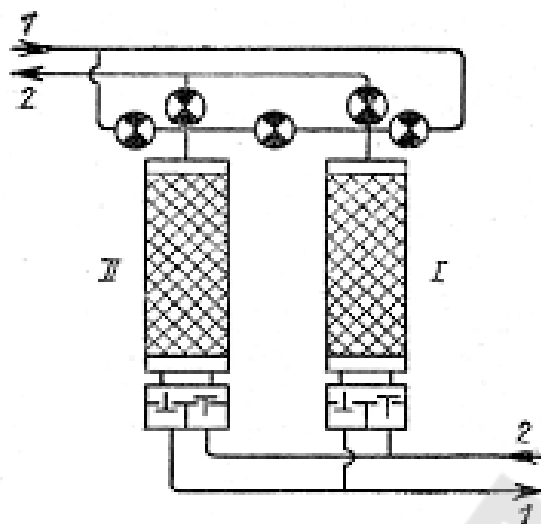


Рис. 6.4. Регенератор воздухоразделительной установки:  
1 – горячая среда; 2 – холодная среда

В это же время холодная среда (обратный поток) движется в регенераторе II снизу вверх и нагревается в результате отвода теплоты от насадки и охлаждения последней (период охлаждения  $\tau_2$ ). Затем с помощью клапанов регенераторы переключаются и горячая среда проходит через регенератор II, а холодная – через регенератор I. Таким образом достигается непрерывный процесс охлаждения горячей и нагревания холодной среды в установке.

Период работы аппарата, в течении которого через него проходит и горячая, и холодная среда, называется циклом.

Преимущества регенератора в сравнении с рекуперативными теплообменниками – высокая компактность и возможность осуществления в них процессов теплообмена и очистки рабочего тела от примесей. Основным элементом, определяющим в большой степени эффективность работы регенераторов, является насадка.

На рис. 6.5. представлены различные типы насадок регенераторов.



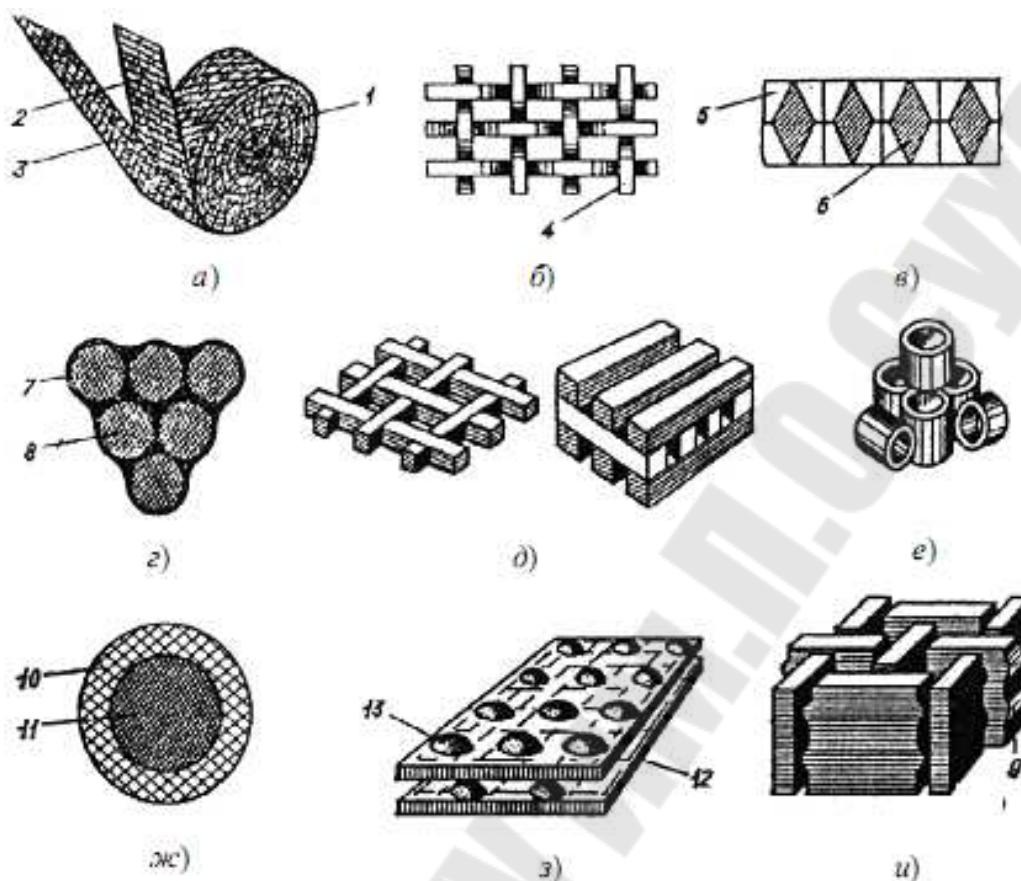


Рис. 6.5. Типы насадок регенераторов:

а – диски из алюминиевой гофрированной ленты; б – сетчатая насадка; в – насадка из пластин с сужающе-расширяющимися каналами; г – шаровая насадка; д – кирпичная насадка с выступами; 1 – диск; 2 – лента; 3 – гофры; 4 – металлическая проволока; 5 – металлическая пластина; 6 – усеченная пирамида; 7 – металлические шары; 8 – поры, заполненные инертным газом; 9 – выступы; 10 – металлическое покрытие; 11 – ядро; 12 – пакет пластин; 13 – двусторонние выпуклости

### 6.3. Смесительные теплообменники

Широкое применение в различных отраслях промышленности получили теплообменные аппараты с непосредственным контактом газообразного и жидкого теплоносителей (смесительные теплообменники). По принципу работы это в большинстве своем аппараты непрерывного действия. Они используются для нагревания, охлаждения, увлажнения, осушки газов, ректификации, адсорбции и т. д.

Преимуществами смесительных теплообменников являются простота конструкции, высокие коэффициенты тепломассообмена, большие объемные расходы газообразного теплоносителя, развитые поверхности контакта фаз и др.

Непосредственный контакт газа и жидкости в смесительных теплообменниках приводит к протеканию не только теплообменных процессов, но и массообменных. Наиболее распространенной парой теплоносителей является воздух–вода и поэтому для проведения теплотехнических расчетов процессов, протекающих в смесительных теплообменниках с участием влажного воздуха, проводят с помощью H-d диаграммы.

### **6.3.1. Типы смесительных теплообменников**

В различных отраслях промышленности широкое применение нашли теплообменные аппараты контактного типа, в которых тепломассообмен между теплоносителями происходит при их непосредственном смешении. Аппараты такого типа применяются для утилизации теплоты отходящих газов, для очистки воздуха или газов, в системах кондиционирования воздуха, для выпаривания растворов и т. д.

По принципу действия это, как правило, аппараты непрерывного действия.

По своему назначению смесительные теплообменники можно разделить на кондиционеры, скрубберы полые, насадочные и с псевдооживленной насадкой, барботажные и тарельчатые колонны, трубы Вентури и др.

Рассмотрим более подробно некоторые типы смесительных теплообменников (рис. 6.6).

Полые, или безнасадочные, камеры применяют в системах кондиционирования воздуха для его термовлажностной обработки. В таких камерах распыление воды в воздушную среду осуществляется форсунками и контакт между водой и воздухом происходит на поверхности образующихся капель.

Каскадные аппараты, внутри которых устанавливаются горизонтальные либо наклонные полки, по которым жидкость стекает сверху вниз под действием сил тяжести.

Пенные смесительные теплообменники применяются для очистки газов от плохо смачиваемой пыли. Скорость газа, набегающего на решетку, составляет 2–2,5 м/с. В таких аппаратах подвод газа вверх и слив жидкости вниз осуществляется через одни и те же отверстия в решетках.

Полые скрубберы, получившие наибольшее распространение среди смесительных теплообменников, предназначены для термо-влажностной обработки и очистки газов. Они могут работать с полным или частичным испарением орошающей жидкости. Полые скрубберы представляют собой колонны круглого или прямоугольного сечения. Орошающая жидкость подается сверху, дробится на капли механическими форсунками, а обрабатываемый газ со скоростью 0,7–1,5 м/с направляется, как правило, снизу вверх. При установке каплеуловительных устройств скорость газа может достигать 8 м/с в пересчете на полное поперечное сечение аппарата.

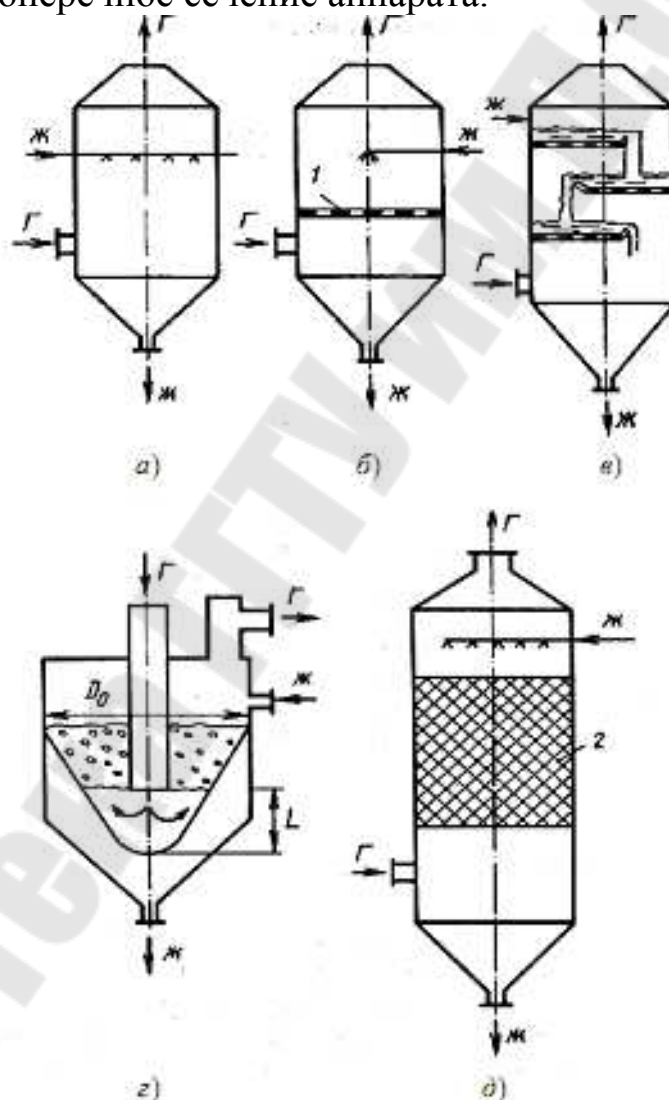


Рис. 6.6. Типы смесительных теплообменников:

а – полый форсуночный; б – пенный; в – барботажный тарельчатый каскадного типа; г – водоподогреватель с погружным трубчатым барботером; д – насадочный; Г – газ; Ж – жидкость; 1 – решетка (тарелка); 2 – насадка

Насадочные скрубберы (рис. 6.7) применяют для термовлажностной обработки газов. Применение их для очистки газов нецелесообразно, т. к. насадка может забиваться пылью в процессе работы, в связи с чем эффективность их работы резко падает. Преимуществами насадочных скрубберов по сравнению с безнасадочными является большая компактность, однако они обладают и большим гидравлическим сопротивлением. Различные типы насадок, применяемых в насадочных скрубберах, представлены на рис. 6.7.

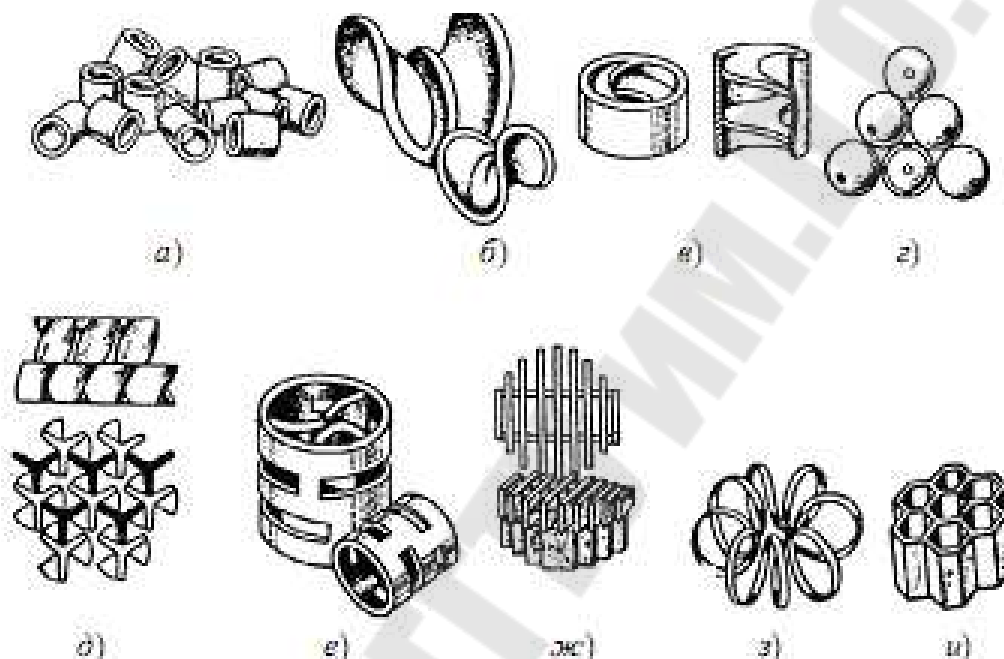


Рис. 6.7. Типы насадок:

а – кольца Рашига; б – седла Берля; в – кольца с перегородками; г – шары; д – пропеллерная насадка; е – кольца Палля; ж – хордовая насадка; з – спирали; и – керамические блоки

В пленочных подогревателях смесительного типа нагревают воду водяным паром до температуры, близкой к температуре насыщения. Такие аппараты конструктивно проще поверхностных теплообменников, компактнее, имеют меньшие габаритно-весовые показатели и большие коэффициенты теплоотдачи.

Скрубберы с псевдооживленной насадкой работают в режиме «кипящего слоя» и применяются для нагрева жидкостей и охлаждения газов. Интенсификация процесса охлаждения газа достигается за счет увеличения скорости в псевдооживленном слое до 6 м/с в расчете на свободное сечение аппарата, что приводит к повышению скорости испарения жидкости.

## **ТЕМА 7. ВЫПАРНЫЕ АППАРАТЫ, ДИСТИЛЛЯЦИОННЫЕ, РЕКТИФИКАЦИОННЫЕ И СУШИЛЬНЫЕ АППАРАТЫ**

*Выпариванием* называется термический процесс концентрирования растворов нелетучих веществ, заключающийся в удалении из них летучего растворителя в виде пара при кипении или испарении. Выпаривание применяют для увеличения концентрации растворов (концентрирование) при производстве сахара, поваренной соли, аммиачной селитры, щелочных металлов, минеральных удобрений, минеральных солей, органических полупродуктов, кормовых дрожжей и т. д.

При кипении растворов нелетучих веществ в паровую фазу переходит только растворитель и по мере испарения растворителя и его удаления концентрация раствора повышается.

В промышленности выпаривают преимущественно водные растворы различных веществ, поэтому в дальнейшем рассматривается только выпаривание водных растворов.

На современных предприятиях выпаривание ведут, как правило, в многокорпусных (многоступенчатых) установках непрерывного действия с выпарными аппаратами поверхностного типа.

### **7.1. Схемы выпарных установок**

Выпарные установки с аппаратами поверхностного типа изображены на рис. 7.1.

Непрерывный процесс выпаривания растворов может осуществляться как в одноступенчатых, так и в многоступенчатых выпарных установках с использованием вторичного пара каждой ступени в последующих ступенях с более низким давлением или с передачей части вторичного пара (экстра-пара) некоторых ступеней другим тепловым потребителям.

Классификация выпарных установок весьма обширна, но мы остановимся на некоторых.

Промышленные выпарные установки разделяют на несколько групп:

- 1) по числу ступеней: одноступенчатые и многоступенчатые;
- 2) по давлению вторичного пара в последней ступени: выпарные установки с разрежением, близким к разрежению в конденсаторе (рис. 7.1, а); установки с повышенным давлением в последней ступени (рис. 7.1, б); установки с ухудшенным вакуумом (рис. 7.1, в);

3) по относительному движению пара и раствора: прямоточные выпарные установки (рис. 7.1, а) для растворов с высокой температурной депрессией; противоточные выпарные установки (рис. 7.1, ж) для растворов с быстрорастущей вязкостью; со смешанным питанием корпусов (рис. 7.1, к) для растворов с повышенной вязкостью.

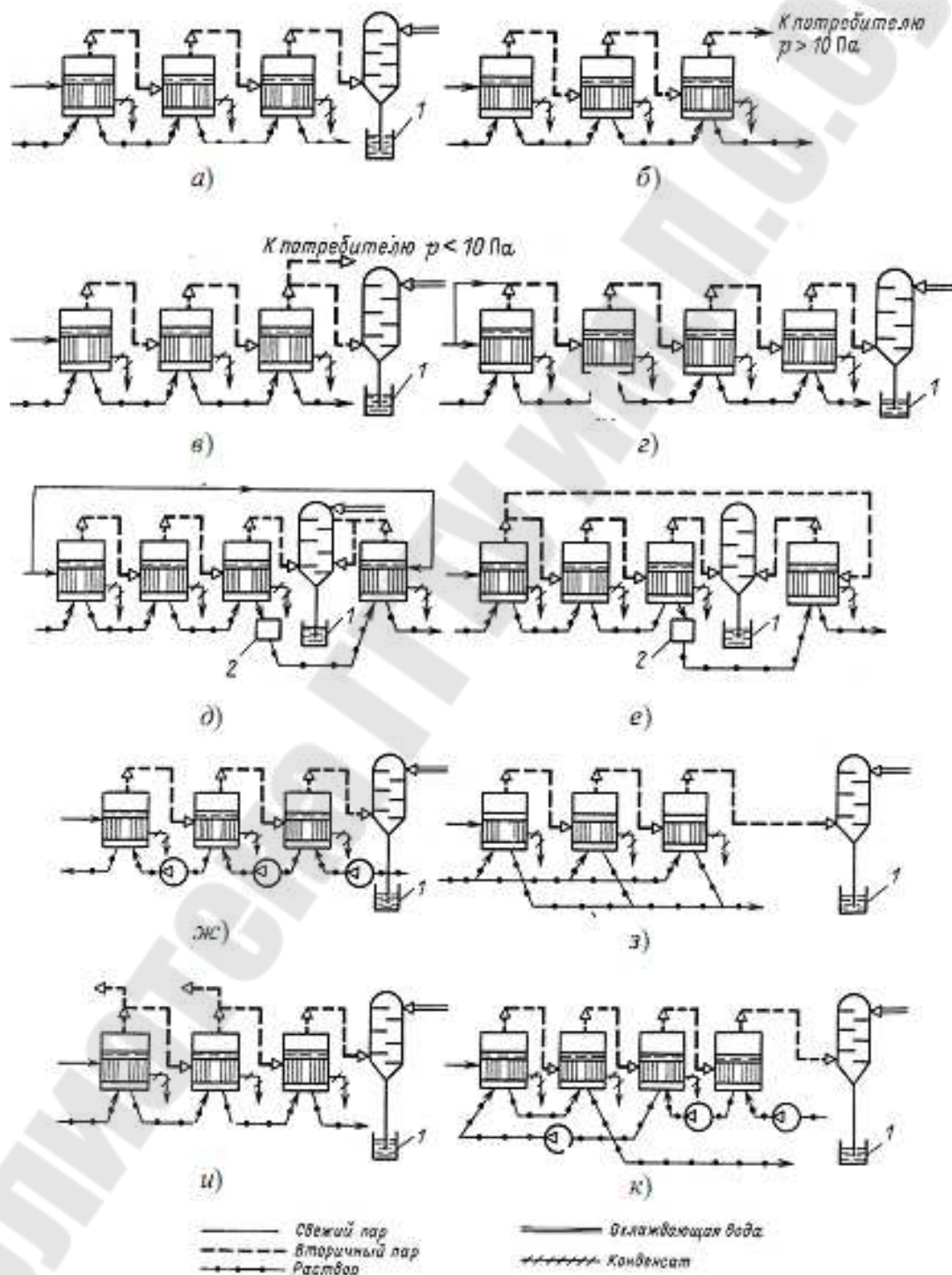


Рис. 7.1. Схемы выпарных установок:

а – прямоточная с конденсатором; б – прямоточная с противодавлением; в – с ухудшенным вакуумом; г – с нуль-корпусом; д – двухстадийная с обогревом корпуса второй стадии острым паром; е – двухстадийная с обогревом корпуса второй стадии вторичным паром первой ступени; ж – противоточная; з – с параллельным током; и – с отбором экстра-пара; к – со смешанным током: 1 – барометрический ящик; 2 – солеотделитель

Кроме того, выпарные установки классифицируются по подводу греющего пара, по технологии обработки раствора и т. д.

### 7.3. Основные элементы выпарной установки

Основными элементами выпарной установки являются выпарные аппараты, сепараторы и брызгоотделители, подогреватели раствора, конденсатоотводчики, конденсаторы, баки и емкости, насосы, запорная и предохранительная арматура, регулирующие и контрольно-измерительные приборы. Рассмотрим основное оборудование многоступенчатой выпарной установки.

#### *Выпарные аппараты*

Наибольшее распространение получили вертикальные трубчатые выпарные аппараты непрерывного действия с паровым обогревом с естественной и принудительной циркуляцией. Такие аппараты имеют значительное надрастворное пространство для сепарации из вторичного пара жидкой фазы. Кроме того, нашли применение выпарные аппараты пленочного типа, в которых раствор проходит по поверхности нагрева однократно в виде тонкой пленки. На рис. 7.2-7.3 представлены основные типы выпарных аппаратов.

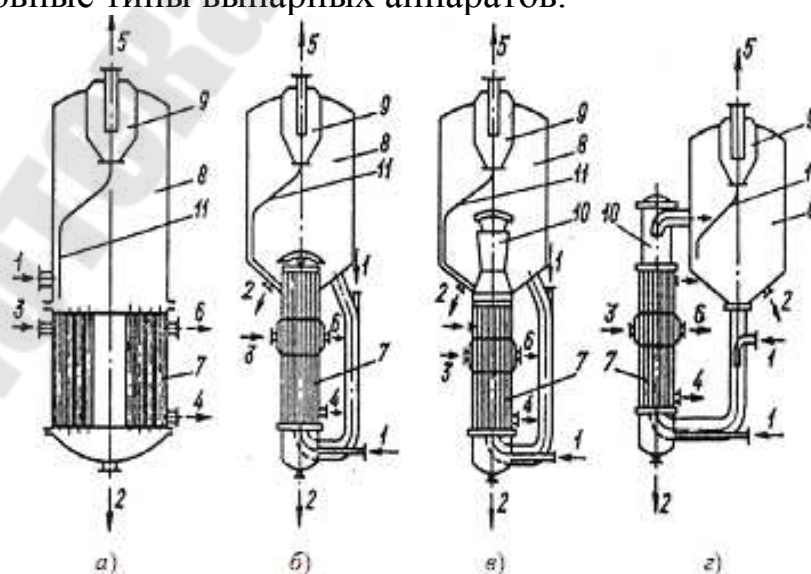


Рис. 7.2. Выпарные аппараты с естественной циркуляцией:

а – с внутренней греющей камерой и центральной циркуляционной трубой; б – с совмещенной зоной нагрева и кипения; в – с вынесенной зоной кипения; г – с вынесенной греющей камерой и опускной циркуляционной трубой; 1 – вход слабого раствора; 2 – выход концентрированного раствора; 3 – вход греющего пара; 4 – выход конденсата; 5 – выход вторичного пара; 6 – выход неконденсирующихся газов; 7 – греющая камера; 8 – паровое пространство; 9 – брызгоотделитель; 10 – зона парообразования; 11 – сливная труба

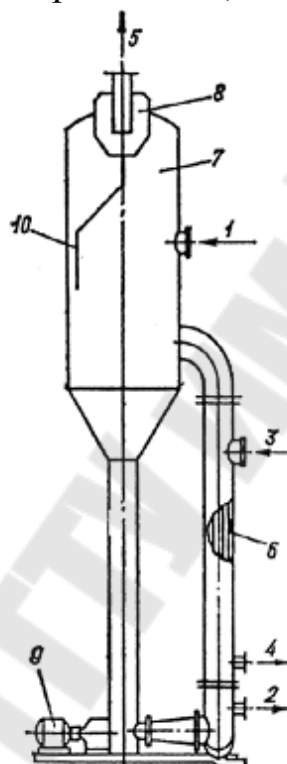


Рис. 7.3. Выпарной аппарат с принудительной циркуляцией:  
 1 – вход слабого раствора; 2 – выход концентрированного раствора; 3 – вход греющего пара; 4 – выход конденсата; 5 – выход вторичного пара; 6 – греющая камера; 7 – паровое пространство; 8 – брызгоотделитель; 9 – насос; 10 – сливная труба

Греющая камера выпарного аппарата с трубчатой поверхностью нагрева представляет собой пучок труб с двумя трубными решетками. Греющий пар подается в межтрубное пространство, а раствор подается в трубы.

В выпарных аппаратах с естественной циркуляцией (рис. 7.3) циркуляция возникает в замкнутой системе, состоящей из необогреваемой опускной (циркуляционной) трубы 1 и обогреваемой (подъемной) кипятильной трубы 2. Естественная циркуляция раствора проис-



ходит вследствие того, что в кипяtilьной трубе жидкость нагревается до более высокой температуры, чем в циркуляционной. Поэтому плотность раствора, находящегося в циркуляционной трубе, больше, чем в кипяtilьной, вследствие чего происходит движение жидкости. Для естественной циркуляции требуются два условия: достаточная высота столба жидкости в опускной трубе для создания необходимой скорости движения парожидкостной смеси в кипяtilьной трубе и высокая интенсивность парообразования в кипяtilьной трубе для получения парожидкостной смеси с возможно малой плотностью.

Парообразование в кипяtilьных трубах определяется физическими свойствами раствора, в основном вязкостью, и разностью температур между стенками труб и жидкостью. Чем меньше вязкость раствора и больше разность температур, тем интенсивнее парообразование и тем больше скорость циркуляции.

#### 7.4. Сушильные установки

*Сушка* представляет собой процесс обезвоживания сырья, материалов и изделий с поверхности или из внутренних слоев путем испарения (тепловая сушка), отжатия, центрифугирования (механическая сушка) или поглощения влаги гигроскопическими материалами (физико-химическая сушка). Наибольшее распространение получил тепловой или термический способ сушки, когда к высушиваемому материалу подводится теплота.

В зависимости от способа подвода теплоты сушильные установки бывают: конвективные, кондуктивные, радиационные, электромагнитные, комбинированные.

По способу действия и по конструкции сушильные установки делятся на установки непрерывного действия, периодического, полунепрерывного; барабанные, шахтные, камерные, туннельные, ленточные, кипящего слоя и т. д. Наибольшее распространение в промышленности получили конвективные сушильные установки непрерывного действия.

В связи с задачей выбора способа сушки влажные материалы делят на шесть основных групп:

- 1) жидкотекучие материалы - истинные и коллоидные растворы, эмульсии и суспензии, т. е. материалы, которые можно перекачивать насосами;

- 2) пастообразные материалы, которые не перекачиваются насосами;
- 3) твердые дисперсные материалы, обладающие сыпучестью во влажном состоянии: пылевидные, зернистые и кусковые;
- 4) тонкие гибкие материалы: ткани, пленки, бумага, картон;
- 5) штучные, массивные, крупногабаритные материалы и изделия: керамика, элементы строительных конструкций, изделия из древесины;
- б) изделия, подвергающиеся сушке после грунтования, окраски, склеивания и других работ на поверхности.

Сушка жидкотекучих материалов. Для получения сухого материала из жидкотекучих растворов или суспензий используют сушилки: вальцовые, вакуум-вальцовые, распылительные, вакуум-распылительные, со слоем инертного твердого носителя, вихревые и т. д. Наиболее распространены распылительные сушилки в связи с их конструктивной простотой, малым термическим воздействием на материал в процессе сушки, возможностью регулирования конечных значений влагосодержания сушеного материала, высокой экономичностью, технологической простотой процесса из-за отсутствия таких промежуточных стадии, как фильтрация, центрифугирование, кристаллизация, размол и т. д. К недостаткам этого способа сушки можно отнести небольшую удельную объемную влагонапряженность установок ( количеством влаги, испаряемой с единицы поверхности полки в единицу времени.) и как следствие - значительные габариты установки, повышенные расходы электроэнергии, необходимость применения систем пылеочистки отходящего сушильного агента.

Распыливающее устройство чаще всего расположено в верхней части сушильной камеры. Сушильный агент (воздух, топочные газы, перегретый пар и т. п.) подается прямотоком или противотоком в сушильную камеру через специальные газоподводящие устройства, способствующие равномерному распределению его по камере. Прямоток позволяет использовать сушильный агент с высокой начальной температурой (до 800 - 1000°C), как правило, без опасности перегрева материала, поскольку до 80 - 90% теплоты передается раствору в зоне факела распыла, что приводит к резкому снижению его температуры. Эффективность и технико-экономические показатели работы распылительных сушилок во многом зависят от работы распылителя. К числу важнейших требований, предъявляемых к распылителям, относят качество распыления, т. е. размер получаемых ка-

пель и их однородность, высокую производительность единичного распылителя, минимальные энергозатраты на распыление, надежность работы, простоту обслуживания и т. д.

На конструкцию и габариты камеры влияют: интенсивность тепло- и массообмена между сушильным агентом и диспергированным материалом, скорость и траектории движения капель и частиц, а также адгезионные свойства продукта.

Сушка твердых дисперсных материалов. Конвективная сушка твердых дисперсных сыпучих материалов проводится в сушилках с плотным слоем, с полувзвешенным и полностью взвешенным слоями материалов.

Расчеты показывают, что порозность плотного слоя шарообразных частиц равного диаметра лежит в пределах от 0,259 до 0,746. Однако в зависимости от распределения частиц по размерам, их формы и размера, способа укладки и уплотнения слоя эта величина может быть больше или меньше указанных значений.

К сушилкам с плотным слоем, в которых сушильный агент фильтруется сквозь слой материала снизу вверх или сверху вниз, относятся шахтные и ленточные. В шахтных сушилках материал перемещается сверху вниз под действием силы веса сплошной массой. Время его пребывания в шахте регулируется количеством отводимого снизу высушенного материала. Для уменьшения гидравлического сопротивления слоя материала и повышения равномерности сушки сушильный агент подают в несколько рядов нагнетающих коробов и отводят соответственно в такое же количество отводящих коробов.

Ленточные сушилки представляют собой аппараты непрерывного действия с ленточным транспортером, на рабочем полотне которых располагают слой сушимый материал (зернистый, кусковой, волокнистый и др.). Эти сушилки нельзя применять для обезвоживания тонкодисперсных пылящих материалов, так как пыль может проваливаться через рабочее полотно и оседать на калориферах. Загрузку материала осуществляют питателем. Сушильный агент циркулирует сквозь слой материала сверху вниз поперек камеры. Ленточные сушилки бывают секционными; количество секций можно менять в зависимости от производительности и температурного режима.

Сушилки с полувзвешенным состоянием материала используют для сушки дисперсных и в том числе кусковых материалов. В них часть материала находится во взвешенном состоянии, что увеличивает поверхность теплообмена. К таким сушилкам относится

валковая сушилка, имеющая в нижней части камеры два вала с насаженными на них лопатками-билами для дробления и разрыхления материала. Сушильный агент, двигаясь над материалом, пронизывает и высушивает его. Отработавший сушильный агент очищается в пылеочистных сооружениях.

Барабанные сушилки широко применяются в крупнотоннажных производствах, поскольку имеют большую производительность, надежны, просты в эксплуатации и экономичны. Основным узлом таких сушилок является вращающийся от электропривода барабан, устанавливаемый на двух роликовых опорах с наклоном в 3 - 4°, как правило, в сторону выгрузки материала. Для предотвращения осевого смещения один из бандажей барабана опирается на опорно-упорный ролик. Барабан вращается с частотой 8 - 12 об/мин. В качестве сушильного агента обычно используют топочные газы. Влажный материал и топочные газы подаются в барабан и движутся в нем прямотоком. Для термостойчивых материалов возможно использование противотока. Для увеличения поверхности теплообмена и коэффициента теплоотдачи от сушильного агента к материалу внутри барабана устанавливают насадку: в начале барабана - приемно-винтовую, а далее по ходу материала - основную в виде лопастей, секторов или их комбинации.

В настоящее время известны разнообразные конструкции сушилок с «кипящим» или псевдооживленным слоем. Распространению этих сушилок способствуют такие их достоинства, как большое количество теплоты, передаваемой в единице объема слоя за счет развитой поверхности материала, изотермичность слоя по высоте и ширине, широкий спектр свойств и состояния сушимых материалов (дисперсных, пастообразных, жидких). При большом разнообразии конструкций сушилок для всех, них характерно наличие газораспределительного устройства, представляющего собой решетку, которая обеспечивает равномерный подвод сушильного агента к слою, а также поддерживает материал при отсутствии потока сушильного агента. Подачу влажного материала, как правило, производят в верхней части сушилки, а отвод - в нижней, на уровне газораспределительной решетки. Недостатком сушилок с кипящим слоем является повышенный расход сушильного агента.

Сушка ленточных материалов. Для сушки гибких ленточных материалов - тканей, бумаги, картона, полимерных пленок и т. п. - используют сушильные установки непрерывного действия, в которых

подвод теплоты осуществляется кондуктивным, конвективным или комбинированными способами: конвективно-радиационным, кондуктивно-радиационным и др.

Достоинствами кондуктивной сушки являются: высокая интенсивность, тепловая экономичность, возможность использования низкопотенциальной теплоты и получения продукта хорошего, качества; недостатками – малый диапазон по толщине сушимых материалов (до 3 - 4 мм), большие габариты, высокая металлоемкость и большая теплоаккумулирующая способность оборудования. Установки с кондуктивным подводом теплоты имеют греющую поверхность в виде полых цилиндров, обогреваемых насыщенным или слабоперегретым паром с давлением до 1 МПа. Поэтому такие установки называются цилиндрическими сушилками. В промышленных контактных сушильных установках влажное полотно бумаги или картона прижимается к цилиндрам лентой из сукна или синтетической сетки.

## **7.5. Ректификационные установки**

### **7.5.1. Основные положения о процессах перегонки и ректификации**

*Перегонка* жидкостей представляет собой процесс, в котором разделяемая жидкая смесь нагревается до кипения, а образующийся пар отбирается и конденсируется. В результате получают жидкость-конденсат, состав которой отличается от состава начальной смеси. Повторяя много раз процессы испарения конденсата и конденсации, можно практически полностью разделить исходную смесь на чистые составные части (компоненты).

Процесс перегонки основан на том, что жидкости, составляющие смесь, обладают различным давлением (упругостью) пара при одной и той же температуре. Поэтому состав пара, а следовательно, и состав жидкости, получающейся при конденсации пара, будут несколько отличаться от состава начальной смеси: легколетучего (или низкокипящего – НК) компонента в паре будет содержаться больше, чем в перегоняемой жидкости. Очевидно, что в неиспарившейся жидкости концентрация труднолетучего (или высококипящего – ВК) компонента при этом должна увеличиться.

В простейшем случае перегонка почти не отличается от выпарки. Но выпарке подвергаются растворы, состоящие из летучего рас-

творителя и практически нелетучего растворенного вещества, а при перегонке в пар переходят и растворитель, и растворенное вещество.

Перегонка является одним из важнейших технологических процессов разделения и очистки жидкостей и сжиженных газов в химической, нефтехимической, фармацевтической, пищевой и других отраслях промышленности.

Перегонку подразделяют на два основных вида: *простую перегонку (или дистилляцию) и ректификацию*. К простой перегонке относят также перегонку с водяным паром и молекулярную дистилляцию.

Под простой перегонкой понимают процесс однократного частичного испарения исходной жидкой смеси и конденсации образующихся при этом паров. Ее применяют для разделения смесей, представляющих собой легколетучее вещество с некоторым содержанием весьма труднолетучих веществ. Обычно простую перегонку используют для предварительного разделения, очистки веществ от примесей, смол, загрязнений. При этом сконденсированные пары называют дистиллятом, а оставшуюся неиспаренной жидкость – остатком.

Ректификация – наиболее полное разделение смесей жидкостей, целиком или частично растворимых друг в друге. Процесс заключается в многократном взаимодействии паров с жидкостью – флегмой, полученной при частичной конденсации паров.

Представим себе аппарат (например, насадочную колонну), в котором снизу движутся пары (рис. 7.4), а сверху навстречу парам подают жидкость, представляющую собой почти чистый НК. При взаимодействии поднимающихся паров со стекающей жидкостью происходят частичная конденсация и частичное испарение жидкости (флегмы) за счет теплоты конденсации. При этом из пара конденсируется преимущественно ВК, а из флегмы испаряется преимущественно НК. Таким образом, стекающая флегма непрерывно обогащается ВК, а поднимающиеся пары – НК. В результате выходящий из колонны пар состоит почти целиком из НК. Пар конденсируют в специальном теплообменнике-конденсаторе (или дефлегматоре – на рис. 7.4 не показан). Часть этого конденсата в виде флегмы идет на орошение колонны, другую часть – дистиллят или ректификат – отбирают как готовый продукт. Жидкость, выходящую из нижней части колонны, называют кубовым остатком. Для образования восходящих потоков паров колонну 1 снабжают кипятильником 6, в котором происходит испарение части кубового остатка.

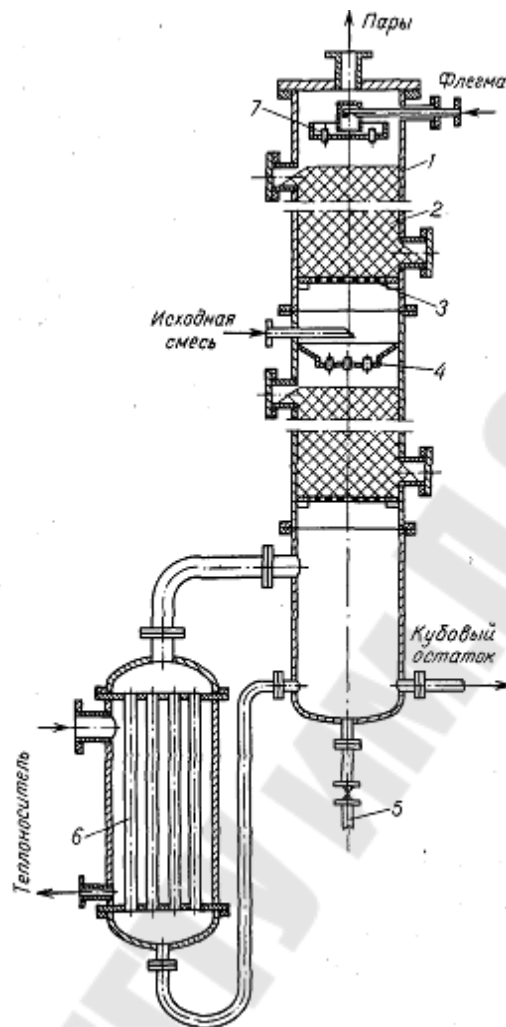


Рис. 7.4. Насадочная ректификационная колонна с кипяильником:

1 – корпус; 2 – насадка; 3 – опорная решетка; 4 – перераспределитель флегмы; 5 – патрубок для слива кубового остатка; 6 – кипяильник; 7 – ороситель

В качестве аппаратов для ректификации используют в основном уже известные из главы 4 тарельчатые, а также насадочные и пленочные колонны. Ректификационные колонны по устройству принципиально не отличаются от абсорберов. Некоторые их особенности будут рассмотрены ниже.

### 7.5.2. Схемы ректификационных установок

Рассмотрим схему ректификационной установки непрерывного действия для разделения бинарной смеси (рис. 7.5).

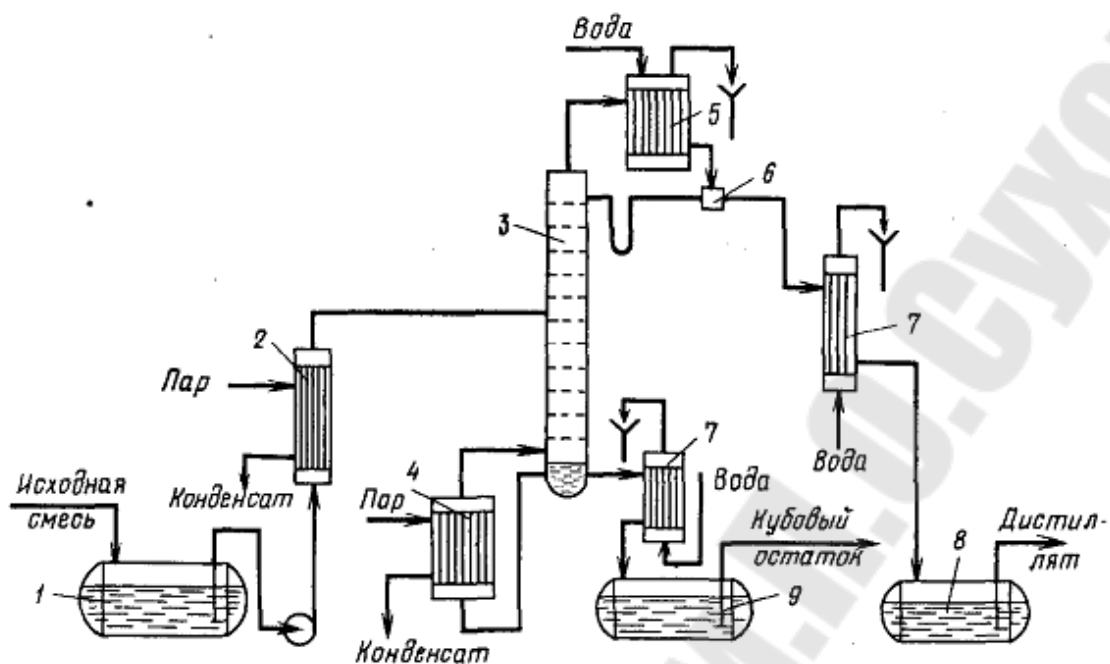


Рис. 7.5. Схема ректификационной установки непрерывного действия: 1 – емкость для исходной смеси; 2 – подогреватель; 3 – колонна; 4 – кипятильник; 5 – дефлегматор; 6 – делитель флегмы; 7 – холодильник; 8 – сборник дистиллята; 9 – сборник кубового остатка

Для непрерывного проведения ректификации необходимо, чтобы поступающая на разделение смесь соприкасалась со встречным потоком пара с несколько большей концентрацией ВК, чем в жидкой смеси. Поэтому исходную смесь подают в то место ректификационной колонны 3, которое соответствует этому условию. Место ввода исходной смеси, нагретой до температуры кипения в подогревателе 2, называют тарелкой питания, или питательной тарелкой. Положение тарелки питания или ввода исходной смеси специально рассчитывается. Тарелка питания делит колонну на две части: верхнюю – укрепляющую и нижнюю – исчерпывающую. В укрепляющей части происходит обогащение поднимающихся паров низкокипящим компонентом, а в исчерпывающей – удаление НК. Поток пара, поднимающегося по ректификационной колонне, поддерживается испарением части кубовой жидкости в кипятильнике 4, а поток жидкости, текущей по колонне сверху вниз, – возвратом части флегмы, образующейся при конденсации выходящих из колонны паров в дефлегматоре 5.



## ТЕМА 8. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТЕПЛОТЫ

По принципу действия холодильные установки делятся на компрессионные, абсорбционные и струйные (пароэжекторные). Компрессионные установки, в свою очередь, делятся на паро- (или газо-) жидкостные (парокомпрессионные) и газовые. В *парокомпрессионных* установках сжатие рабочего тела осуществляется при температурах ниже критической, в газовых – при температурах выше критической.

В *абсорбционных* установках сжатие рабочего тела осуществляется в результате последовательно проводимых процессов поглощения рабочего тела сорбентом (сопровождается отводом теплоты) и дальнейшего выделения рабочего тела с помощью подвода теплоты (десорбция).

*Струйные (пароэжекторные)* установки основаны на использовании кинетической энергии потока рабочего тела для повышения его давления. Струя рабочего тела (пара или газа), выходящая с большой скоростью из сопла, эжектирует сжимаемый поток (всасывание), затем происходит сжатие смеси в диффузоре. Наибольшее распространение получили парокомпрессионные холодильные установки.

Вещества, применяемые в холодильных установках в качестве рабочих тел, называются *хладагентами*, и они должны удовлетворять некоторым определенным требованиям.

Хладагенты должны быть безвредными для здоровья человека и обладать определенными физическими и термодинамическими свойствами. При нормальном атмосферном давлении хладагент должен иметь достаточно низкую температуру кипения, чтобы при работе холодильной машины не было разрежения в испарителе. Конденсация хладагента не должна происходить при высоких давлениях, т. к. это приводит к повышению прочностных характеристик компрессора и конденсатора, что увеличивает габаритно-весовые показатели установки и повышает ее стоимость.

При выборе хладагента большое значение имеет удельная объемная холодопроизводительность, от которой зависят размеры компрессора. При одинаковой общей холодопроизводительности машины объем цилиндров компрессора будет тем меньше, чем больше удельная объемная холодопроизводительность хладагента.

Критическая температура хладагента должна быть как можно выше и в первую очередь выше температуры охлаждающей воды или

воздуха в конденсаторе холодильной машины. Чем выше критическая температура хладагента, тем меньше пара образуется при его дросселировании.

Для предотвращения замерзания хладагента в испарителе его температура замерзания должна быть как можно ниже.

Для уменьшения потерь давления хладагента в трубопроводах и клапанах он должен обладать малой плотностью, а для обеспечения высоких теплопередающих свойств хладагента он должен иметь высокие значения коэффициентов теплопроводности и теплоотдачи. От этого в значительной степени зависит эффективность работы теплообменных аппаратов.

Кроме того, хладагенты не должны быть горючими, взрывопожароопасными; должны обладать химической стойкостью и инертностью по отношению к металлам и смазочным маслам, хорошо растворять воду и иметь невысокую стоимость.

В качестве хладагентов в основном применяют аммиак  $\text{NH}_3$  и фреоны, которые в значительной степени удовлетворяют вышеперечисленным требованиям.

### 8.1. Теоретические циклы и схемы парокompрессионных холодильных машин

Принципиальная схема и цикл в T-s диаграмме парокompрессионной холодильной машины показаны на рис. 8.1.

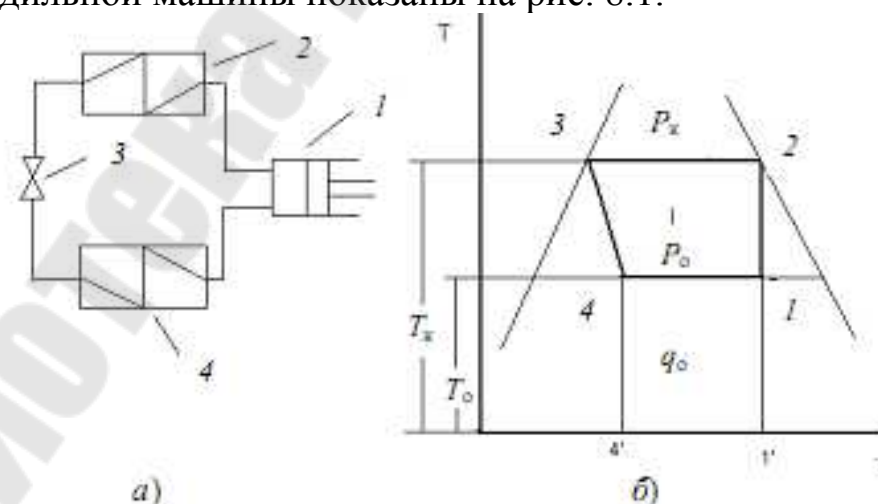


Рис. 8.1. Схема (а) и цикл (б) парокompрессионной холодильной машины:

1 – компрессор; 2 – конденсатор; 3 – регулирующий вентиль; 4 – испаритель

Компрессор всасывает пары хладагента из испарителя, сжимает их по адиабате 1–2 и нагнетает в конденсатор. При этом давление повышается от  $p_0$  до  $p_k$ , а температура – от  $T_0$  до  $T_k$ . В конденсаторе от хладагента отводится теплота конденсации и сжатые пары конденсируются при постоянном давлении и температуре. Здесь:  $p_0$ ,  $T_0$  – давление и температура кипения хладагента в испарителе соответственно;  $p_k$ ,  $T_k$  – давление и температура конденсации паров хладагента соответственно. Процесс конденсации на диаграмме показан линией 2–3 (изобарно – изотермический процесс). Жидкий хладагент из конденсатора направляется через регулирующий вентиль в испаритель. Проходя через регулирующий вентиль (процесс 3–4), хладагент дросселируется с давления конденсации  $p_k$  до давления кипения  $p_0$ ; температура хладагента понижается от температуры конденсации  $T_k$  до температуры кипения  $T_0$ . Принимается, что процесс дросселирования осуществляется при постоянной энтальпии. В испарителе хладагент кипит при постоянном давлении  $p_0$  и температуре  $T_0$  (изобарно-изотермический процесс 4–1). При кипении хладагента осуществляется отвод теплоты от охлаждаемого объекта. Образующиеся пары в состоянии, характеризуемом точкой 1, снова всасываются компрессором.

#### *Цикл с переохлаждением жидкого хладагента*

Современные парокомпрессионные холодильные установки, как правило, с целью повышения холодильного коэффициента работают с переохлаждением жидкого хладагента после конденсатора. Переохлаждение заключается в том, что после процесса конденсации жидкость переохлаждается при давлении конденсации на несколько градусов ниже температуры, соответствующей давлению насыщенных паров в конденсаторе.

В T-s диаграмме (рис. 8.2) процесс переохлаждения изображается линией 3–3'. Температура хладагента в точке 3' называется температурой переохлаждения и обозначается  $t_p$ . С этой температурой хладагент поступает на дросселирование. В регулирующем вентиле процесс дросселирования протекает при энтальпии  $h_3 = \text{const}$ , соответствующей меньшему значению, чем в цикле без переохлаждения.

Переохлаждение жидкого хладагента приводит к увеличению удельной массовой холодопроизводительности и повышению холодильного коэффициента без увеличения затраты работы в компрессоре.

Величина переохлаждения для аммиачных и фреоновых холодильных машин составляет 5–10 °С и достигается это в конденсаторе или в отдельном аппарате – переохладителе (для аммиачных машин), который располагают между конденсатором и регулирующим вентилем.

Во фреоновых холодильных машинах переохлаждение осуществляется в специальных теплообменниках, охлаждающей средой в которых служат пары хладагента, отсасываемые из испарителя.

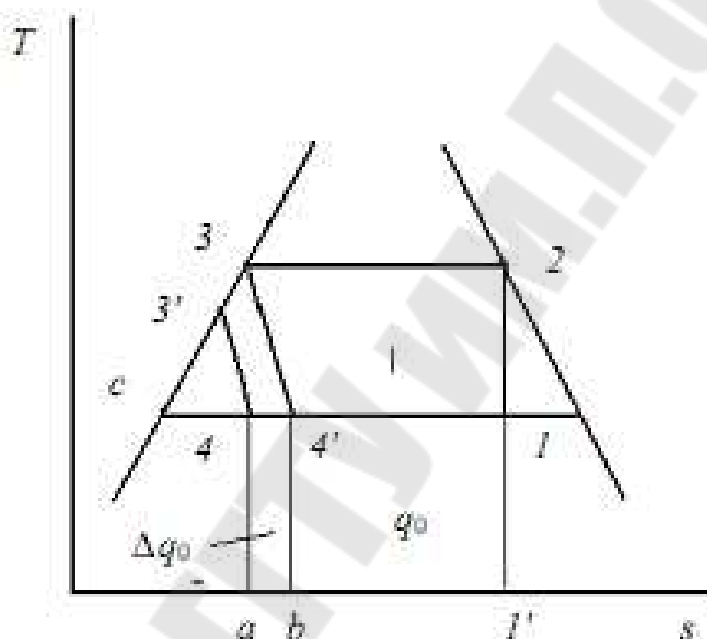


Рис. 8.2. Цикл парокompрессионной холодильной машины с переохлаждением жидкого хладагента

## 8.2. Схемы и циклы двухступенчатых парокompрессионных холодильных машин

При понижении температуры кипения хладагента или повышении температуры конденсации растут необратимые потери в цикле холодильной машины, связанные с отводом теплоты перегрева и дросселированием. Кроме того, при отношении давлений  $(p_k / p_0) \geq 9$  применять одноступенчатое сжатие термодинамически и экономически нецелесообразно, т. к. это приводит к уменьшению коэффициента подачи и кпд компрессора, а, следовательно, к снижению холодопроизводительности машины, к увеличению потребляемой энергии и к

повышению температуры хладагента в конце процесса сжатия, что значительно ухудшает условия эксплуатации компрессора.

Поэтому при температурах кипения порядка от  $-24$  до  $-50$  °С применяют холодильные машины двухступенчатого сжатия с однократным и двукратным дросселированием с неполным и полным промежуточным охлаждением. На рис. 8.3 и 8.4 показаны принципиальные схемы и циклы таких холодильных машин.

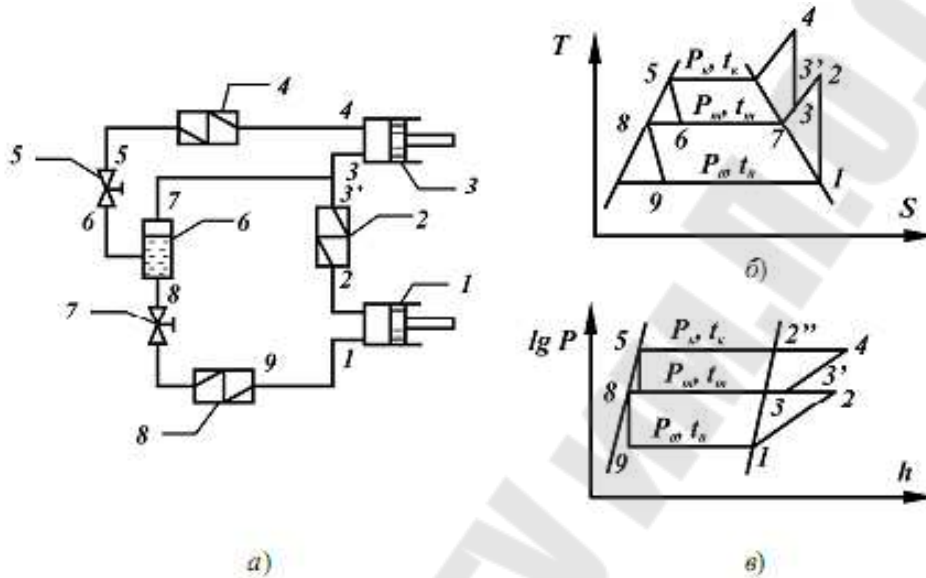


Рис. 8.3. Схема (а) и цикл (б, в) двухступенчатой холодильной машины с неполным промежуточным охлаждением

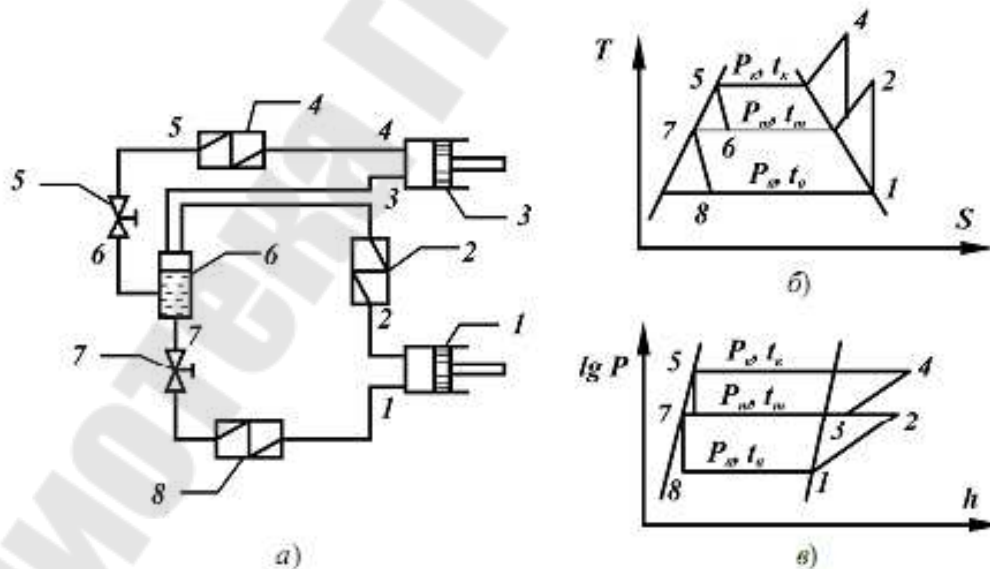


Рис. 8.4. Схема (а) и цикл (б, в) двухступенчатой холодильной машины с полным промежуточным охлаждением

Схема установки с неполным промежуточным охлаждением состоит из ступени низкого давления 1, промежуточного холодильника 2, ступени высокого давления 3, конденсатора 4, первого дроссельного вентиля 5, промежуточного сосуда 6, второго дроссельного вентиля 7 и испарителя 8. Пар, образующийся в испарителе, адиабатно сжимается в ступени низкого давления (процесс 1–2), а затем после охлаждения в промежуточном холодильнике в состоянии 3' смешивается с паром из промежуточного сосуда в состоянии 7. В результате образуется пар в состоянии, характеризуемом точкой 3. Этот пар поступает в ступень высокого давления, адиабатно сжимается и в состоянии 4 направляется в конденсатор. После охлаждения и конденсации паров хладагента (процесс 4–5) жидкий хладагент поступает к дроссельному вентилю, дросселируется (процесс 5–6) и образовавшаяся парожидкостная смесь поступает в промежуточный сосуд, где происходит разделение ее на жидкость (точка 8) и сухой насыщенный пар (точка 7). Из промежуточного сосуда жидкость дросселируется во втором дроссельном вентиле и в состоянии 9 направляется в испаритель. В холодильной машине, работающей по такой схеме, пар в ступень высокого давления поступает перегретым и машина работает с неполным промежуточным охлаждением.

В двухступенчатой холодильной машине, работающей с полным промежуточным охлаждением, пар хладагента поступает в ступень высокого давления в состоянии сухого насыщенного или близкого к нему.

Перегрев достигается в промежуточном сосуде за счет выкипания некоторого количества жидкости в нем и барботажа пара через слой жидкости или пропуска пара через змеевик в промежуточном сосуде (при установке змеевикового промежуточного сосуда марки ПСз).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### Основная литература

1. Бакластов, А.М. Проектирование, монтаж и эксплуатация тепломассообменных установок / А.М. Бакластов, В.А. Горбенко, П.Г. Удыма. – М.: Энергоиздат, 1981. – 336 с.
2. Голубков, Б.Н. Теплотехническое оборудование и теплоснабжение промышленных предприятий / Б.Н. Голубков – М.: Энергия, 2009 – 544с.
3. Елизаров, Д.П. Теплоэнергетические установки электростанций: учебник для вузов / Д.П. Елизаров – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1982. – 264 с.
4. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов / А.Г. Касаткин. – 9-е изд., испр. – М.: Химия, 1973. – 750 с.
5. Луканин, В.Н. Теплотехника: учебник для вузов / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; под ред. В.Н. Луканина. – 2-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 2000. – 671 с .
6. Справочник по теплообменным аппаратам / П.И. Бажан, Г.Е. Каневец, В.М. Селиверстов. – М.: Машиностроение, 1989. – 367 с.

### Дополнительная литература

1. Плановский, А.Н. Процессы и аппараты химической технологии / А.Н. Плановский – СПб.: Химия, 2009 – 303с.
2. Соловьев, Ю.П. Вспомогательное оборудование ТЭЦ, центральных котельных и его автоматизация / Ю.П. Соловьев – М.: Энергия, 2008 – 318 с.
3. Эстеркин, Р. И. Эксплуатация, ремонт, наладка и испытания теплотехнического оборудования: учебник для техникумов / Р. И. Эстеркин. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
4. Юркинский, В. П. Теплотехника. Тепломассоперенос: учеб. пособие для вузов / В.П. Юркинский, И.Б.Сладков, В.А. Зайцев. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2007. - 293 с.

### Электронные учебно-методические комплексы

1. Вальченко, Н. А. Высокотемпературные теплотехнологические установки: электронный учебно-методический комплекс дисциплины / Н. А. Вальченко. - Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2011. УДК: 66.046(075.8)+66.021.4(075.8).

<https://elib.gstu.by/handle/220612/1918>.

2. Новиков, М. Н. Топливо и теория горения: электронный учебно-методический комплекс дисциплины / М. Н. Новиков, Н.В.Широглазова. - Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2011. УДК: 662.6/.8(075.8). <https://elib.gstu.by/handle/220612/1911>.

3. Овсянник А.В. Промышленные тепломассообменные процессы и установки: электронный учебно-методический комплекс дисциплины / А. В. Овсянник, А.В.Шаповалов. - Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2010. УДК: 621.016.4(075.8).

<https://elib.gstu.by/handle/220612/1494>.

4. Овсянник Н.В. Водоподготовка и водный режим котельных установок: электронный учебно-методический комплекс дисциплины / Н. В. Овсянник, Е.Н.Волкова, Д.С.Трошев. - Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2012. УДК: 621.182.12(075.8). <https://elib.gstu.by/handle/220612/2079>.

5. Якимченко В.Г. Котельные установки промышленных предприятий: электронный учебно-методический комплекс дисциплины / В. Г. Якимченко, Н.А.Смирнов. - Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2011. УДК: 621.182(075.8). <https://elib.gstu.by/handle/220612/1960>.

#### Электронный ресурс

1. Водоподготовка и водный режим котельных установок: практикум по одноименному курсу для студентов специальностей 1-43 01 05 "Промышленная теплоэнергетика" и 1-43 01 07 "Техническая эксплуатация энергооборудования организаций" дневной и заочной форм обучения / составители: Н. В. Овсянник, Ю. А. Степанишина, Е. Н. Макеева. - Гомель: ГГТУ, 2016. - 48 с. УДК: 621.182.12(075.8). ББК: 31.37я73. <https://elib.gstu.by/handle/220612/14374>.

2. Горение топлива и снижение вредных выбросов: практикум по одноименной дисциплине для студентов специальности 1-43 01 05 "Промышленная теплоэнергетика" дневной и заочной форм обучения / Е. Н. Макеева. - Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. - 50 с. УДК: 662.61(075.8). ББК: 31.350.4я73. <https://elib.gstu.by/handle/220612/20233>.



3. Котельные установки промышленных предприятий : методические указания к курсовому проектированию по одноименной дисциплине для студентов специальностей 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» дневной формы обучения / В. Г. Якимченко. - Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2013. - 54 с. УДК:621.18(075.8).ББК: 31.38я73.  
<https://elib.gstu.by/handle/220612/2523>.

4. Котельные установки промышленных предприятий : лаборатор. практикум по одноим. курсу для студентов специальностей 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» днев. формы обучения / В. Л. Лиходиевский, В. Г. Якимченко. - Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. - 28 с. УДК: 621.182(075.8). ББК: 31.361я73.  
<https://elib.gstu.by/handle/220612/1315>.

5. Нагнетатели и тепловые двигатели: практикум по выполнению лабораторных работ для студентов специальностей 1-43 01 05 "Промышленная теплоэнергетика" и 1-43 01 07 "Техническая эксплуатация энергооборудования организаций" дневной и заочной форм обучения / Н. А. Вальченко, А. В. Родин. - Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. - 54с.УДК: 621.1:53.08(075.8).ББК: 31.32я73.  
<https://elib.gstu.by/handle/220612/19608>.

6. Промышленные теплообменные процессы и установки: практикум по одноименному курсу для студентов специальностей 1-43 01 05 "Промышленная теплоэнергетика" и 1-43 01 07 "Техническая эксплуатация энергооборудования организаций" дневной и заочной форм обучения / составители: А. В. Овсянник, А. В. Шаповалов, Д. С. Трошев, Т.Н.Никулина. - Гомель: ГГТУ, 2015. - 61 с. УДК: 536.24(075.8). ББК: 31.368я73.  
<https://elib.gstu.by/handle/220612/13191>.

7. Промышленные теплообменные процессы и установки: лабораторный практикум по одноименному курсу для студентов специальностей 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» дневной и заочной форм обучения / А. В. Овсянник, А. В. Шаповалов, Ю. А. Степанишина. - Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2010. - 71 с. УДК: 621.1.016.4(075.8).ББК: 31.31я73.  
<https://elib.gstu.by/handle/220612/1810>

8. Топливо и теория горения: практикум по выполнению лабораторных работ для студентов специальности 1-43 01 05 "Промышленная теплоэнергетика" дневной и заочной форм обучения / М. Н. Новиков, Е. Н. Макеева. - Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2017. - 48 с. УДК: 662.6(075.8).ББК: 31.35я73.<https://elib.gstu.by/handle/220612/15218>.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Тема 1. Топливо и теория горения.....	4
1.1. Твердое топливо.....	5
1.2. Жидкое топливо.....	8
1.2.1. Первичная переработка нефти.....	9
1.2.2. Схема полной переработки нефти.....	11
1.3. Газообразное топливо.....	12
1.3.1. Углеводородные газообразные топлива.....	13
1.4. Альтернативное топливо.....	16
1.4.2. Альтернативные смесевые топлива.....	18
1.4.3. Заменители нефтяных топлив.....	20
1.5. Общие сведения о кинетике горения топлива.....	25
Тема 2. Водоподготовка и водно-химический режим энергооборудования.....	29
2.1. Применение воды в качестве теплоносителя.....	29
2.1.1. Источники загрязнения теплоносителей.....	32
2.1.2. Влияние примесей воды на надежность работы теплоэнергетического оборудования.....	33
2.2. Примеси природных вод. Показатели качества воды.....	35
2.2.2. Классификация, характеристика вод и их примесей.....	39
2.2.3. Технологические, качественные показатели воды.....	41
2.3. Предварительная очистка воды.....	45
2.3.1. Очистка воды методом коагуляции.....	47
2.3.2. Осаждение методами известкования и содоизвесткования.....	50
2.3.3. Осветление воды фильтрованием.....	52
2.3.4. Фильтрующие материалы и их характеристики.....	53

2.3.5. Типы осветлительных фильтров. Эксплуатация осветлительного фильтра.....	56
2.4. Обессоливание воды.....	58
2.4.1 Физико-химические основы ионного обмена .....	59
2.4.2. Ионообменные материалы и их характеристики.....	60
2.4.3. Технология ионного обмена .....	63
Тема 3. Нагнетатели и тепловые двигатели .....	65
3.1. Общие понятия. Классификация и параметры работы нагнетателей.....	65
3.2. Центробежные нагнетатели .....	71
3.2.1. Теоретические основы. Уравнение Эйлера.....	71
3.2.2 Характеристики центробежных нагнетателей .....	73
3.2.3. Работа нагнетателя на сеть. Последовательное и параллельное соединение нагнетателей .....	75
3.2.4. Регулирование центробежных нагнетателей .....	79
3.3. Насосы 80	
3.3.1. Классификация по быстроходности.....	80
3.3.2. Установка насосов. Допустимая высота всасывания по условиям кавитации .....	80
3.4. Тепловые двигатели.....	82
3.5. Паротурбинные установки.....	86
Тема 4. Котельные установки.....	95
4.1. Классификация котельных установок.....	95
4.2. Котельная установка и ее системы.....	97
4.3. Котельный агрегат и его элементы.....	100
4.3.1. Паровые котлы.....	106
4.3.2. Водогрейные котлы .....	109
4.3.3. Котлы-утилизаторы .....	111
4.4. Каркас и обмуровка котла .....	114
4.5. Гарнитура котла .....	117
4.6. Конструкция топочных экранов .....	117

4.7. Барабаны паровых котлов .....	119
4.8. Классификация топочных устройств .....	120
4.9. Пароперегреватели. Виды, классификация, назначение .....	121
4.10. Экономайзеры. Виды, классификация, назначение .....	123
4.11. Воздухоподогреватели. Виды, классификация, назначение .....	127
Тема 5. Высокотемпературные теплотехнологические установки .....	130
5.1. Введение в высокотемпературную теплотехнологию и энергетику теплотехнологии .....	130
5.2. Структурные схемы теплотехнологических реакторов.....	134
5.3. Классификация и виды высокотемпературных теплотехнологических процессов. Классификация высокотемпературных теплотехнологических установок ....	139
5.4. Материальные и тепловые балансы. Основы энергосберегающей теплотехнологии. Структура уравнений материальных балансов. Структура уравнений тепловых балансов.....	141
Тема 6. Теплообменные аппараты .....	144
6.1. Рекуперативные теплообменные аппараты .....	148
6.2. Регенеративные теплообменные аппараты.....	151
6.3. Смесительные теплообменники .....	153
6.3.1. Типы смесительных теплообменников.....	154
Тема 7. Выпарные аппараты, дистилляционные, ректификационные и сушильные аппараты.....	157
7.1. Схемы выпарных установок .....	157
7.3. Основные элементы выпарной установки.....	159
7.4. Сушильные установки.....	161
7.5. Ректификационные установки.....	165
7.5.1. Основные положения о процессах перегонки и ректификации.....	165
7.5.2. Схемы ректификационных установок .....	167
Тема 8. Трансформаторы теплоты .....	169
8.1. Теоретические циклы и схемы парокompрессионных холодильных машин.....	170

8.2. Схемы и циклы двухступенчатых парокompрессионных холодильных машин.....	172
Список литературы .....	175

Библиотека ГГТУ им. П.О.Суворова

# **ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИЙ**

**Пособие**

**для слушателей специальности переподготовки  
1-43 01 78 «Диагностика и техническое обслуживание  
энергооборудования организаций»  
заочной формы обучения**

Составитель **Никулина** Татьяна Николаевна

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 08.11.19.

Рег. № 81Е.

<http://www.gstu.by>