

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ

«КЕРЧЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электрооборудования судов и автоматизации производства

Железняк Александр Александрович

## **СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ**

Учебное пособие

для курсантов специальности 26.05.07 Эксплуатация судового  
электрооборудования и средств автоматики (специализация: Эксплуатация  
судового электрооборудования и средств автоматики) и направления  
бакалавриата 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (профиль  
«Электрооборудование и автоматика судов»)  
очной и заочной форм обучения

Керчь, 2019 г.

**Железняк А.А.** Судовые энергетические установки: учебное пособие / А.А. Железняк. – Керчь, 2019. – 134 с.

Учебное пособие составлено в соответствии с требованиями Международной конвенции ПДНВ с поправками, Кодекса ПДНВ с поправками, а также с учетом рекомендаций IMO Model course 7.08 Electro-technical officer.

Пособие предназначено для курсантов, осваивающих основные образовательные программы по специальности высшего и среднего профессионального образования 26.05.07 Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики (специализация: Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики) и направления бакалавриата 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (профиль «Электрооборудование и автоматика судов»).

Автор:

Железняк Александр Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудование судов и автоматизация производства ФГБОУ ВО «КГМТУ»

Рецензенты:

**Жуков В. А.** – доктор технических наук, доцент, член-корреспондент Национальной академии прикладных наук Российской Федерации, заведующий кафедрой теории и конструкции судовых двигателей внутреннего сгорания ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова»

**Доровской В. А.** – доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудование судов и автоматизация производства ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»

**Токарев Д. А.** – кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации морских судов и сооружений ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

«Рекомендовано Ученым советом Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет» в качестве учебного пособия для обучающихся по основным образовательным программам высшего образования – 26.05.07 Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики (специализация: Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики) и направления бакалавриата 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (профиль «Электрооборудование и автоматика судов»).

Протокол № 11 от «28» ноября 2019 года.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ	6
Тема 1.1 Рабочее тело и параметры состояния	6
1.1.1 Общие понятия.	6
1.1.2 Классификация источников энергии.	7
Тема 1.2 Идеальные газы и газовые смеси.	9
1.2.1 Понятие об идеальных и реальных газах.	9
1.2.2 Теплоемкость газов и газовых смесей	11
1.2.3 Основные термодинамические процессы, используемые при производстве электрической и тепловой энергии.	11
1.2.4 Первый закон термодинамики	13
1.2.5 Понятие об энтальпии.	15
1.2.6 Работа газа и ее графическое изображение.	16
Тема 1.3. Термодинамические процессы.	17
1.3.1 Термодинамические процессы	17
1.3.2 Второй закон термодинамики	24
Тема 1.4. Циклы тепловых машин. Цикл Карно	25
1.4.1 Круговые процессы (циклы).	26
1.4.2 Цикл Карно.	27
1.4.3 Понятие об энтропии. Диаграмма $T - S$ .	29
Тема 1.5. Основы теплотехники	32
1.5.1 Водяной пар и циклы паросиловых установок	33
1.5.2 Таблицы и диаграмма $i - S$ для водяного пара.	37
1.5.3 Схема паросиловой установки.	38
1.5.4 Цикл Ренкина.	38
1.5.5 Способы повышения экономичности цикла паросиловой установки.	39
РАЗДЕЛ 2. СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ	41
Тема 2.1 Судовые двигатели внутреннего сгорания	41
2.1.1 Типы двигателей внутреннего сгорания.	41
2.1.2 Принципиальная схема двигателя внутреннего сгорания	44
2.1.3 Классификация судовых двигателей внутреннего сгорания	45
2.1.4 Принцип действия четырехтактного двигателя	46
2.1.5 Принцип действия двухтактного двигателя	49
2.1.6 Циклы поршневых ДВС	51
2.1.7 Наддув дизелей	52
2.1.8 Показатели работы ДВС	53

2.1.9 Конструктивное исполнение судовых ДВС	55
2.1.10 Состав и свойства топлив, применяемых в ДВС	57
2.1.11 Смазочные материалы для ДВС	59
Тема 2.2. Дизельные судовые энергетические установки	61
2.2.1 Типы главных дизельных энергетических установок, их особенности и комплектация	61
2.2.2 Основные типы дизельных энергетических установок судов промыслового флота	68
2.2.3 Обслуживание судовых двигателей внутреннего сгорания	79
2.2.4 Техника безопасности при эксплуатации двигателей внутреннего сгорания.	81
2.2.5 Техничко-экономические характеристики СЭУ с ДВС и возможности их повышения	82
Тема 2.3. Судовые котельные установки	84
2.3.1 Общие сведения о паровых котлах	85
2.3.2 Конструкции судовых паровых котлов	88
2.3.3 Арматура котлов.	94
2.3.4 Основы автоматического регулирования котлов.	96
2.3.5 Гарнитура котла	98
2.3.6 Процесс сгорания топлива	103
2.3.7 Обеспечение чистоты питательной воды.	105
2.3.8 Обслуживание паровых котлов	106
Тема 2.4. Судовые системы и устройства. Вспомогательные механизмы	110
2.4.1 Системы дизельных энергетических установок	111
2.4.1.1 Топливные системы	112
2.4.1.2 Системы смазочного и охлаждающего масла	114
2.4.1.3 Системы охлаждения	116
2.4.1.4 Системы воздухообеспечения	117
2.4.1.5 Система сжатого воздуха	118
2.4.1.6 Системы выпускных газов	119
2.4.2 Устройство судового нагнетателя	120
2.4.3 Механизмы рулевых устройств	122
2.4.4 Якорно-швартовные, грузовые и буксирные механизмы.	125
2.4.5 Грузовые механизмы.	128
Список используемой литературы	133

## ВВЕДЕНИЕ

Современное судно оборудовано разнообразными машинами и механизмами, которые в совокупности и во взаимосвязи с устройствами и аппаратами образуют судовую энергетическую установку (СЭУ). Для понимания принципа её работы требуется знать теоретические основы технической термодинамики, её основные законы, определения и понятия.

Судовая энергетическая установка представляет собой комплекс взаимосвязанных элементов энергетического оборудования, в которых происходят процессы превращения энергии, заключенной в топливе, в энергию тепловую, механическую и электрическую (см. схему на рисунке 1.1).



Рисунок 1.1 - Схема преобразования энергии в СЭУ

Указанные виды энергии служат для приведения судна в движение, а также для обеспечения средств управления, связи, борьбы за живучесть, собственных нужд экипажа и пассажиров (отопление, освещение, вентиляция, санитарные нужды и др.), осуществления грузовых операций и специальных задач в зависимости от назначения судна (охлаждение трюмов на рефрижераторных судах, лов и переработка рыбы на рыболовных траулерах и т.д.). На несамоходных судах (несамоходные земснаряды, плавучие краны, плавучие доки и др.) энергетическая установка служит для выполнения работ, вытекающих из основного назначения судна и обеспечения нужд экипажа.

Учебное пособие предназначено для курсантов, обучающихся по специальности 26.05.07 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» и направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электрооборудование и автоматика судов»), для которых «Судовые энергетические установки» является профилирующим предметом.

# РАЗДЕЛ 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

## Тема 1.1. Рабочее тело и параметры состояния

При знакомстве с этой темой необходимо изучить, как тепловая энергия превращается в механическую работу, а также понять процесс изменения состояния рабочего тела при взаимных превращениях теплоты и работы. Рабочее тело характеризуется следующими параметрами состояния: давлением, температурой и удельным объемом. В результате изучения темы студент должен знать параметры состояния и единицы их измерения, приборы для измерения, уметь определять их величины практическим и расчетным путем.

Основные вопросы темы:

- рабочее тело и параметры его состояния;
- единицы и способы измерения параметров состояния рабочего тела;
- понятие об энергии, работе, мощности и теплоте. Единицы их измерения.

### 1.1.1 Общие понятия

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

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

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

1. Электромагнитное - взаимодействие между электрически заряженными частицами или телами.
2. Гравитационное - взаимодействие между всеми частицами или телами, имеющими ненулевую массу (покоя или движения)

3. Сильное - взаимодействие между элементарными частицами, имеваемыми адронами, практический интерес представляет взаимодействие между протонами и нейтронами.

4. Слабое. Это взаимодействие ответственное за стабильность или распад элементарных частиц. Практический интерес представляет участие слабого взаимодействия в ядерных реакциях, используемых в атомных электростанциях.

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

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

где  $W$  - энергия,  $f$  - сила взаимодействия,  $\xi$  - обобщенная координата.

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

$$\frac{dW}{dx}i + \frac{dW}{dy}j + \frac{dW}{dz}k = f \quad (1.2)$$

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

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

Существует связь энергии с массой, выражаемая формулой:

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

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

### 1.1.2 Классификация источников энергии

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

Рассмотрим виды источников энергии, относящиеся к первой группе.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### **Контрольные вопросы:**

1. Перечислите параметры состояния рабочего тела, подлежащие непосредственному измерению.
2. Назовите приборы, которыми измеряют параметры состояния. Укажите размерности этих параметров.
3. Поясните, что такое «теплота», «внешняя работа», «внутренняя энергия», «мощность»? Назовите, в каких единицах измеряются эти параметры.

Литература [1, 2, 7]



## Тема 1.2 Идеальные газы и газовые смеси

В реальности идеального газа не существует. Это понятие введено в термодинамику для упрощения расчетов. Взаимосвязь между тремя основными параметрами состояния (давлением, температурой и удельным объемом) выражается уравнением состояния  $PV = RT$ , где  $R = PV/T$  — постоянная для каждого газа величина, называемая удельной газовой постоянной. Необходимо обратить внимание на универсальную газовую постоянную  $R_0 = \mu R$ , являющуюся одинаковой для всех идеальных газов. Теплоемкость газа — также параметр состояния рабочего тела, который можно определить расчетом.

В результате изучения темы студент должен понимать основные законы идеальных газов, физический смысл первого закона термодинамики и уметь определять теплоемкость, энтальпию и другие параметры идеальных газов.

Основные вопросы темы:

- понятие идеального газа, уравнение его состояния;
- газовая постоянная и ее физический смысл;
- закон Авогадро. Уравнение состояния для газовой смеси;
- понятие о реальных газах. Теплоемкость, связь между теплоемкостью при постоянном объеме и давлении;
- энтальпия как параметр состояния;
- первый закон термодинамики и его физический смысл.

### 1.2.1 Понятие об идеальных и реальных газах

Для упрощения расчетов в теплотехнике пользуются понятием идеальных газов. Идеальных газов в природе не существует. Считается, что в этих газах совершенно отсутствуют молекулярные силы, а сами молекулы принимаются за материальные точки, объемом которых можно пренебречь. Такие допущения в практических расчетах дают мало заметные погрешности, но вместе с тем позволяют значительно упростить расчеты.

В отличие от идеальных газов все действительно существующие газы называются реальными.

**Закон Авогадро.** В термодинамике в качестве единицы массового количества вещества часто принимается не универсальная единица массы — килограмм (кг), а индивидуальная для каждого вещества масса — киломоль (кмоль).

Киломолем называется количество вещества, масса которого в килограммах численно равна молекулярной массе. Например, для кислорода  $O_2$ ,

молекула которого состоит из двух атомов с атомной массой 16,1 кмоль =  $16 \times 2 = 32$  кг; для углекислого газа  $\text{CO}_2$  1 кмоль =  $12 + (16 \times 2) = 44$  кг.

Введение понятия «киломоляр» в расчеты оказалось очень удобным, в частности потому, что *объемы киломоля любого идеального газа при одинаковых температурах и давлениях одинаковы*. Это является следствием закона Авогадро, который можно сформулировать так:

количества газов, занимающих одинаковые объемы при одинаковых давлениях и температуре, относятся прямо пропорционально их молекулярным массам и обратно пропорционально их удельным объемам.

Отсюда следует, что объемы молей разных газов, взятых при одинаковых условиях, равны между собой и при нормальных физических условиях составляют величину, равную  $22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ .

Это значит, что, например, 32 кг кислорода (1 кмоль  $\text{O}_2$ ) и 44 кг углекислого газа (1 кмоль  $\text{CO}_2$ ) при  $p = 101,3 \text{ кПа}$  (760 мм рт. ст.) и  $t = 0^\circ\text{C}$  имеют одинаковый объем, равный  $22,4 \text{ м}^3$ .

**Уравнения состояния идеальных газов.** Зависимость между тремя основными параметрами идеального газа (давлением, удельным объемом и температурой) устанавливается уравнением состояния

$$pv = RT, \quad (1.4)$$

где  $R = \frac{pv}{T}$  есть постоянная для каждого газа величина, называемая удельной газовой постоянной.

Удельная газовая постоянная  $R$  есть работа расширения 1 кг идеального газа при нагревании на 1 К при постоянном давлении. В системе СИ работа, как и энергия, выражается в джоулях (Дж). Джоуль — это работа силы 1 Н на расстоянии 1 м. Поэтому удельная газовая постоянная выражается в джоулях на килограмм-Кельвин.

Так как в уравнение (а) входит удельный объем газа, то оно справедливо только для 1 кг газа. Для произвольного же количества его — например для  $M$  кг, уравнение состояния будет иметь вид

$$pv = MRT. \quad (1.5)$$

Если обе части уравнения (а) умножить на молекулярную массу  $\mu$ , получим уравнение состояния для одного киломоля

$$pv\mu = \mu RT, \quad (1.6)$$

где  $v\mu$  — объем 1 килоля  $v_0$ ;

из этого уравнения получаем

$$\mu R = \frac{pv_0}{T}. \quad (1.7)$$

Произведение  $\mu R$  является одинаковым для всех идеальных газов, поэтому оно называется универсальной газовой постоянной и обозначается  $R_0$ .

Универсальная газовая постоянная при номинальных физических условиях составляет

$$R_0 = 8314,3 \text{ кДж(кмоль} \cdot \text{К)} = 847,8 \text{ кгс/м (кмоль} \cdot \text{С)}.$$

## 1.2.2 Теплоемкость газов и газовых смесей

**Понятие о теплоемкости.** Теплоемкостью называется количество тепловой энергии (теплоты), которое нужно подвести к данному количеству вещества (в частном случае газа), чтобы нагреть его на один градус. Это же количество теплоты, но отнесенное к единице количества вещества, называют удельной теплоемкостью.

Так как количество газа может быть измерено в килограммах, кубических метрах и киломолях, то в соответствии с этим в теплотехнике различаются и удельные теплоемкости.

Массовой теплоемкостью газа называется такое количество теплоты, которое нужно подвести к 1 кг газа, чтобы нагреть его на один Кельвин (градус Цельсия). Массовая теплоемкость обозначается буквой  $C$  и измеряется в кДж/(кг·К).

Объемной теплоемкостью газа называется такое количество теплоты, которое нужно подвести к одному кубическому метру газа при нормальных условиях, чтобы нагреть его на один градус. Объемная теплоемкость обозначается буквой  $C'$  ее единица кДж/(м<sup>3</sup>·К).

Мольной теплоемкостью называется такое количество теплоты, которое нужно подвести к одному киломолю газа, чтобы нагреть его на один градус. Мольная теплоемкость обозначается  $C^{\wedge}$ ; единица мольной теплоемкости — кДж/(кмоль·К).

Зависимость между тремя теплоемкостями определяется следующими уравнениями:

— между массовой и мольной

$$C = \frac{C_{\mu}}{\mu} \text{ Дж/(кг·К);} \quad (1.8)$$

— между объемной и мольной

$$C' = \frac{C_{\mu}}{22,4} \text{ Дж/(м}^3\text{·К);} \quad (1.9)$$

— между массовой и объемной

$$C = \frac{22,4C'}{\mu} \text{ Дж/(кг·К).} \quad (1.10)$$

## 1.2.3 Основные термодинамические процессы, используемые при производстве электрической и тепловой энергии

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

В современном понимании термодинамика есть наука, изучающая закономерности теплового движения, взаимную связь с другими видами энергии

и влияние этой связи на свойства физических тел. Различают физическую термодинамику, техническую термодинамику, термодинамику необратимых процессов и некоторые другие направления. Нас будут интересовать некоторые разделы технической термодинамики, применительно к изучению вопросов электро и теплоэнергетики.

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

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

$$T = t + 273,15. \quad (1.11)$$

Где  $t$  температура по шкале Цельсия (сопровождается обозначением С или Ц). Значение одного градуса Кельвина и Цельсия совпадают.

Количество тепловой энергии (теплоты) измеряется в международной системе единиц СИ в Джоулях (Дж). Существует связь со старой единицей калорией:  $1 \text{ Дж} = 0,24 \text{ Кал}$ .

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

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

Удельная теплоемкость - количество теплоты, которое требуется для изменения температуры рабочего тела массой  $1 \text{ кг}$  на  $1$  градус. Вообще существует три вида теплоемкости: массная, объемная и мольная. Мы будем использовать только массную, удовлетворяющую формуле  $c = \frac{dQ}{dT}$  и измеряемую в  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ . Для газов (в частности для водяного пара) различают:

- теплоемкость при постоянном давлении (изобарную), обозначают  $c_p$ ,
  - теплоемкость при постоянном объеме (изохорную), обозначают  $c_v$ ,
  - среднюю теплоемкость для данного интервала температур  $c_{cp}$ ,
- практически в таблицах дается значение этой теплоемкости для интервала  $0 - t_0 \text{С}$ ,

Тогда:

$$Q = c_{cp}(t - 0) = c_{cp} t. \quad (1.12)$$

Энтальпия, по другому теплосодержание. Это понятие говорит о полном внутреннем количестве теплоты и количестве энергии полученной путем воздействия внешней среды на рабочее тело, например путем оказания давления на него. Обычно энтальпию рассчитывают на  $1 \text{ кг}$  массы и выражают формулой:

$$I = U + pv, \quad (1.13)$$

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

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

$$ds = \frac{dQ}{T}, \quad (1.14)$$

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

Рассмотрим примеры использования энтропии. Из этого следует:

$$s = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = s_2 - s_1 = \frac{q_2}{T_2} - \frac{q_1}{T_1} \quad (1.15)$$

Условные пределы интегрирования означают номера состояния рабочего тела. Если принять, что первое состояние соответствует состоянию при абсолютном нуле, также учесть, что из третьего закона (начала) термодинамики следует, что при  $T \rightarrow 0 \lim s = 0$ , то для статического состояния  $i$ -го тела формулу (1.15) можно записать в виде:

$$s_1 = \frac{q_1}{T_1} \quad (1.16)$$

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

$$s_1 = \frac{100}{500} = 0,2, \quad s_2 = \frac{50}{300} = 0,16$$

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

$$s' = \frac{150}{499} = 0,300, \quad s'' = \frac{150}{301} = 0,498.$$

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

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

## 1.2.4 Первый закон термодинамики

**Сущность первого закона термодинамики.** Термодинамика как наука, изучающая процессы преобразования различных форм движения материи,

опирается на наиболее общий, универсальный закон природы — закон сохранения энергии. Полет самолета, нагревание воды в котле, перемещение электронов по проводникам — различные формы движения материи, но все они количественно измеряются одной величиной — энергией.

Разные формы движения материи часто не совсем точно называют видами энергии: механической, тепловой, электрической энергией. Раньше для каждого из этих видов энергии была своя единица измерения — килограммометр, калория, ватт-час и т. д. Системой СИ предусмотрена только одна единица измерения энергии — джоуль. Это возможно лишь потому, что при преобразовании форм движения материи (например, механической в электрическую в генераторе тока) энергия не может исчезать бесследно или создаваться вновь. Неизменность энергии при преобразовании форм движения материи — принцип, называемый законом сохранения энергии или первым началом (законом) термодинамики.

Этот закон не был открыт одним человеком. В древности греческий ученый Архимед в «золотом правиле механики», по существу, коснулся частного случая этого закона. Значительно позже, в эпоху Возрождения, итальянец Леонардо да Винчи это же правило распространил на вращательное движение. Француз Р. Декарт и англичанин Ньютон высказали другие, частные принципы первого закона. М. В. Ломоносов в середине XVIII в. сформулировал первое начало как закон сохранения материи и движения. Количественные соотношения этого закона установили Р. Майнер, Д. Джоуль, Х. Ленц, Г. Гельмгольц и С. Карно.

В тепловых машинах происходит преобразование тепловой формы движения материи в механическую форму и наоборот. Обозначим энергию той и другой формы движения соответственно  $Q$  и  $L$  и согласно первому закону термодинамики получим

$$Q \text{ джоулей} = L \text{ джоулей}.$$

Математически в прежних единицах измерения первый закон выражался более сложным уравнением

$$Q = AL, \quad (1.17)$$

где  $Q$  — количество теплоты, ккал\*;  $L$  — работа, кгс·м;  $A$  — тепловой эквивалент работы, равный  $\frac{1}{427}$  ккал/(кгс·м).

При сгорании одной спички выделяется примерно 1 ккал теплоты. Если бы всю эту теплоту можно было направить в идеальный двигатель, то она могла бы совершить работу, равную 427 кгс·м (поднять семь человек весом по 61 кг на высоту 1 м).

Для получения же 1 кгс·м работы потребуется  $\frac{1}{427}$  ккал теплоты; это число и представляет собой тепловой эквивалент работы.

На судах флота до сего времени мощность двигателей часто выражают в лошадиных силах (л. с.). Работа 75 кгс·м, выполненная за 1 с, соответствует одной лошадиной силе. Тепловой эквивалент энергии 1 л. с.·ч = 632 ккал. Единица измерения энергии 1 кВт·ч эквивалентна 860 ккал.

**Внутренняя энергия.** Возьмем два цилиндра. Пусть в каждом из них содержится по 1 кг одного и того же газа при одинаковых начальных температурах, но в первом цилиндре поршень закреплен неподвижно, а во втором он может

передвигаться. При нагревании газа во втором цилиндре с закрепленным неподвижно поршнем вся подведенная теплота переходит в энергию хаотического движения молекул газа. Происходит как бы накопление энергии в газе. Эта энергия называется внутренней энергией и измеряется в джоулях на килограмм газа. Она зависит только от температуры и измеряется количеством теплоты, которое нужно подвести к 1 кг газа, чтобы нагреть его от 0 К до данной температуры  $T$  при постоянном объеме. Внутренняя энергия обозначается буквой  $U$  и является четвертым параметром состояния газа.

**Математическое выражение первого закона термодинамики.** При нагревании газа в цилиндре с подвижным поршнем подводимая теплота затрачивается не только на повышение внутренней энергии от  $U_1$  до  $U_2$ . Ускоряется беспорядочное движение молекул газа, одновременно растут температуры и давления. Если раньше вес поршня уравнивался давлением  $p$ , то в результате нагревания газа равновесие нарушится. Под действием давления поршень будет перемещаться вверх до тех пор, пока при новом значении объема  $V_2$  давление не возвратится к прежнему значению  $p$ . Следовательно, газом будет совершена работа  $l$  Дж/кг.

Таким образом, в общем случае не все количество подведенной к газу теплоты  $q$  расходуется на увеличение внутренней энергии газа ( $U_2 - U_1$ ); часть ее затрачивается на совершение работы  $l$ :

$$q = (U_2 - U_1) + l \text{ Дж/кг.} \quad (1.18)$$

В прежних единицах измерения первый закон термодинамики записывается так:

$$q = (U_2 - U_1) + Al \text{ ккал/кг.} \quad (1.19)$$

### 1.2.5 Понятие об энтальпии

Если давление газа в цилиндре будет  $p$ , то суммарная сила, которая поднимает поршень, составляет  $pF$ , где  $F$  — площадь поршня.

Работа  $l$ , совершаемая газом при перемещении поршня на величину  $S$ , будет равна произведению силы  $pF$  на путь  $S$ :

$$l = pFS. \quad (1.20)$$

С другой стороны, произведение  $FS$  — есть объем, описываемый при перемещении поршнем; он равен  $V_2 - V_1$ .

Следовательно, подставив это значение  $l$  в уравнение первого закона термодинамики:

$$q = (U_2 - U_1) + pV_2 - pV_1 \quad (1.21)$$

перегруппируем:

$$q = (U_2 + pV_2) - (U_1 + pV_1). \quad (1.22)$$

Величина в скобках  $(U + pV)$  называется энтальпией газа, обозначается буквой  $i$  и измеряется в Дж/кг или ккал/кг. Таким образом,

$$i = U + pV \text{ Дж/кг.} \quad (1.23)$$

Энтальпия, или теплосодержание, является пятым параметром состояния газа. Она численно равна количеству теплоты, затрачиваемой при нагревании 1 кг от 0 К до температуры  $T$  при постоянном давлении. Часть этой теплоты создает

внутреннюю энергию газа  $U$ , а другая часть используется для совершения механической работы  $pU$  расширения при постоянном давлении.

Заменив в уравнении первого закона термодинамики выражения в скобках через  $i_2$  и  $i_1$ , получим

$$q = i_2 - i_1 \text{ кДж/кг.} \quad (1.24)$$

Это значит, что количество теплоты, затраченной на совершение работы расширения (перемещения поршня) в процессе при постоянном давлении, равно разнице энтальпий.

Численные значения энтальпии могут быть найдены по специальным таблицам или диаграммам.

### 1.2.6 Работа газа и ее графическое изображение

При расширении, как известно, газ совершает работу. Для определения работы газа удобно пользоваться диаграммой  $p-v$ . Она строится в системе координат, в которой по горизонтальной оси откладываются удельные объемы  $v$ , а по вертикальной оси — давления  $p$ .

Рассмотрим в координатах  $p-v$  (рисунок. 1.2) процесс изменения состояния газа, когда работа совершается при постоянном давлении.

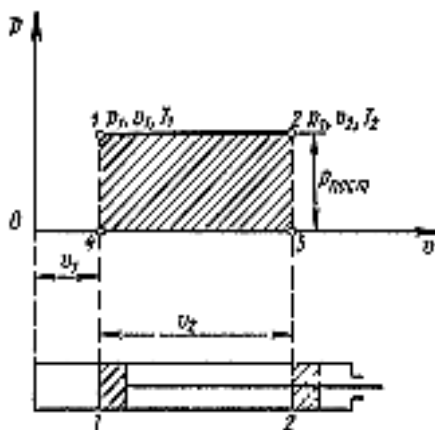


Рисунок 1.2 – Графическое изображение величины работы газа при постоянном давлении

Пусть в начале процесса объем газа равен  $v_1$ , а давление  $p_1$ . Откладываем на горизонтальной оси отрезок, равный в масштабе  $v_1$ , а на вертикальной оси в масштабе отрезок  $p_1$ . Из концов отрезков восставляем перпендикуляры. Пересечение этих двух перпендикуляров дает точку 1, которая и будет графически определять состояние газа до подвода теплоты. После нагревания газа его объем увеличится до значения  $v_2$ ; давление останется по-прежнему равным  $p_1$ . Состояние газа после нагревания будет характеризоваться точкой 2.

Так как процесс перемещения поршня происходит при постоянном давлении, линия процесса 1—2 пойдет параллельно оси объемов.

Произведение давления на объем есть работа:  $p_1(v_2 - v_1) = l$ , при обозначениях, принятых на рисунке 3,  $p_1$  есть высота 1—4;  $(v_2 - v_1)$ —основание 3—4, а произведение высоты на основание есть площадь 1—2—3—4—1.



Таким образом, работа  $l$ , совершаемая газом в процессе, графически представляет собой площадь, ограниченную линией процесса ( $1-2$ ), осью объемов и крайними ординатами процесса ( $1, 4$  и  $2, 3$ ).

### **Контрольные вопросы:**

1. Назовите свойства идеальных газов. Чем отличается идеальный газ от реального?
2. Чему равна универсальная газовая постоянная?
3. Сформулируйте понятие «теплоемкость газа».
4. Что такое «энтальпия»? Какова ее роль в термодинамике?
5. Сформулируйте первый закон термодинамики и поясните его физическую сущность.

Литература [1, 2, 7]

## **Тема 1.3 Термодинамические процессы**

Рабочие процессы в судовых технических средствах протекают при различных условиях. Частными термодинамическими процессами являются: изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный. Все они — частные случаи политропного процесса.

Первый закон термодинамики устанавливает связи при взаимных превращениях тепловой и механической энергии, но не определяет условий, в которых они возможны. Эти условия показывает второй закон термодинамики, который используется при анализе термодинамических циклов, то есть моделей процессов, протекающих в реальных объектах.

После изучения темы студент должен уметь изображать различные процессы в координатах  $P-V$ .

Основные вопросы темы:

- термодинамические процессы: изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный, политропный. Представление этих процессов в координатах  $P-V$ ;
- аналитические выражения термодинамических процессов;
- второй закон термодинамики, физический смысл, формулировки.

### **1.3.1 Термодинамические процессы**

**Основные понятия.** Всякое изменение состояния рабочего тела и связанное с этим изменение всех или некоторых параметров его состояния называется термодинамическим процессом, или просто процессом.

Процессы с газами или паром происходят, например, в цилиндрах тепловых двигателей. При воспламенении горючей смеси в цилиндре двигателя внутреннего

сгорания смесь имеет более высокие давление и температуру, и меньший объем, чем при выходе из цилиндра. Следовательно, при работе в цилиндре двигателя газовая смесь совершает некоторые процессы, в которых изменяются все три основных параметра: давление  $p$ , удельный объем  $v$  и температура  $T$ .

Подобное же явление наблюдается и при работе паровой машины, только не с газовой смесью, а с паром, который поступает в цилиндр машины с одними параметрами, а выходит из цилиндра с другими параметрами ( $p, v, T$ ).

В реальных тепловых двигателях и устройствах (паровой котел, дизель, компрессор, паровая машина) процессы сопровождаются изменением всех параметров состояния. Все изложенные ниже термодинамические процессы являются идеализацией реальных тепловых процессах, которые имеют место в процессе преобразования энергии в паровом котле, вообще в парогенераторе, турбине, вообще в тепловой машине и в, конечном итоге, в электрическом генераторе. Идеализированные термодинамические процессы позволяют разложить на составляющие сложные процессы, что является необходимым этапом изучения (этапом абстрактного мышления) с тем, чтобы потом создать практически приемлемую теорию. Принято процессы изображать в виде диаграмм с координатами: давление удельный объем и температура - энтропия.

Однако для лучшего понимания явлений целесообразно выделить четыре процесса, каждый из которых соответствует постоянному значению одного параметра: **изобарный** ( $p = \text{const}$ ), **изохорный** ( $v = \text{const}$ ); **изотермический** ( $T = \text{const}$ ); **адиабатный** (без теплообмена).

Эти процессы представляют собой частные случаи так называемых **политропных процессов**. Исследуют эти процессы, основываясь на первом законе термодинамики:

$$q = U_2 - U_1 + l \text{ — и уравнении состояния газа } pv = RT.$$

Графически процессы изображаются в координатах  $p-v$ .

**Изобарный процесс.** Изобарный процесс происходит при постоянном давлении газа:  $p = \text{const}$ . Переменными параметрами здесь являются объем и температура.

При нагревании газа, начальные параметры которого составляют  $p_1, v_1, T_1$  (см. рисунок 1.3), поршень переместится из положения 1 в положение 2 и конечное состояние газа выразится параметрами  $p_1, v_2$  и  $T_2$ . Так как давление газа в течение процесса не меняется, в диаграмме  $p-v$  этот процесс изобразится горизонтальной прямой 1—2, которая называется **изобарой**.

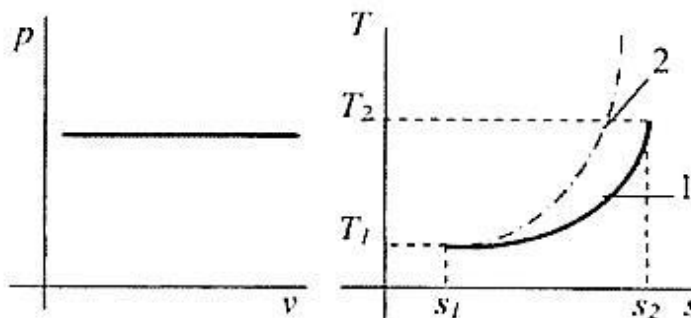


Рисунок 1.3 - изобара

Напишем уравнения состояния газов: конечного состояния  $p_1 v_2 = RT_2$  и начального состояния  $p_1 v_1 = RT_1$ .

Разделив первое уравнение на второе, получим

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (1.25)$$

Таким образом, в изобарном процессе объем газа изменяется пропорционально изменению абсолютной температуры.

Рассмотрим теперь, на что расходуется подводимая теплота  $q$  при изобарном процессе.

При совершении процесса изменяется температура газа (от  $T_1$  до  $T_2$ ); следовательно, будет изменяться и внутренняя энергия  $U$ . Значит, часть теплоты в изобарном процессе пойдет на приращение внутренней энергии  $U_2 - U_1$ .

А так как во время процесса будет перемещаться поршень, то оставшая часть теплоты пойдет на совершение механической работы  $l$  по перемещению поршня.

Работа  $l$ , совершаемая газом в процессе 1—2, изображается в координатах  $p-v$  в некотором масштабе площадью прямоугольника 1—2—3—4.

**Изохорный процесс.** Изохорный процесс происходит в замкнутом пространстве при постоянном объеме:  $V = \text{const}$ . Он может совершаться при нагревании или охлаждении газа в баллоне. В тепловых машинах процессы сгорания топлива в некоторых случаях могут быть близкими к изохорным.

Особенностью изохорного процесса является то, что газ при изменении своего состояния не совершает работы.

Обозначим на диаграмме  $p-v$  (рисунок 1.4) начальное состояние газа точкой 1, определяемой параметрами  $p_1$ ,  $v_1$  и  $T_1$ . Если подведем к цилиндру при неподвижном поршне определенное количество теплоты  $q$ , то температура газа и его давление повысятся до  $T_2$  и  $p_2$ , причем линия процесса выразится прямой 1—2, параллельной оси давления. Эта прямая называется **и з о х о р о й**.

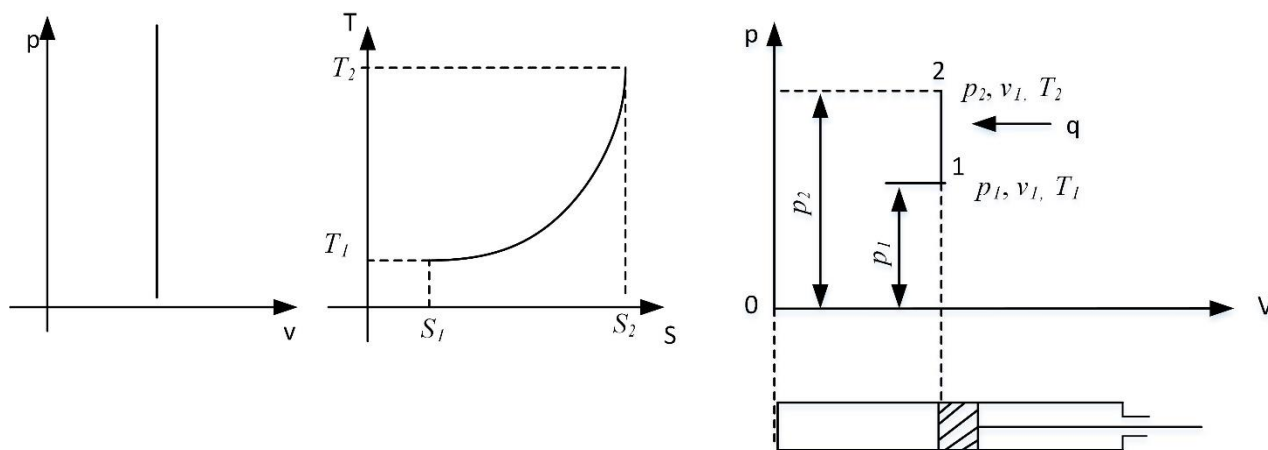


Рисунок 1.4 - Изохорный процесс в диаграмме  $p-v$

Запишем уравнение состояния газа для точек 1 и 2:  $p_1 v_1 = RT_1$ ;  $p_2 v_1 = RT_2$ .

Поделив эти уравнения почленно, получим

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Следовательно, в изохорном процессе давление газа изменяется пропорционально его абсолютной температуре, т. е. при нагревании газа происходит повышение давления, а при охлаждении — понижение.

Общее количество теплоты, участвующей в процессе, определим из основного закона термодинамики:

$$q = (U_2 - U_1) + l. \quad (1.26)$$

Но так как в изохорном процессе механическая работа не совершается, т. е.  $l = 0$ , то  $q = (U_2 - U_1)$ .

Следовательно, вся участвующая в изохорном процессе теплота идет на изменение внутренней энергии газа, в результате чего изменяются его температура и давление.

**Изотермический процесс.** Изотермический процесс происходит при постоянной температуре:  $T = \text{const}$ . Переменными величинами здесь являются объем газа и его давление, поэтому в изотермическом процессе всегда имеем дело с расширением или сжатием газа.

При сжатии температура газа стремится повыситься, поэтому чтобы достигнуть изотермического сжатия, от газа необходимо отводить теплоту. При расширении, наоборот, температура газа стремится понизиться; следовательно, чтобы расширение было изотермическим к газу нужно подводить теплоту.

На рисунке 1.5 показаны схемы охлаждаемого цилиндра и графическое изображение изотермического процесса сжатия  $1 \rightarrow 2$  в диаграмме  $p-v$ . В начале процесса (точка 1) газ характеризуется параметрами  $p_1$ ,  $v_1$  и  $T_1$  после окончания сжатия (точка 2) давление увеличивается до  $p_2$ , объем уменьшается до  $v_2$ , а температура остается прежней  $T_1$ .

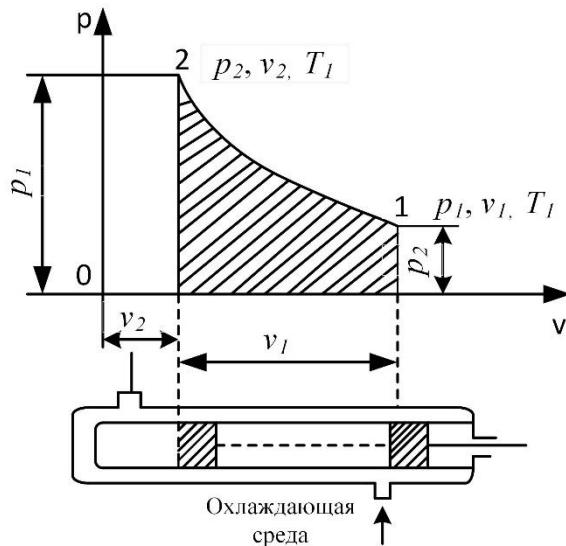


Рисунок 1.5 - Изотермический процесс в диаграмме  $p-v$

Напишем уравнение состояния газа для точек 1 и 2:

$$\begin{aligned} p_1 v_1 &= RT_1, \\ p_2 v_2 &= RT_2 \end{aligned}$$

Следовательно,

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 = \text{const.}$$

Так как произведение давления (ордината  $p$ ) на объем (абсцисса  $v$ ) в изотермическом процессе есть величина постоянная, то линия процесса 1—2, именуемая *изотермой*, представляет собой кривую, называемую *равнобочной гиперболой*.

Чтобы определить, куда расходуется теплота, участвующая в процессе, воспользуемся уравнением первого закона термодинамики:

$$q = (U_2 - U_1) + l. \quad (1.27)$$

Так как в изотермическом процессе температура газа не меняется, то, следовательно, и внутренняя энергия его остается постоянной, т. е.  $U_2 = U_1$ .

Отсюда следует

$$U_2 - U_1 = 0, \quad (1.28)$$

а поэтому уравнение первого закона термодинамики примет вид

$$q = l. \quad (1.29)$$

Из этого уравнения видно, что в изотермическом процессе сжатия работа сжатия  $l$  полностью переходит в теплоту  $q$ . Эта теплота  $q$  для сохранения постоянной температуры газа должна отводиться охлаждающей средой, которая омывает стенки цилиндра. И наоборот, подведенная при изотермическом процессе теплота может полностью быть использована для совершения работы расширения. Значит, изотермический процесс очень выгоден для тепловой машины. К сожалению, в реальных условиях он неосуществим. Работа изотермического сжатия графически в диаграмме  $p-v$  изобразится площадью 1—2—3—4—1.

**Адиабатный процесс.** Адиабатный процесс — это такое изменение состояния газа, при котором к нему не подводится и от него не отводится теплота:  $q = 0$ . Иначе говоря, при адиабатном процессе расширение или сжатие газа происходит таким образом, что между газом и внешней окружающей средой нет теплообмена. Этого можно было бы добиться при идеальной изоляции стенок цилиндра теплового двигателя материалами, абсолютно не проводящими теплоту.

В действительности между стенками цилиндра и рабочим газом всегда существует некоторый теплообмен, поэтому чисто адиабатные процессы неосуществимы. Однако при расчетах тепловых машин этот процесс имеет большое значение, так как быстро протекающие процессы могут приближаться к адиабатным.

Если на диаграмме  $p-v$  (рисунок 1.6) начальное состояние газа отметить точкой 1, то конечное состояние после адиабатного расширения можно представить точкой 2. Линия процесса 1—2 называется *адиабатой*. Адиабата по виду похожа на изотерму, но проходит более круто.

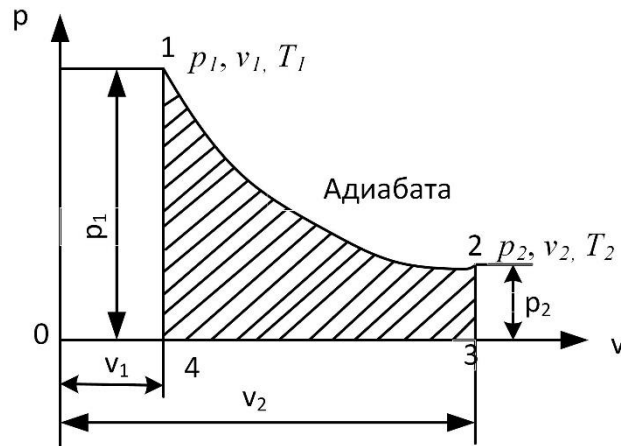


Рисунок 1.6 - Адиабатный процесс в диаграмме  $p-v$ .

При адиабатном процессе все параметры газа  $p$ ,  $v$  и  $T$  являются переменными величинами, зависящими одна от другой. Эта зависимость определяется уравнением адиабаты, которое выводится из нее и имеет вид:

$$pv^k = \text{const.} \quad (1.30)$$

Здесь показатель степени  $k$  есть отношение массовых теплоемкостей  $c_p/c_v$ .

При адиабатном процессе произведение давления на соответствующий объем в степени  $k$  есть величина постоянная, т. е.

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k = pv^k \quad (1.31)$$

или

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

Последним уравнением пользуются при графическом построении адиабаты.

В связи с тем, что в адиабатном процессе внешняя теплота не участвует, возникает вопрос, за счет чего же в этом процессе совершается работа при расширении газа? Для выяснения этого воспользуемся уравнением первого закона термодинамики

$$q = (U_2 - U_1) + l. \quad (1.32)$$

Так как в адиабатном процессе  $q = 0$ , то

$$(U_2 - U_1) + l = 0, \quad (1.33)$$

откуда

$$l = -(U_2 - U_1)$$

или

$$l = U_1 - U_2 \quad (1.34)$$

Следовательно, работа в адиабатном процессе расширения совершается за счет внутренней энергии газа, т. е. теплоты, содержащейся в газе. При этом внутренняя энергия, которая в начале процесса была больше ( $U_1 > U_2$ ), уменьшается. Графически в диаграмме  $p-v$  работа расширения изображается площадью  $1-2-3-4-1$ .

**Политропные процессы.** Реальные процессы сжатия и расширения в тепловых двигателях близки к политропным.

В политропном процессе взаимосвязь давления с удельным объемом выражается следующим уравнением:

$$pv^n = \text{const}, \quad (1.35)$$

где  $n$  — показатель политропы, зависящий от условий протекания процесса; он может иметь любое численное значение.

Например, если  $n = 0$ , то  $pv^0 = \text{const}$ , а так как  $v^0=1$ , то  $p = \text{const}$ . Следовательно, данный процесс протекает при постоянном давлении и является изобарным.

Если  $n = 1$ , то уравнение примет вид  $pv = \text{const}$ , т. е. превратится в уравнение изотермического процесса.

При  $n=k$  уравнение политропы превращается в уравнение адиабатного процесса  $pv^k = \text{const}$ .

Можно показать, что при  $n = \infty$  уравнение политропы обращается в уравнение изохорного процесса. Для этого нужно лишь предварительно из обеих частей уравнения  $pv^n = \text{const}$  извлечь корень степени  $n$ :

$$p^{1/n}v = \text{const}. \quad (1.36)$$

Подставив затем в это равенство  $n = \infty$ , получим  $v = \text{const}$ .

Из сказанного следует, что ранее рассмотренные процессы — изобарный, изохорный, изотермический и адиабатный — являются частными случаями политропного процесса.

Взаимное расположение изобары, изохоры, изотермы, адиабаты, проходящих через одну общую точку  $A$  в осях  $p$  —  $v$  называются политропами.

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

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

$$q_T = -\lambda \text{ grad}t, \quad (1.37)$$

где  $q_T$  - удельный тепловой поток [Вт/м<sup>2</sup>],  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности [Вт/мград],  $t$  - температура, поскольку берется градиент температуры, то температуру можно брать как в градусах Кельвина, так и в градусах Цельсия.

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

$$q_K = a_K \Delta t, \quad (1.38)$$

где  $q_K$  - удельный поток теплоты [Вт/м<sup>2</sup>],  $a_K$  - коэффициент конвективной теплоотдачи [Вт/м<sup>2</sup>град],  $t$  - температура в любых градусах, поскольку берется разность температур между греющей средой и нагреваемой.

### 1.3.2 Второй закон термодинамики

**Сущность второго закона термодинамики.** Первый закон термодинамики выражает всеобщий закон сохранения энергии при преобразовании форм движения материи, но не оговаривает условий таких преобразований. Опыт показал, что между двумя формами передачи энергии — теплотой и работой — имеется существенная разница. Преобразование упорядоченного движения тела в неупорядоченное движение частиц самого тела может происходить без каких-либо дополнительных процессов. Например, резец на токарном станке за счет большей части подаваемой к нему механической энергии производит работу снятия стружки; при этом работа трения резца о металл превращается в теплоту. Кроме того, при трении в подшипниках в передаточных механизмах некоторое количество механической энергии, передаваемое станком, тоже превращается в теплоту.

Превращение работы в теплоту происходит везде, где имеется трение: при трении в подшипниках гребного вала, трении гребного вала в воде, трении при движении жидкостей паров и газов в трубопроводах и т. д. Обратное преобразование неупорядоченного движения частиц тела в упорядоченное (превращение теплоты в работу) обязательно должно сопровождаться дополнительным процессом. Например, в любом действующем двигателе внутреннего сгорания нельзя превратить в механическую энергию всю теплоту, полученную от сгорания топлива в цилиндрах. Обязательным условием работы двигателя является осуществление дополнительного процесса — передача части теплоты окружающей среде с отработавшими газами и с водой, которая охлаждает двигатель.

Итак, основные положения второго закона термодинамики сводятся к следующему:

- 1) в непрерывно действующем двигателе теплота не может быть полностью превращена в работу;
- 2) в то же время любая энергия, затраченная на производство работы, может сполна перейти в равновеликое количество теплоты;
- 3) переход теплоты от нагретого тела к холодному осуществляется при всех условиях самопроизвольно, тогда как обратный процесс — переход теплоты от холодного тела к горячему — самопроизвольно осуществляться не может;
- 4) для работы теплового двигателя необходимы, по крайней мере, два источника теплоты — горячий и холодный, имеющие разные температуры.

В этом и кроется причина, по которой нельзя перевести в работу тепловую энергию окружающего нас атмосферного воздуха или воды морей и океанов: отсутствует второй источник теплоты с более низкой температурой.

Таким образом, второй закон термодинамики раскрывает условия, необходимые для превращения теплоты в работу.

Второй закон термодинамики является очень важным дополнением к первому закону. Первый закон говорит о том, что для получения работы необходимо затратить теплоту и что нельзя получить работу из ничего, т. е. нельзя построить вечный двигатель первого рода. Второй закон термодинамики говорит



о невозможности создания вечного двигателя второго рода, т. е. о том, что нельзя построить двигатель, в котором вся теплота, подведенная к рабочему телу, превращалась бы в работу.

Прикладное значение второго закона термодинамики проявляется, в частности, при анализе термодинамических циклов.

### **Контрольные вопросы:**

1. Перечислите виды термодинамических процессов. В каком из них все подводимое к рабочему телу тепло расходуется на изменение внутренней энергии?
2. Какие процессы называются адиабатными и политропными?
3. Используя первый закон термодинамики, проанализируйте изобарный и адиабатный процессы.
4. Приведите различные формулировки второго закона термодинамики, поясните его физическую сущность.

Литература [1, 2, 7]

### **Тема 1.4 Циклы тепловых машин. Цикл Карно**

Цикл представляет собой круговой процесс, состоящий из совокупности различных термодинамических процессов, в результате которых совершается работа, а рабочее тело возвращается в начальное состояние.

Термодинамические циклы могут быть прямыми и обратными. Тепловые машины работают по прямому циклу, холодильные — по обратному. Эталонном для оценки термодинамического совершенства тепловых машин является цикл Карно. При анализе термодинамических циклов используется энтропия  $S$  — параметр состояния рабочего тела. Тепловые процессы удобно графически изображать в виде диаграмм, одной из координат которых является энтропия.

В результате изучения темы студент должен уметь изображать цикл Карно в координатах  $P$ — $V$  и  $T$ — $S$  и анализировать его КПД.

Основные вопросы темы:

- круговые процессы или циклы, термический КПД цикла;
- цикл Карно, его изображение в различных координатах и анализ;
- энтропия как признак теплообмена и параметр состояния рабочего тела, выражение энтропии через параметры состояния.

### 1.4.1 Круговые процессы (циклы)

В тепловых двигателях превращение теплоты в работу происходит с помощью рабочего тела, которое воспринимает теплоту от внешних источников и расширяется, совершая полезную работу. Для работы тепловой машины требуется постоянное повторение процесса расширения, т. е. рабочее тело после расширения удаляется и заменяется новым, в таком же количестве и в том же составе, или возвращается в первоначальное состояние.

Определенная совокупность термодинамических процессов, в результате которых рабочее тело возвращается в начальное состояние, а величины, характеризующие это состояние ( $p$ ,  $v$ ,  $T$  и др.), принимают прежние значения, называется круговым процессом, или циклом.

Циклы бывают прямые и обратные. В том и в другом циклах осуществляются подвод и отвод теплоты, но в прямом цикле это сопровождается получением работы, а в обратном — ее затратой.

В различных системах координат циклы изображаются замкнутыми линиями. В прямом цикле, показанном на рисунке 1.7, процесс расширения изображается линией  $AmB$ , а в процессе сжатия — линией  $BnA$ , расположенной ниже линии расширения. Прямой цикл, изображенный в системах координат, протекает по часовой стрелке.

Работа сжатия, осуществляемая внешними силами, изображается площадью  $aAnBba$ . Работа расширения, совершаемая за счет подвода теплоты, изображается площадью  $aAmBba$ .

За каждый цикл работа расширения, получающаяся в результате подвода теплоты  $q_1$ , расходуется на компенсацию работы сжатия, производимой внешними силами, а избыток механической работы, который изображен заштрихованной площадью, ограниченной линией цикла  $AmBnA$ , может быть использован для приведения в действие гребных винтов, электрогенераторов и т. д.

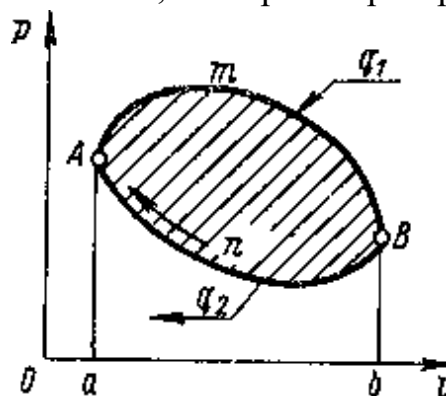


Рисунок 1.7 - Прямой цикл в диаграмме  $p—V$

Таким образом, в прямом цикле в процессе расширения подводится теплота, в результате чего совершается внешняя работа, эквивалентная площади  $AmBnA$ .

По прямому циклу работают тепловые двигатели — паровые машины и турбины, двигатели внутреннего сгорания и газовые турбины.

Обратными называются циклы, на осуществление которых расходуется работа. Обратный цикл изображен на рисунке 1.8.

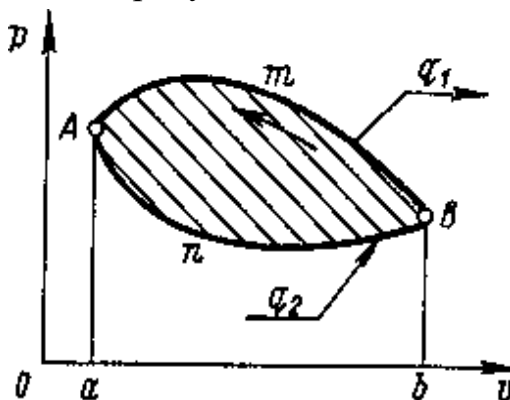


Рисунок 1.8 - Обратный цикл в диаграмме  $p—V$

Линия сжатия  $BmA$  у обратного цикла проходит выше линии расширения  $AnB$ . Обратный цикл протекает против хода часовой стрелки. Работа сжатия в обратном цикле, т. е. работа внешних сил, обозначенная площадью  $BmAabB$ , больше работы расширения (площадь  $AnBbaA$ ). Поэтому для совершения такого цикла необходима затрата внешней работы, измеряемая заштрихованной площадью, ограниченной линией цикла  $BmAAnB$ . По обратному циклу работают холодильные машины, отбирающие теплоту от холодного тела и передающие ее горячему, на что и затрачивается внешняя работа.

Прямой цикл сопровождается подводом теплоты. Степень использования теплоты, т. е. выгодность цикла, оценивается термическим коэффициентом полезного действия (к. п. д.), который обозначается буквой  $\eta$  с индексом  $t$ .

Если в прямом цикле  $q_1$  — теплота, подведенная во время процесса расширения, а  $q_2$  — теплота, которая отводится во время сжатия, то  $q_1 - q_2$  — полезная теплота, превращенная в работу.

Отношение же полезной теплоты ко всей подведенной теплоте и есть термический к. п. д.:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1}.$$

или

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} \quad (1.39)$$

Он показывает, какая часть теплоты в цикле превращается в работу.

### 1.4.2 Цикл Карно

Из уравнения 1.43 видно, что  $\eta_t$  тем больше, чем при данном  $q_1$  меньше  $q_2$ , т. е. чем меньше теплоты отводится.

В пределе  $\eta_t$  равно единице, когда  $q_2 = 0$ , т. е. когда нисколько теплоты не отводится, а вся она превращается в работу. Однако же, как было выяснено из второго закона термодинамики, в тепловом двигателе вся теплота не может быть превращена в работу, а поэтому не может равняться нулю.

Следовательно,  $\eta_t$  никогда не может достигнуть единицы.

В связи с этим возникает вопрос, по какому циклу должен работать тепловой двигатель, чтобы иметь наивысший возможный  $\eta_t$ . Ответ на этот вопрос дал в 1824 г. французский инженер и ученый Сади Карно. Он предложил цикл, названный его именем.

Цикл Карно — идеальный, практически неосуществимый, так как для реализации этого цикла необходима тепловая машина с идеальной теплоизоляцией; кроме того, рабочее тело должно периодически сообщаться с теплоприемником и теплоотдатчиком.

Цикл Карно, как и любой другой, может быть прямым и обратным.

Прямой цикл Карно в графическом изображении (рисунок 1.9) состоит из двух адиабат и протекает в такой последовательности:

- изотермическое расширение  $1—2$  с подводом теплоты от горячего источника;
- адиабатное расширение  $2—3$ , при котором температура газа понижается от  $T_1$  до  $T_2$ ;
- изотермическое сжатие  $3—4$  с отводом теплоты;
- адиабатное сжатие  $4—1$ , при котором температура газа повышается от  $T_2$  до  $T_1$ .

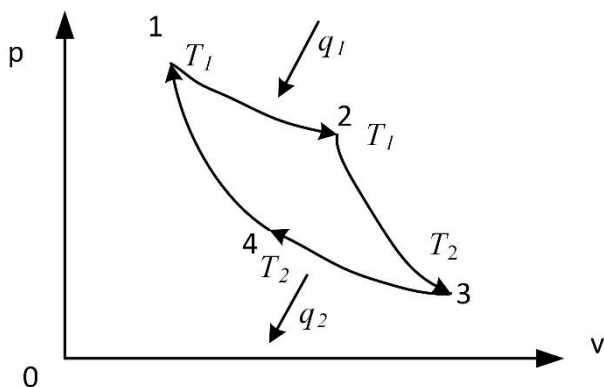


Рисунок 1.9 - Цикл Карно в диаграмме  $p—v$

Наивысшая температура рабочего тела в цикле принимается  $T_1$  низшая температура  $T_2$ .

Термический к. п. д. цикла Карно определяется по формуле, аналогичной выражению термического к. п. д. произвольного цикла:

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (1.40)$$

Из этой формулы следует, что термический к. п. д. наивыгоднейшего из всех возможных циклов — цикла Карно — не может быть равен единице. Это могло бы быть при  $T_2 = 0$  ( $t_2 = -273^\circ\text{C}$ ) или  $T_1 = \infty$ , что практически невозможно.

Прямой цикл Карно имеет для теплотехники огромное значение, так как позволяет определять максимально возможный при данных температурах термический к. п. д. теплового двигателя.

Например, если действительный двигатель внутреннего сгорания имеет высшую температуру в цикле — температуру сгорания рабочей смеси  $1800^\circ\text{C}$  и низшую — температуру свежей рабочей смеси, поступающей в цилиндр,  $50^\circ\text{C}$ , то

его термический к. п. д. не превышает 50%. Если бы этот двигатель внутреннего сгорания при данных температурах работал по циклу Карно, то максимально возможный термический к. п. д. его был бы равен

$$\eta_t = 1 - \frac{50+273}{1800+273} = 0,85.$$

Обратный цикл Карно протекает против хода часовой стрелки. В обратном цикле Карно в результате затраты внешней работы теплота от более холодного тела передается более нагретому. Обратный цикл Карно является идеальным циклом холодильных установок.

Эффективность работы холодильной установки оценивают холодильным коэффициентом, который обозначается буквой  $\epsilon$ . Холодильный коэффициент представляет собой отношение теплоты, отобранной от более холодного тела, к теплоте, эквивалентной работе, затраченной на осуществление цикла.

Например, если в обратном цикле Карно от холодного тела отбирается и передается более нагретому телу 1400 кДж теплоты, а на создание работы по отбору теплоты расходуется 1000 кДж, то

$$\epsilon = 1 - \frac{1400}{1000} = 1,4.$$

Практически холодильный коэффициент цикла Карно определяется по формуле

$$\epsilon = \frac{T_2}{T_1 - T_2}, \quad (1.41)$$

где  $T_1$  — температура нагретого тела;  $T_2$  — температура холодного тела.

Значение обратного цикла Карно для теплотехники тоже велико, так как позволяет определить максимально возможный для данного диапазона температур холодильный коэффициент. Например, если реальная холодильная установка охлаждает какое-то тело до  $t_2 = -30^\circ \text{C}$  и имеет наивысшую температуру рабочего цикла  $t_1 = +27^\circ \text{C}$ , то рабочий холодильный коэффициент этой установки составляет 3,2. Если бы эта холодильная установка работала по обратному циклу Карно, то при данном диапазоне температур максимально возможный холодильный коэффициент был бы

$$\epsilon = \frac{t_2 + 273}{(t_1 + 273) - (t_2 + 273)} = \frac{-30 + 273}{(27 + 273) - (-30 + 273)} = 4,27$$

Следовательно, степень совершенства современной холодильной установки составляет

$$\frac{3,2}{4,27} \approx 0,75 \approx 75\%.$$

### 1.4.3 Понятие об энтропии. Диаграмма $T—S$

Цикл Карно является частным случаем общего термодинамического цикла, следовательно, для него можно записать

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad \text{или} \quad \frac{q_2}{q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

Отсюда имеем

$$q_2 = \frac{q_1}{T_1} T_2. \quad (1.42)$$

Как видим, величина  $q_2$ , которая представляет собой теплоту, уходящую в окружающую среду, зависит от двух сомножителей: отношения  $q_1/T_1$  и температуры  $T_2$ . Если эту температуру считать постоянной величиной, то потеря теплоты  $q_2$  практически зависит только от отношения  $q_1/T_1$ . Чем больше это отношение, тем больше потеря  $q_2$ .

Учитывая большую роль отношения  $q/T$ , ему дали специальное название в термодинамике — энтропия.

Энтропия является параметром состояния и измеряется в тех же единицах, что и массовая теплоемкость, т. е. в кДж/(кг • К) или ккал/(кг • °С). Обозначают энтропию буквой  $S$ :

$$S = \frac{q}{T} \quad (1.43)$$

Таким образом, в термодинамике используются три основных параметра:  $p$ ,  $v$  и  $T$  (давление, удельный объем и температура) и три дополнительных:  $U$ ,  $i$  и  $S$  (внутренняя энергия, энтальпия и энтропия).

В цикле Карно энтропия не изменяется:  $S_1 = S_2 = q_1/T_1 = q_2/T_2$ . Неизменна энтропия и при адиабатном процессе. Однако в реальных циклах и процессах постоянства энтропии не наблюдается.

Чтобы понять физический смысл энтропии, рассмотрим такой пример. Двигатель внутреннего сгорания вращает гребной винт судна. Часть тепловой энергии отдается заборной воде, часть тратится на совершение работы. Полученная работа в конечном итоге расходуется на трение частиц воды, возмущенной гребным винтом, т. е. опять-таки превращается в тепловую энергию, которая поступает в окружающую среду. Эта тепловая энергия уже не может быть превращена в работу, она теряется в окружающей среде бесполезно; в этом случае говорят, что энергия рассеивается. Мерой рассеивания энергии и служит энтропия.

Если учесть, что температура заборной воды  $T_2$  меньше, чем температура газов  $T$  в цилиндре двигателя, то получается, что в результате передачи теплоты  $Q$  энтропия увеличивается:  $Q/T_2 > Q/T_1$ .

Так как энтропия является параметром состояния, то ее можно использовать как одну из координат для графического изображения процессов. Наглядной и удобной для расчетов является система координат, в которой по оси абсцисс откладывается энтропия, а по оси ординат — абсолютная температура. Если в такой системе координат нанести линии процессов, получится диаграмма  $T—S$ .

Рассмотрим, как будут изображаться в этой диаграмме различные процессы. Изотермический процесс, как протекающий при постоянной температуре, имеет вид прямой линии 1—2 (рисунок 1.10), параллельной оси абсцисс. При расширении к рабочему телу подводится теплота, в результате чего энтропия увеличивается от  $S_1$  до  $S_2$ .

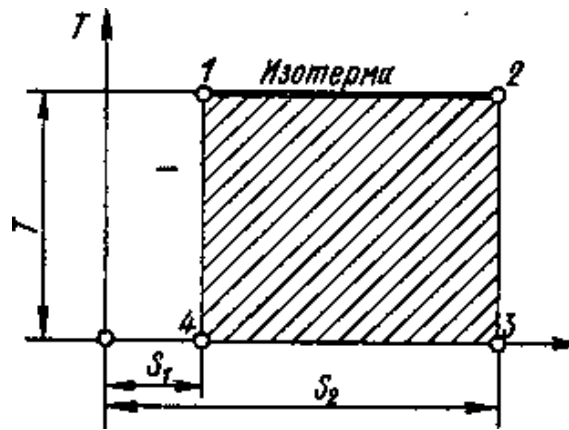


Рисунок 1.10 - Изображение изотермического процесса в диаграмме  $T-S$ .

Произведение энтропии на абсолютную температуру дает количество теплоты, участвующей в процессе. В данном процессе энтропия составляет  $S_1-S_2$ , следовательно,  $(S_1-S_2)T=q$ .

Графически  $S_1-S_2$  представляет собой основание, а  $T$ —высоту; произведение этих двух сомножителей дает площадь. Таким образом, в диаграмме  $T-S$  площадь, ограниченная линией процесса, ее крайними ординатами и осью абсцисс, определяет количество теплоты, участвующей в процессе.

Напомним, что в диаграмме  $p-v$  аналогичная площадь изображает работу.

Адиабатный процесс, как известно, протекает без теплообмена, следовательно,  $q=0$ , а  $S = const$ ; температура изменяется. Это значит, что адиабата должна идти параллельно оси ординат (рисунок 1.11).

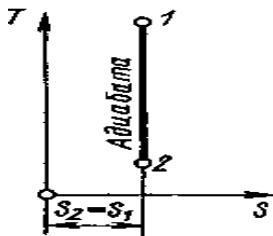


Рисунок 1.11 - Изображение адиабатного процесса в диаграмме  $T-S$ .

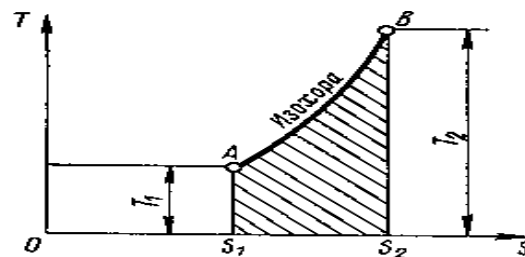


Рисунок 1.12 - Изображение изохорного процесса в диаграмме  $T-S$ .

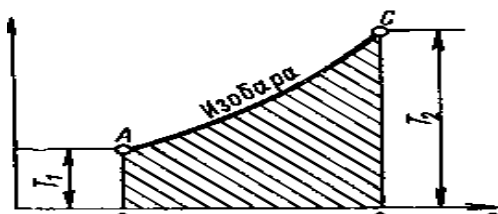


Рисунок 1.13 - Изображение изобарного процесса в диаграмме  $T-S$ .

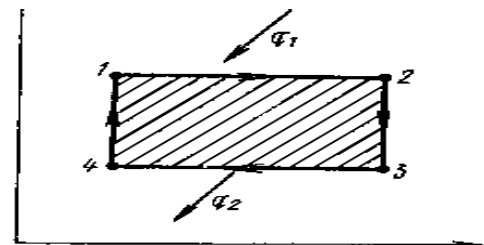


Рисунок 1.14. Цикл Карно в диаграмме  $T-S$ .

Изохорный (рисунок 1.12) и изобарный (рисунок 1.13) процессы изображаются кривыми  $AB$  и  $AC$ , причем изохора идет круче изобары. Заштрихованные площади представляют собой количество теплоты, участвующей в процессах.

Рассмотрим, как выглядит цикл Карно в диаграмме  $T — S$  (рисунок 1.14). Изотермическое расширение  $1—2$  изображается прямой, параллельной оси абсцисс; поскольку к рабочему телу подводится теплота, энтропия его увеличивается (процесс направлен вправо от точки  $1$ ).

При адиабатном расширении температура тела снижается, а так как адиабата в диаграмме  $T — S$  изображается вертикально, то процесс от точки  $2$  направлен по ординате вниз ( $2—3$ ). Изотермическое сжатие сопровождается отводом теплоты  $q_2$ , энтропия при этом уменьшается. Следовательно, процесс сжатия представляет собой отрезок горизонтальной прямой  $3—4$ .

Адиабатное сжатие имеет вид прямой  $4—1$ . Площадь диаграммы  $1—2—3—4$  в масштабе соответствует количеству теплоты, превращенной в работу.

### **Контрольные вопросы:**

1. Что такое «термодинамический цикл»? Изобразите прямой и обратный циклы в координатах  $P—V$ .

2. Поясните, по какому циклу работает холодильная машина?

3. Изобразите цикл Карно в координатах  $P—V$  и  $T—S$ . Почему он имеет самый высокий термический КПД и какую роль он играет в технической термодинамике?

4. Поясните, что такое «энтропия»?

Литература [1, 2, 7]

## **Тема 1.5 Основы теплотехники**

Водяной пар широко используется в качестве рабочего тела в судовых энергетических установках. Процесс парообразования можно графически изобразить в  $P—V$ ,  $T—S$  и  $i—S$  диаграммах.

Процессы истечения лежат в основе работы пароэнергетических установок и струйных насосов. При изучении этих процессов следует обратить внимание на уравнения, определяющие скорость истечения, расход рабочего тела, форму и площадь сечения сопла. Необходимо изучить понятия критической скорости и критических параметров.

Тепло от одного тела к другому передается теплообменом или теплопередачей. Существуют три способа передачи тепла: теплопроводностью, излучением и конвекцией.

После изучения темы студент должен уметь пользоваться  $i—s$  диаграммой, понимать, как происходит теплообмен и основные факторы, на него влияющие, знать физический смысл коэффициентов теплопередачи и теплопроводности,



уметь пользоваться расчетными выражениями для определения количества переданной теплоты.

Основные вопросы темы:

- получение водяного пара. Влажный, сухой насыщенный и перегретый пар;
- диаграмма воды и водяного пара;
- истечение рабочего тела;
- теплоотдача и теплопередача;
- коэффициенты теплоотдачи и теплопроводности.

### 1.5.1 Водяной пар и циклы паросиловых установок

Процесс парообразования и изображение его в диаграммах  $p - v$  и  $T - S$ . Молекулы воды находятся в постоянном движении. Они как бы «танцуют», и те из них, которые приобретают наибольшую энергию, вырываются и образуют над поверхностью воды пар.

Процесс перехода воды в пар называется парообразованием, а обратный процесс — конденсацией. При парообразовании в закрытом сосуде одновременно происходят оба процесса.

Парообразование, происходящее с поверхности жидкости, называется испарением. Испарение происходит при любой температуре. Для процесса испарения необходима поверхность раздела между жидкостью и паром, которая может быть и внутри жидкости; при этом в жидкости образуются пузырьки пара, и испарение будет происходить внутрь пузырьков. Это явление называется кипением. Температура, при которой вода начинает кипеть и которая сохраняется неизменной до того момента, пока вся вода не испарится, называется температурой кипения.

Если при парообразовании в закрытом сосуде число молекул, вылетающих из воды, равно числу молекул, возвращающихся в воду из парового пространства, то такой пар называется насыщенным.

Влажным насыщенным называется пар, содержащий взвешенные частицы жидкости. Такой пар фактически получается в закрытом сосуде при наличии в нем уровня воды. При дальнейшем нагревании закрытого сосуда с водой количество пара в нем будет увеличиваться, а количество воды уменьшаться до тех пор, пока последняя капля воды не превратится в пар. В этот момент пар становится сухим насыщенным.

Доля содержания сухого насыщенного пара во влажном называется степенью сухости пара и обозначается буквой  $x$ . Таким образом, если говорят, что степень сухости влажного пара  $x = 0,96$ , это значит, что 1 кг пара содержит 0,4 кг воды и 0,96 кг сухого насыщенного пара. Доля содержания воды во влажном паре называется степенью влажности. Если к сухому насыщенному пару подводить теплоту при постоянном давлении, то он становится перегретым, температура пара при этом повышается, а объем его увеличивается; теплосодержание перегретого пара становится большим.

Перегретый пар используют в энергетических установках (турбинах, машинах), насыщенный — в технологических установках (рыбообрабатывающих).

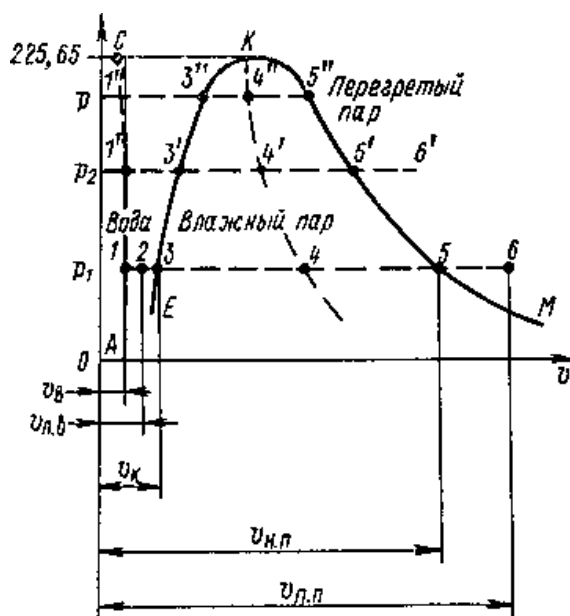
Получение пара в паровых котлах происходит при постоянном давлении и включает следующие стадии:

- нагрев воды до температуры кипения;
- образование пара из кипящей воды;
- образование перегретого пара из сухого насыщенного.

Весь процесс получения пара в паровых котлах можно изобразить на диаграмме  $p - v$  (рисунок 1.15). Предположим, что в действующий котел подали под давлением 1 кг холодной воды при  $0^\circ$ . Удельный объем  $v_v$  очень мал. На диаграмме это состояние представится точкой 1. Затем температура, а следовательно, и удельный объем поданной массы воды быстро начнут повышаться при том же давлении  $p_1$ . Одно из состояний процесса нагревания воды показано на диаграмме точкой 2, при нем удельный объем подогретой воды равен  $v_{п.в.}$

В точке 3 вода уже перейдет в кипящее состояние при температуре кипения, соответствующей давлению  $p_1$  и удельному объему  $v_k$ . Отрезок 1—3 на диаграмме представляет процесс подогрева воды от  $0^\circ\text{C}$  до температуры кипения.

При дальнейшем подогреве начинается процесс образования пара из кипящей воды при постоянных давлении и температуре кипения; этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока не испарится последняя капля воды. На диаграмме процесс парообразования показан отрезком 3—5, причем за точкой 3 кипящая вода постепенно начинает переходить в насыщенный пар и в точке 5 полностью превращается в сухой насыщенный пар. Поэтому промежуточные точки (например, точка 4) отрезка 3—5 изображают влажный пар с различными значениями сухости. В точке 3 (состояние кипящей воды) сухость пара  $x=0$ , в точке



5 (состояние сухого насыщенного пара)  $x=1$ , т. е. сухость пара составляет 100%.

Рисунок 1.15 - Изображение процесса получения пара в диаграмме  $P-v$ :

$v_{н.п.}$  - удельный объем сухого насыщенного пара;  $v_{п.п.}$  - удельный объем перегретого пара.

Если продолжать процесс нагревания сухого насыщенного пара (в пароперегревателе), то получаемая при этом характеристика пара графически изобразится горизонтальной прямой, являющейся продолжением линии  $1-5$ . В точке 6 удельный объем теперь уже перегретого пара будет  $v_{п.п.}$ . С удалением точки 6 от точки 5 как температура нагрева, так и удельный объем пара будут повышаться.

Если теперь рассмотреть работу котла при большем давлении ( $p_2$ ), равном примерно 10 МПа ( $\sim 100$  кгс/см<sup>2</sup>), то весь процесс образования насыщенного пара из воды при температуре  $0^\circ$  и перегретого пара из сухого насыщенного изобразится штриховой линией  $1'-6'$ . В точке  $1'$  удельный объем воды при  $0^\circ\text{C}$  получается такой же, как при  $p_1$ , так как удельный объем воды почти не зависит от давления, он изменяется только с изменением температуры жидкости. Однако при давлениях свыше 10 МПа удельный объем воды начинает заметно уменьшаться; это уменьшение для наглядности показано на диаграмме штриховой линией  $1' - C$ .

Если через одноименные точки провести плавные линии, то получим пограничные кривые  $EK$  и  $KM$ , которые делят всю диаграмму на три области: область воды, лежащую левее линии  $EK$ , область влажного пара, расположенную между линиями  $EK$  и  $KM$ , и область перегретого пара, находящуюся правее линии  $KM$ . Линия  $4-4'-4''-K$  есть кривая постоянной сухости. Это значит, что при различных давлениях сухость пара в точках 4,  $4'$ ,  $4''$  и  $K$  будет одинаковой.

Д. И. Менделеев в 1860 г. пришел к выводу, что существует такая температура жидкости, при которой ее поверхностное натяжение как результат действия сил сцепления между молекулами будет равно нулю. Выше этой температуры жидкость и пар обладают одинаковыми свойствами; различие между ними исчезает. Для воды такой температурой является  $374,15^\circ\text{C}$ . Она называется критической. Нагреть воду до такой температуры можно лишь при давлении не ниже 22,1 МПа (225,65 ата).

Такое давление называется критическим.

При критическом давлении и температуре (точка  $K$  на диаграмме) между кипящей водой и сухим насыщенным паром не будет никакого различия. Так как вода и пар будут иметь одинаковую плотность, исчезнет граница, разделяющая эти две фазы вещества.

Процесс парообразования можно также изобразить в диаграмме  $T-S$  (рисунок 1.16).

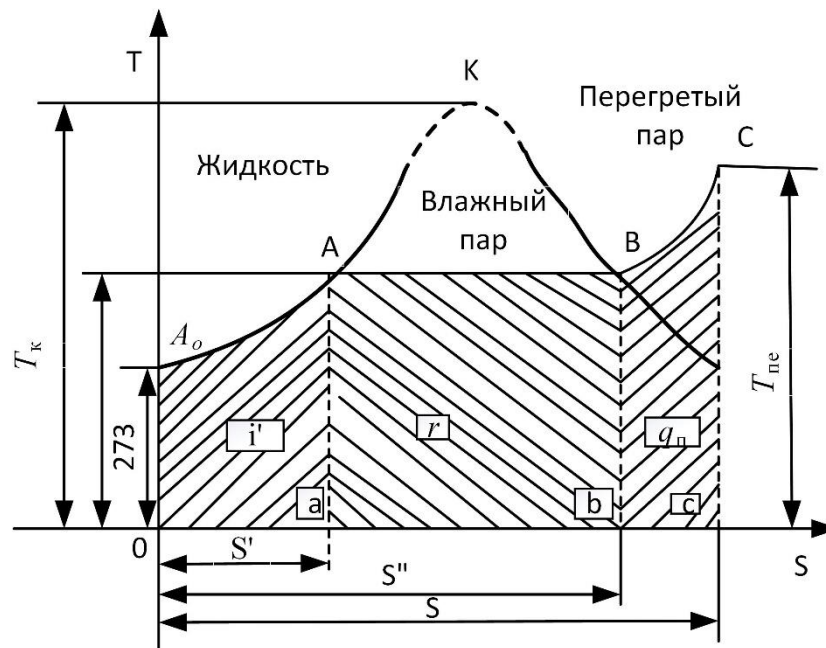


Рисунок 1.16 - Процесс парообразования в диаграмме T-S

Предполагая, что энтропия воды при  $0^\circ\text{C}$  (273 K) равна нулю, состояние воды при  $0^\circ$  изображают на диаграмме  $T-S$  точкой  $A$ , лежащей на оси ординат. Критическая точка на диаграмме  $T-S$  обозначается точкой  $K$ , в которой сходятся нижняя  $A_oK$  и верхняя  $KB$  пограничные кривые. Эти кривые, так же как в диаграмме  $p-v$ , делят всю диаграмму на три области: жидкости, влажного пара и перегретого пара.

Линии постоянных давлений (изобары) в области влажного насыщенного пара совпадают с линиями постоянных температур (изотермами) и проходят горизонтально. В области перегретого пара изобары круто поднимаются, а в области жидкости сливаются с нижней пограничной кривой.

Так как процесс парообразования в паровом котле происходит при постоянном давлении (по изобаре), то три стадии парообразования в диаграмме  $T-S$  будут изображены следующим образом:

- 1) нагрев воды до температуры кипения (насыщения)  $T_n$  — линия  $A_oA$ ;
- 2) процесс образования пара из кипящей воды — линия  $AB$ ;
- 3) образование перегретого пара из сухого насыщенного — линия  $BC$ .

Так как в диаграмме  $T-S$  площади изображают количество теплоты, участвующей в процессе, то легко установить, что площадь  $OA_oAaO$  представляет энтальпию жидкости, которая обозначается буквой  $i'$  и является теплотой, идущей на нагревание 1 кг воды от  $0^\circ\text{C}$  до температуры кипения. Площадь  $aABba$  — теплота парообразования; она представляет собой количество теплоты, которое расходуется на превращение 1 кг кипящей воды в сухой насыщенный пар и обозначается буквой  $r$ . Площадь  $bBCcb$  — теплота, затраченная на перегрев сухого насыщенного пара — обозначается буквой  $q_{\text{п}}$ .

Энтальпия сухого насыщенного пара составляет

$$i'' = i' + r. \quad (1.44)$$

Энтальпия перегретого пара

$$i = i'' + q_{\text{п}} \quad (1.45)$$

### 1.5.2 Таблицы и диаграмма $i - s$ для водяного пара

Несмотря на то, что диаграмма  $T - S$  наглядно представляет процесс парообразования и может служить для изображения изменений состояния пара, использование этой диаграммы для решения различных практических задач неудобно, так как определение количества теплоты связано с вычислением площадей.

Для практических целей удобнее пользоваться таблицами водяного пара или диаграммой с координатами энтропия — энтальпия, называемой сокращенно диаграммой  $i - s$ .

В таблицах водяного пара приводятся числовые значения основных параметров  $t$ ,  $p$ ,  $v$ ,  $i$ ,  $s$ , определенные опытным путем или вычисленные на основании теоретических исследований. Таблицы составлены для сухого насыщенного пара и воды и для перегретого пара. В первой колонке таблицы даются значения давлений  $p$ , расположенные в порядке их возрастания, в последующих колонках — остальные параметры состояния при соответствующих давлениях.

Принципиальная схема диаграммы  $i - s$  показана на рисунке 1.17. Примерно посередине диаграммы проходит жирная линия — пограничная кривая ( $x=1$ ), которая делит диаграмму на две области: верхнюю — перегретого пара и нижнюю — насыщенного пара.

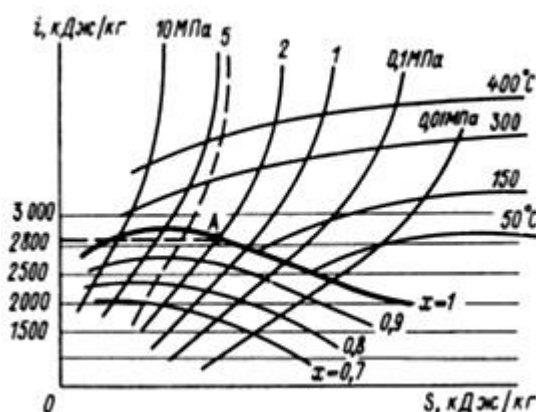


Рисунок 1.17 - Принципиальная схема диаграммы  $i-s$ .

На диаграмме изображаются: изобары (0,01, ..., 0,1, ..., 10 МПа), которые в области влажного пара представляют собой прямые наклонные линии, а в области перегретого пара — поднимающиеся вверх кривые; изотермы (50, ..., 150, ..., 400° С) — кривые, имеющие некоторую выпуклость (в области влажного пара они совпадают с изобарами, так как каждому давлению насыщения соответствует определенная температура); линии одинаковой сухости ( $x$ ), расположенные в области влажного пара. Кроме этих линий на диаграмму  $i - s$  иногда наносят изохоры ( $v$ ), которые идут в том же направлении, что и изобары, но более круто. Для ясности изохоры изображают штриховыми линиями.

Чтобы по диаграмме найти, например, теплосодержание сухого насыщенного пара при давлении  $p = 2$  МПа, вначале ищем кривую постоянного давления, помеченную этим числом, затем находим точку пересечения ее с пограничной

кривой (точка *A*). Точку *A*, как показано штриховой линией, проектируем на вертикальную ось и находим искомое теплосодержание: 2800 кДж/кг.

### 1.5.3 Схема паросиловой установки

Упрощенная принципиальная схема паросиловой установки изображена на рисунке 1.18.

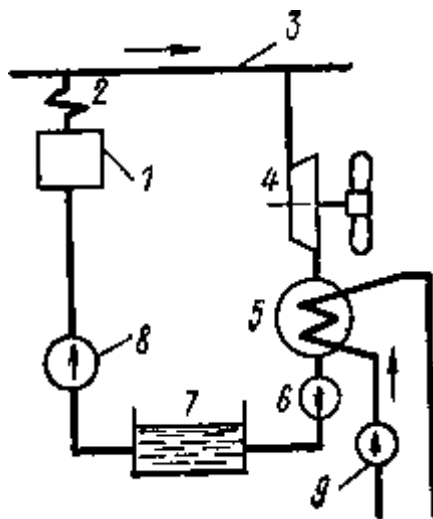


Рисунок 1.18 - Схема паросиловой установки.

В паровом котле *1* происходит нагревание воды до температуры кипения, а затем парообразование. Из парового котла влажный насыщенный пар направляется в пароперегреватель *2*, где вначале подсушивается до степени сухости  $x = 1$ , а затем перегревается. Полученный перегретый пар по соединительному паропроводу *3* поступает в паровой двигатель (паровую машину или турбину) *4*, где происходит его расширение и превращение теплоты в механическую работу, идущую на гребной винт.

Отработавший в машине или турбине пар поступает в специальное устройство — конденсатор *5*, где конденсируется (сжижается) путем отнятия от него тепла при соприкосновении с охлаждающей водой, подаваемой циркуляционным насосом *9*. В результате конденсации пара получается конденсат (вода), который специальным конденсатным насосом *6* подается в питательный бак *7*, а оттуда питательным насосом *8* — в котел.

### 1.5.4 Цикл Ренкина

Цикл Ренкина является основным для паросиловых установок.

Рассмотренная ранее паросиловая установка работает по циклу Ренкина, а сам цикл Ренкина в диаграмме  $T — S$  изображен на рисунке 1.19. Основные процессы здесь:  $a—b$  — нагрев воды в паровом котле до температуры насыщения;  $b—c$  — парообразование;  $c—d$  — перегрев пара;  $d—e$  — адиабатное расширение пара в паровом двигателе;  $e—a$  — конденсация пара в конденсаторе.

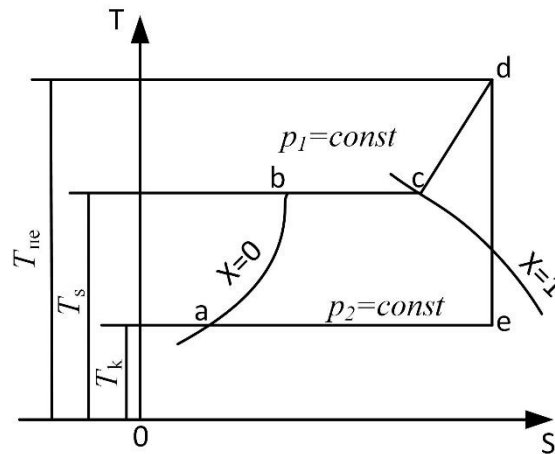


Рисунок 1.19 - Цикл Ренкина в диаграмме T-S.

Термический к. п. д. цикла Ренкина оценивает экономичность паросиловой установки; он показывает, какое количество теплоты в паросиловой установке может быть превращено в механическую работу. Обозначается этот к. п. д. буквой  $\eta$  с индексом  $t$  и определяется по формуле

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_2'}, \quad (1.46)$$

где  $i_1$  — энтальпия пара, поступающего в машину или турбину;  $i_2$  — энтальпия пара на выходе из машины или турбины при поступлении его в конденсатор;  $i_2'$  — энтальпия конденсата.

Термический к. п. д. цикла Ренкина составляет примерно 0,4. Это значит, что только 40% теплоты может быть превращено в механическую работу. В действительности при работе паросиловой установки возникает ряд дополнительных тепловых потерь, в результате чего ее к. п. д. еще меньше, чем к. п. д. цикла Ренкина (0,15—0,30).

Одной из основных характеристик работы паросиловой установки служит удельный расход пара. Он обозначается буквой  $d$  и показывает, какое количество пара (в кг) расходуется паросиловой установкой в час для создания мощности 1 кВт (1 л. с.).

Удельный расход пара паросиловой установки определяется по формуле

$$d = \frac{860}{i_1 - i_2} \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)},$$

где  $i_1$  и  $i_2$  в кДж/кг, или

$$d = \frac{632}{i_1 - i_2} \text{ кг/(л. с.} \cdot \text{ч)} \quad (1.47)$$

где  $i_1$  и  $i_2$  в ккал/кг.

### 1.5.5 Способы повышения экономичности цикла паросиловой установки

Теоретическими исследованиями установлено, что термический к. п. д. цикла паросиловой установки увеличивается:

- с повышением давления пара, поступающего в паровой двигатель;

- с уменьшением давления в конденсаторе;
- с повышением температуры перегретого пара.

Увеличение давления пара влечет за собой повышение температуры его перегрева. При высокой же температуре перегретого пара детали турбин разрушаются, и их необходимо изготавливать из дорогостоящих жаропрочных сплавов. Поэтому в паросиловых установках, работающих на паре высокого давления, предусмотрено следующее. Пар с несколько пониженной температурой поступает в турбину высокого давления, где расширяется и совершает работу, оттуда подается на повторный перегрев, а затем в турбину низкого давления.

Цикл такой паросиловой установки называется циклом с повторным промежуточным перегревом пара.

Экономичность паросиловой установки увеличивают также путем применения регенеративного и теплофикационного циклов.

В регенеративном (тепловозвратном) цикле от машины или турбины отбирается пар для подогрева воды, поступающей в котел, в результате чего уменьшается расход топлива на получение пара, а следовательно, повышается экономичность цикла. При осуществлении теплофикационного цикла увеличивается давление в конденсаторе, следовательно, повышается конечная температура пара, который теперь не отдает бесполезно свою теплоту в конденсаторе, а поступает на нагревание отопительных приборов или на технологические нужды. При этих условиях установка будет давать не только энергию для привода гребного винта или электрогенератора, но и теплоту.

### **Контрольные вопросы:**

1. Поясните понятия «парообразование», «конденсация», «испарение» и «кипение». Какой пар называется насыщенным, сухим, перегретым?
2. Изобразите процесс парообразования в координатах  $P—V$ ,  $T—S$ .
3. Что такое «Цикл Ренкина»? Изобразите его в координатах  $P—V$ .
4. Назовите способы, которыми может передаваться тепло. Запишите уравнение теплопередачи и проанализируйте входящие в него величины.
5. Как влияют отложения на поверхностях нагрева теплообменников на теплопередачу и КПД?

Литература [1, 2, 3, 7]



## **РАЗДЕЛ 2 СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ**

### **Тема 2.1 Судовые двигатели внутреннего сгорания**

В ходе изучения темы следует обратить особое внимание на условия работы и требования к конструкции судовых дизелей. В итоге изучения темы студент должен понимать принцип действия дизелей, факторы, влияющие на их экономичность и надежность, уметь изображать теоретические циклы в координатах  $P—V$  и  $T—S$ .

Основные вопросы темы:

- принцип действия, индикаторная диаграмма и круговая диаграмма газораспределения четырехтактного дизеля без наддува и с наддувом
  - принцип действия, индикаторная диаграмма и круговая диаграмма газораспределения двухтактного дизеля;
  - составные части, узлы и системы судовых дизелей;
  - классификация и маркировка;
  - основные параметры, индикаторные и эффективные показатели работы.
- Методы оценки мощности дизелей.

#### **2.1.1 Типы двигателей внутреннего сгорания**

Поршневые ДВС относятся к роду тепловых двигателей, в которых химическая энергия топлива преобразуется в тепловую непосредственно внутри рабочего цилиндра. ДВС, работающие с самовоспламенением топлива в цилиндре, принято называть дизелями по имени изобретателя двигателя такого типа – Рудольфа Дизеля.

Благодаря значительному перепаду температур при осуществлении цикла (от 300–320 К до 1800–2000 К), дизели являются в данное время наиболее экономичными тепловыми двигателями. Вместе с тем, несмотря на высокие температуры цикла, двигатели этого типа могут работать надежно, так как действие высоких температур является периодическим и после сгорания топлива, расширения газов и их выпуска в цилиндр поступает свежий воздух, а стенки цилиндра охлаждаются водой или воздухом.

Дизели, применяемые на судах, работают на дизельном и моторном топливах, а также (после специальной подготовки топлива) на мазутах.

Двигатель внутреннего сгорания – самый распространенный тип двигателя.

Большинство судов морского транспортного и промыслового флота оборудованы дизельными установками с малооборотными двигателями (МОД,

частота вращения вала двигателя до 350 об/мин). Применение МОД обусловлено их высокой экономичностью, возможностью использования дешевых остаточных высоковязких топлив, большим моторесурсом. На рисунке 2.1 показана главная пропульсивная установка с малооборотным двигателем внутреннего сгорания.

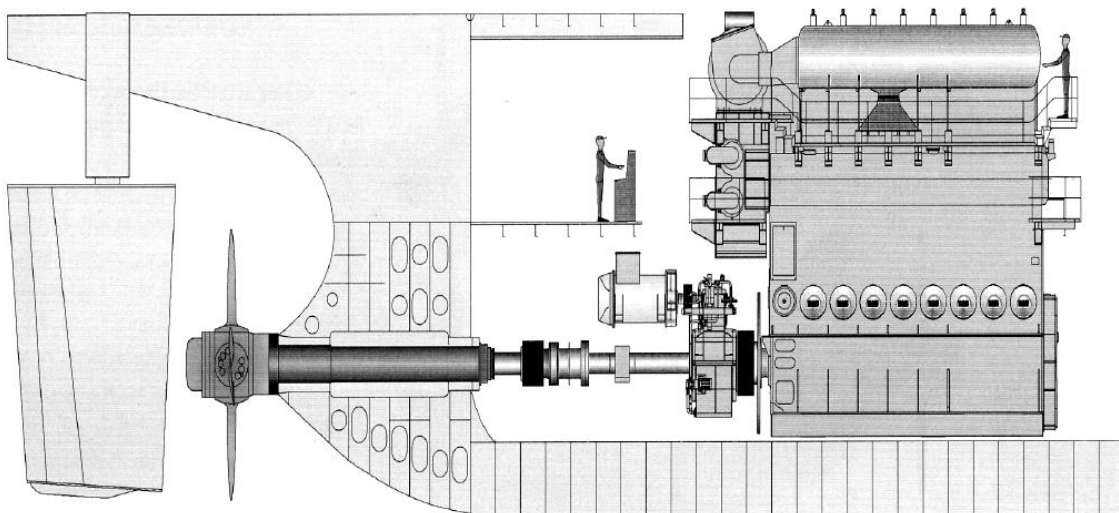


Рисунок 2.1 – Главная пропульсивная установка с МОД

Среднеоборотные дизели (СОД, частота вращения до 750 об/мин) по сравнению с малооборотными имеют меньший вес, меньшие габариты и предназначены в основном для малых судов. На рисунке 2.2 показан среднеоборотный двигатель.

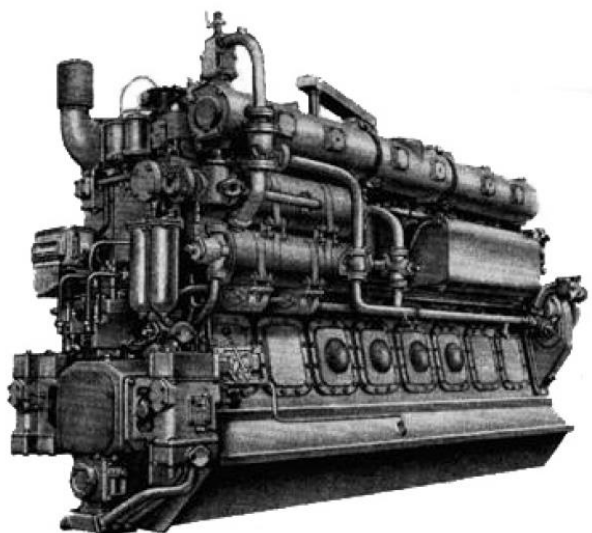


Рисунок 2.2 – Среднеоборотный двигатель (СОД)

Высокооборотные двигатели (ВОД, частота вращения выше 750 об/мин) имеют меньший моторесурс и являются источниками повышенного шума.

Двигатели этой группы применяются на судах, когда основные требования, предъявляемые к СЭУ, – малые габариты и малый вес, а требования к моторесурсу сравнительно понижены. На рисунке 2.3 и рисунке 2.4 показаны установки с высокооборотным ДВС.

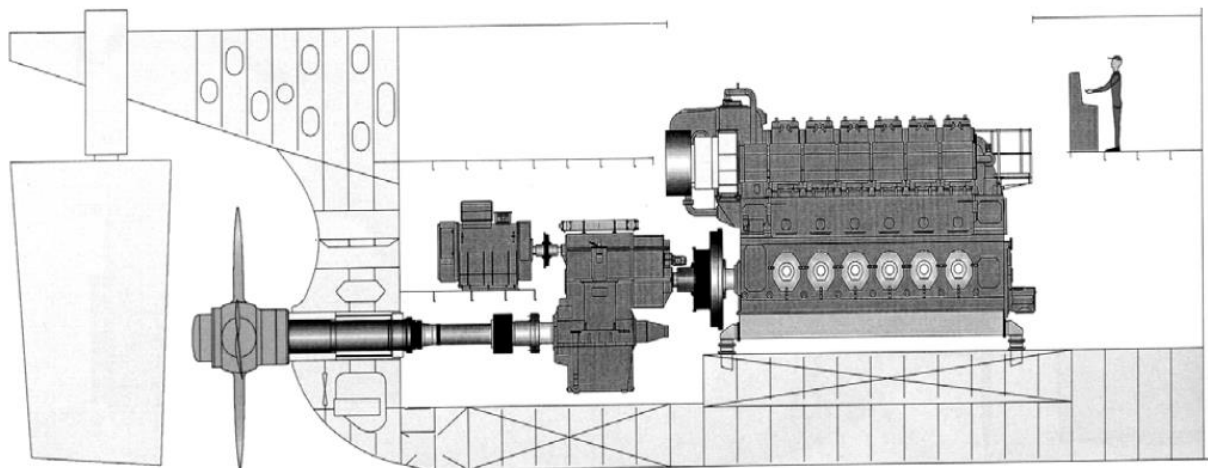


Рисунок 2.3 – Главная пропульсивная установка с ВОД

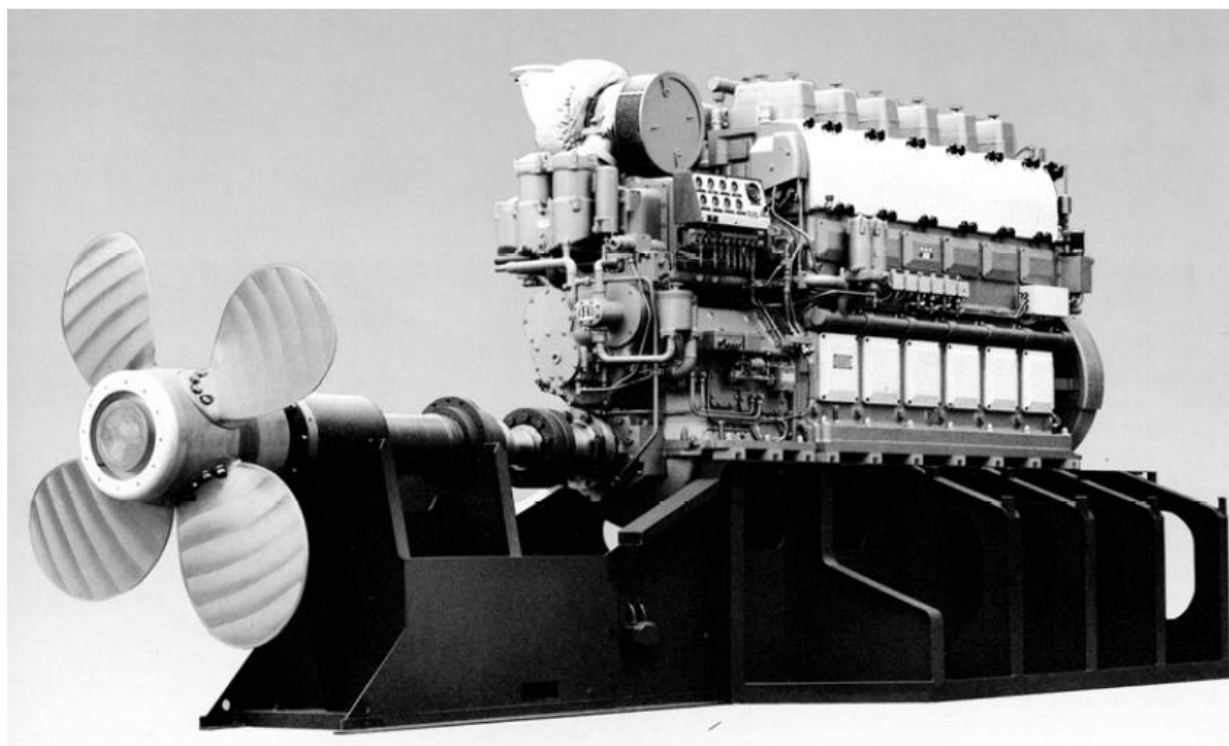


Рисунок 2.4 – Главная пропульсивная установка с ВОД

### 2.1.2 Принципиальная схема двигателя внутреннего сгорания

Принципиальная схема любого классического двигателя внутреннего сгорания показана на рисунке 2.5. В цилиндре двигателя находится поршень, который совершает возвратно-поступательное движение вдоль оси цилиндра.

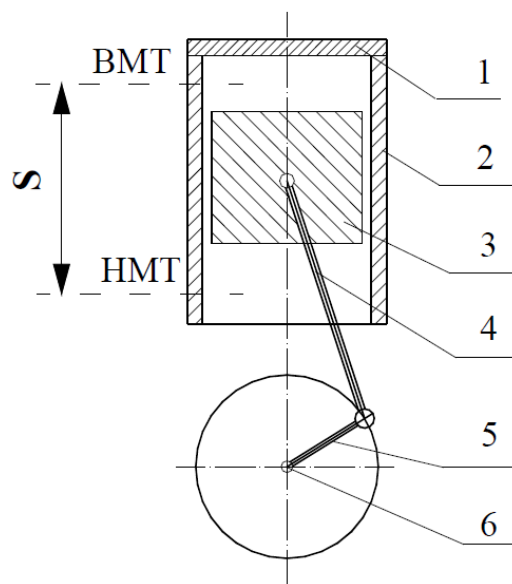


Рисунок 2.5 – Конструктивная схема ДВС:

1 – крышка цилиндра; 2 – цилиндр; 3 – поршень; 4 – шатун; 5 – кривошип; 6 – вал; S – ход поршня; ВМТ – верхняя мертвая точка; НМТ – нижняя мертвая точка

Возвратно-поступательное движение поршня преобразуется посредством кривошипно-шатунного механизма (КШМ) во вращательное движение вала.

Полость, образованная крышкой цилиндра, цилиндром и верхней поверхностью поршня (огневой частью), называется камерой сгорания. Здесь происходит сжатие заряда, воспламенение топлива, сгорание и расширение рабочего тела. Вал и кривошип образуют единую деталь двигателя, называемую коленчатым валом.

**Основные определения ДВС.** Нижняя мертвая точка (НМТ) – положение поршня, при котором расстояние от поршня до оси коленчатого вала минимально (см. рисунок 2.5).

Верхняя мертвая точка (ВМТ) – положение поршня, при котором расстояние поршня до оси коленчатого вала максимально (см. рисунок 1.5).

Ход поршня – расстояние, которое проходит поршень из одной мертвой точки до другой (см. рисунок 2.5).

Объем камеры сгорания – соответствует объему полости цилиндра при нахождении поршня в ВМТ.

Рабочий объем цилиндра – объем, который описан поршнем при его ходе между мертвыми точками.

Такт – часть цикла, когда поршень проходит от одной мертвой точки до другой.

### **2.1.3 Классификация судовых двигателей внутреннего сгорания**

По способу осуществления рабочего цикла:

- четырехтактные – цикл осуществляется за четыре хода поршня;
- двухтактные – цикл осуществляется за два хода поршня.

По способу действия:

- простого действия – рабочий цикл осуществляется только в одной полости цилиндра;
- двойного действия – цикл совершается в двух полостях цилиндра: над и под поршнем;
- с противоположно движущимися поршнями.

По роду рабочего цикла:

- с подводом теплоты к рабочему телу при постоянном объеме (цикл Отто; двигатели с принудительным зажиганием, например карбюраторные);
- с подводом теплоты при постоянном давлении газов (цикл Дизеля);
- со смешанным подводом теплоты (цикл Сабатэ – Тринклера; современные дизельные двигатели).

По роду применяемого топлива:

- работающие на жидком топливе;
- на газообразном топливе;
- газожидкостные (основное топливо – газ, запальное топливо – жидкое);
- многотопливные – приспособленные для работы на различном топливе (от легкого до тяжелого).

По способу наполнения рабочего цилиндра:

- без наддува – наполнение цилиндра рабочей смесью обеспечивается перемещением поршня;
- с наддувом – рабочая смесь или воздух подается в цилиндр при повышенном давлении особым наддувочным агрегатом.

По способу смесеобразования:

- с внутренним смесеобразованием – рабочая смесь из воздуха и распыленного топлива образуется внутри цилиндра;
- с внешним смесеобразованием – рабочая смесь воздуха и паров топлива образуется вне цилиндра (например, карбюраторные).

По способу воспламенения топлива:

- с самовоспламенением (дизели);
- с принудительным зажиганием – воспламенение от постороннего источника (искры);

- с комбинированным самовоспламенением.

По конструктивному исполнению:

- тронковые;
- крейцкопфные.

По возможности изменения направления вращения коленчатого вала:

- нереверсивные – имеющие одно направление вращения;
- реверсивные – двигатели, у которых перемена направления вращения

осуществляется реверсивным механизмом.

По частоте вращения:

- малооборотные (МОД), менее 350 об/мин;
- среднеоборотные (СОД), от 350 до 750 об/мин;
- высокооборотные (ВОД), свыше 750 об/мин.

По расположению рабочих цилиндров:

- вертикальные;
- горизонтальные;
- однорядные;
- двухрядные;
- V-образные;
- звездообразные и т.д.

Существуют и другие признаки, по которым классифицируют ДВС.

**Маркировка ДВС.** Маркировка отечественных ДВС производится по ГОСТ 10150–88.

Буквы в марке двигателя обозначают: Ч – четырехтактный, Д – двухтактный, Г – газовый, Р – реверсивный, С – судовой с реверсивной муфтой, П – с редукторной передачей, К – крейцкопфный, Н – с наддувом, ДД – двухтактный двойного действия.

Цифры в марке обозначают: первая – число цилиндров; после букв: в числителе – диаметр цилиндра, см; в знаменателе ход – поршня, см.

Например:

6 ЧН 18/22 – шестицилиндровый четырехтактный двигатель с наддувом; 18 см – диаметр цилиндра, 22 см – ход поршня;

8ДКРН 74/160 – восьмицилиндровый двухтактный крейцкопфный реверсивный двигатель с наддувом; 74 см – диаметр цилиндра, 160 см – ход поршня.

## 2.1.4 Принцип действия четырехтактного двигателя

Рассматривать работу ДВС (рисунок 2.6) удобно по индикаторной диаграмме (рисунок 2.7), представляющей в координатах  $P - V$  зависимость давления от объема цилиндра по ходу поршня от ВМТ к НМТ и наоборот.

Первый ход поршня – впуск, или всасывание; осуществляется процесс наполнения цилиндра воздухом (такт I). При движении поршня от ВМТ к НМТ через впускной клапан в цилиндр поступает воздух из окружающей среды. Во время первого хода поршня выпускной клапан должен быть закрыт. Для максимального наполнения цилиндров впускной клапан открывается до ВМТ (в точке 1). Угол  $\phi_{1-1'}$  – угол опережения впуска, приблизительно равен  $20-30^\circ$  поворота коленчатого вала (п.к.в.). Чтобы увеличить время поступления воздуха, закрытие впускного клапана осуществляется после прохождения поршнем НМТ (в точке 2).

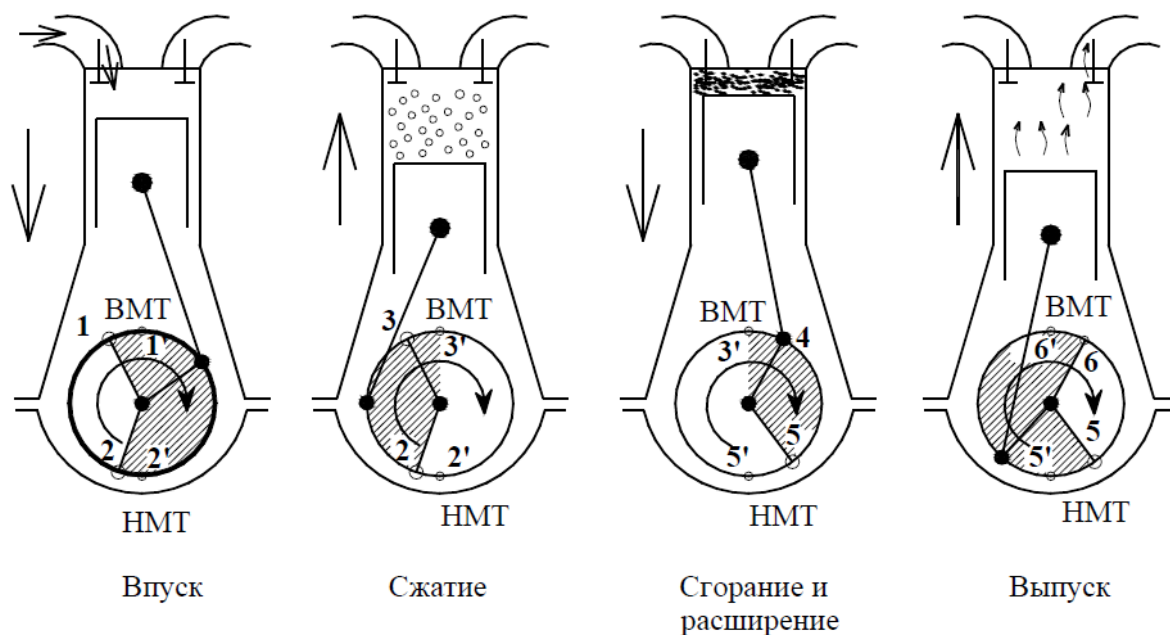


Рисунок 2.6 – Схема работы четырехтактного дизеля без наддува

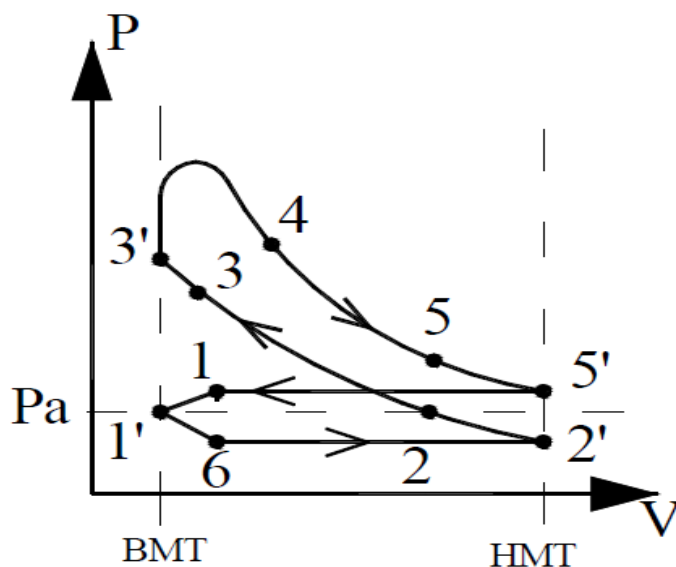


Рисунок 2.7 - Индикаторная диаграмма

Угол  $\phi_{2-2'}$  – угол запаздывания закрытия впускного клапана, приблизительно равен  $20-40^\circ$  п.к.в. Углы опережения и запаздывания зависят в основном от типа двигателя и степени его быстроходности.

Второй ход поршня – процесс сжатия (такт II). Осуществляется процесс уменьшения объема рабочего тела для повышения его рабочей температуры. Сжатие воздуха, поступившего в цилиндр за первый ход поршня, происходит при движении поршня от НМТ к ВМТ, начиная с момента закрытия впускного клапана (точка 2) до момента прихода поршня в ВМТ (точка 3); во время сжатия все клапаны цилиндра должны быть закрыты. Давление в конце сжатия  $2,8-3,5$  МПа.

Третий ход поршня – горение топлива и расширение продуктов сгорания. Осуществляется в основном так называемый рабочий ход (такт III). Чтобы обеспечить физико-химическую подготовку топлива к самовоспламенению, жидкое топливо начинают впрыскивать в цилиндр до прихода поршня в ВМТ (точка 3) с углом опережения  $\phi_{3'-3}$ . Угол опережения равен  $10-30^\circ$  поворота коленчатого вала.

Распыленное топливо, смешанное со сжатым воздухом, самовоспламеняется около ВМТ и сгорает, благодаря чему давление в цилиндре повышается до  $5-8$  МПа, а температура – до  $1400-1600^\circ\text{C}$ .

Горение топлива заканчивается за ВМТ (точка 4), после чего начинается расширение продуктов сгорания. Общий угол, соответствующий процессу сгорания, равен  $40-60^\circ$  п.к.в. Давление газов за время сгорания и расширения передается на поршень и используется для совершения полезной работы при движении поршня от ВМТ к НМТ до начала открытия выпускного клапана (точка 5). К концу расширения давление в цилиндре падает примерно до  $0,25-0,6$  МПа, а температура газов – до  $600-700^\circ\text{C}$ . Общий угол поворота коленчатого вала, отводимый на процессы сгорания и расширения (т. 3–т. 5), равен  $160-180^\circ$ .

Четвертый ход поршня – выпуск (такт IV). Осуществляется выпуск отработавших газов. Выпускной клапан открывается до прихода поршня в НМТ на угол опережения  $\phi_{5-5'}$  ( $20-40^\circ$  п.к.в.). Это делается с целью снизить давление к концу хода поршня примерно до давления окружающей среды и обеспечить таким образом небольшое противодавление при выталкивании продуктов сгорания во время движения поршня к ВМТ.

Для более совершенного удаления продуктов сгорания закрытие выпускного клапана происходит после прохождения поршнем ВМТ с запаздыванием на угол закрытия  $\phi_{6-6'}$  ( $10-20^\circ$  п.к.в.). Продукты сгорания через выпускные клапаны и патрубок поступают в газораспределительный коллектор с давлением  $0,105-0,110$  МПа и температурой  $300-500^\circ\text{C}$ .

При положении поршня в ВМТ (точка 6) продукты сгорания, занимающие объем, равный объему камеры сжатия, не могут быть полностью удалены из цилиндра. Поэтому остаточные газы в дальнейшем смешиваются с воздухом, который начинает поступать в цилиндр через впускной клапан.



В случае если в двигателе используется принудительное нагнетание воздуха в цилиндр (ДВС с наддувом), в цилиндре осуществляется так называемая продувка камеры сгорания. За период, в течение которого одновременно открыты и впускной и выпускной клапаны (т. 1–т. 6), нагнетаемый воздух удаляет остаточные газы, находящиеся в цилиндре.

По окончании выталкивания продуктов сгорания начинается новый рабочий цикл.

### 2.1.5 Принцип действия двухтактного двигателя

В двухтактных двигателях рабочий цикл осуществляется за два хода поршня, т.е. за один оборот коленчатого вала. Это достигается благодаря тому, что выталкивание и всасывание четырехтактного двигателя заменяются процессами выпуска и продувки, происходящими при положении поршня около ВМТ и занимающими по углу п.к.в. всего 120–140°.

В двухтактном двигателе клапаны заменяются специальными вырезами в рабочем цилиндре (окнами). Через продувочные окна в цилиндр поступает воздух, через выпускные из цилиндра удаляются продукты сгорания. Поршень, совершая возвратно-поступательное движение, закрывает и открывает окна, регулируя таким образом газораспределение.

Воздух нагнетается в цилиндр с помощью специального устройства (например, компрессора).

В зависимости от способа осуществления продувки применяют две основные схемы – контурную и прямоточную (рисунок 2.8).

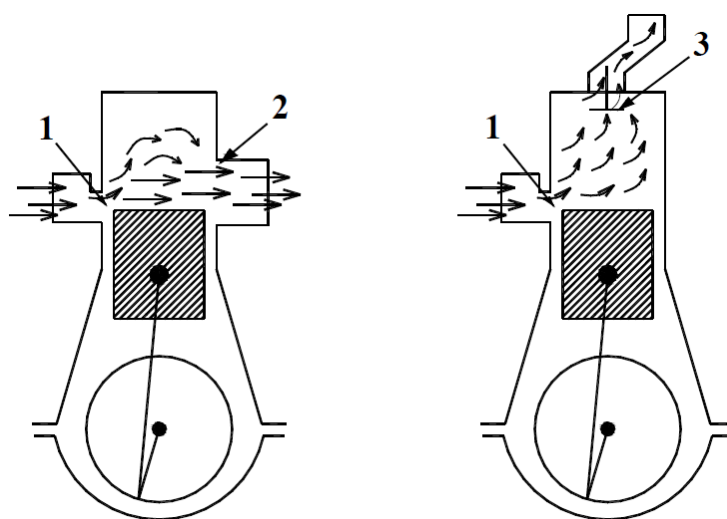


Рисунок 2.8 – Схемы продувки двухтактного двигателя:

а – контурная; б – прямоточная;

1 – продувочные окна; 2 – выпускные окна; 3 – выпускной клапан

В контурной схеме продувки имеются продувочные и выпускные окна, а клапаны отсутствуют, в прямоточной схеме имеются только продувочные окна, а выпуск продуктов сгорания осуществляется, как и в четырехтактном двигателе, через выпускной клапан, расположенный в крышке цилиндра. Наиболее совершенными являются прямоточные системы продувки.

Рассмотрим принцип работы двухтактного двигателя с прямоточной системой продувки (рисунок 2.9).

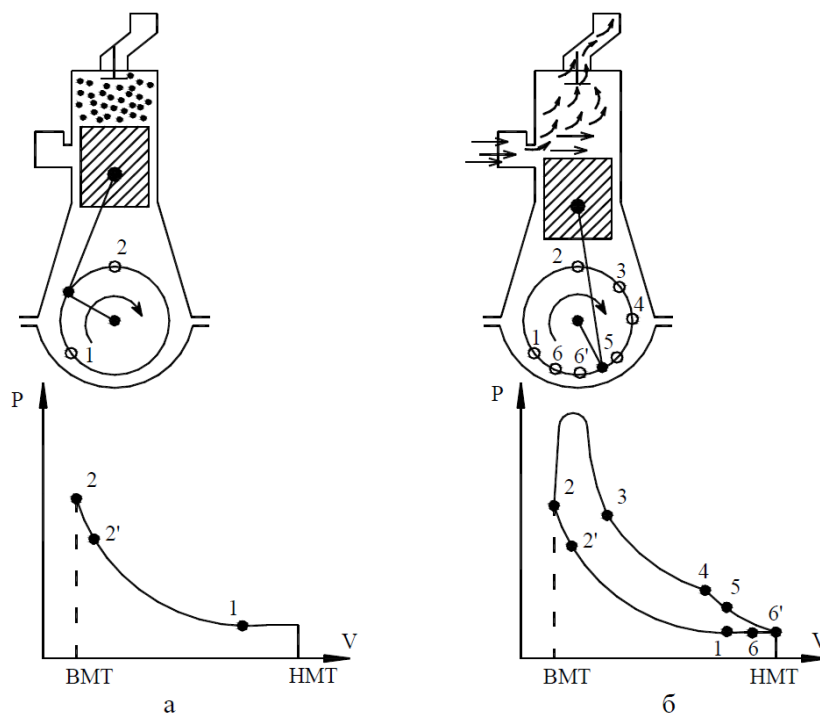


Рисунок 2.9 – Схема работы двухтактного дизеля без наддува:

а – такт I (продувка, выпуск, сжатие); б – такт II (сгорание, расширение и очистка цилиндра)

Такт I (рисунок 2.9, а). При движении поршня от НМТ к ВМТ заканчиваются процессы выпуска, продувки, наполнения цилиндра воздухом и сжатия.

Поршень перекрывает продувочные окна (точка 1), прекращая тем самым поступление свежего заряда в рабочий цилиндр, после чего начинается процесс сжатия воздуха в цилиндре, который заканчивается, когда поршень приходит в ВМТ (точка 2). Точка 2 соответствует моменту начала впрыска топлива.

Такт II (рисунок 2.9, б). В районе ВМТ топливо воспламеняется. При движении поршня от ВМТ к НМТ происходит горение, расширение, выпуск и продувка.

В точке 3 заканчивается процесс сгорания. Расширение продуктов сгорания осуществляется до начала открытия выпускного клапана (точка 4).

Поршень, продолжая двигаться к НМТ, открывает продувочные окна (точка 5), в этот момент одновременно открыты и продувочные окна и выпускной клапан – начинается продувка цилиндра. В точке 6 закрывается выпускной клапан, заканчивается продувка цилиндра. Далее, до перекрытия поршнем продувочных окон (точка 1), происходит дополнительное нагнетание воздуха в цилиндр –

дозарядка. В точке 1 перекрываются продувочные окна – начинается новый рабочий цикл.

Четырехтактные и двухтактные ДВС имеют свои достоинства и недостатки. Мощность двухтактного ДВС при одинаковых объемах цилиндров в 1,75–1,85 раза больше мощности четырехтактного ДВС. При прочих равных условиях рост в два раза обусловлен большим количеством рабочих ходов в единицу времени. Но у двухтактных ДВС хуже очистка цилиндров от продуктов сгорания, наполнение цилиндров свежим зарядом воздуха; у них часть рабочего объема теряется на окна.

### 2.1.6 Циклы поршневых ДВС

Циклом теплового двигателя называют круговой термодинамический процесс, в котором теплота превращается в работу. Все термодинамические процессы действительного цикла, осуществляемого в реальном двигателе, в той или иной степени необратимы. Необратимость процессов связана, например, с наличием трения в потоке газа, на преодоление которого затрачивается работа.

На практике широко распространен анализ обратимых термодинамических циклов вследствие их наглядности, простоты анализа и расчетов. Обратимый цикл является как бы эталонным циклом, обладающим максимальным термическим КПД при тех же параметрах. При их исследовании принимаются следующие допущения:

- рабочим телом является идеальный газ;
- масса рабочего тела неизменная и одинаковая во всех процессах;
- изменением теплоемкости рабочего тела пренебрегают или учитывают изменение теплоемкости в зависимости от температуры и состава смеси газов;
- подвод теплоты к рабочему телу осуществляется путем ее отдачи от горячего источника;
- процессы газообмена заменяют обратимым процессом с отводом теплоты от рабочего тела к холодному источнику;
- процессы сжатия и расширения принимаются адиабатными.

На рисунке 2.10 показаны циклы существующих поршневых ДВС, построенные с учетом вышеперечисленных допущений.

Двигатель, предложенный Рудольфом Дизелем, работал по циклу, представленному на рисунке 2.10, а. Сгорание топлива происходит достаточно медленно, поршень успевает сместиться на значительное расстояние по направлению к НМТ, рост давления при сгорании компенсируется увеличением объема рабочего тела, поэтому подвод тепла можно считать происходящим при постоянном давлении.

Современные двигатели, в которых используются легкие топлива (например, бензиновые), работают по циклу Отто (рисунок 2.10, б). Топливо в таких двигателях сгорает значительно быстрее, чем в дизелях. Весь процесс сгорания происходит при положении поршня в районе ВМТ. Объем рабочего тела в процессе

сгорания не успевает значительно измениться, поэтому считается, что подвод теплоты осуществляется при постоянном объеме.

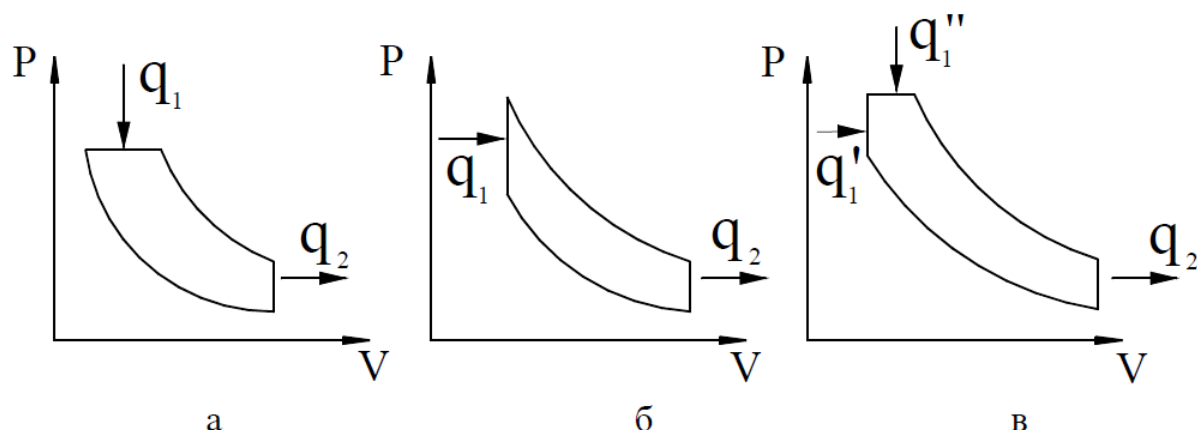


Рисунок 2.10 – Циклы поршневых ДВС:

а – цикл Дизеля (подвод теплоты при  $p = \text{const}$ ); б – цикл Отто (подвод теплоты при  $V = \text{const}$ ); в – цикл Тринклера (подвод теплоты при  $V = \text{const}$  и  $p = \text{const}$ )

Современные дизели работают по циклу Тринклера (рисунок 2.10, в). По сравнению с двигателем Рудольфа Дизеля в них значительно улучшен процесс смешивания распыленного топлива с воздухом в камере сгорания (процесс смесеобразования). Вследствие этого часть топлива сгорает достаточно быстро, при положении поршня в ВМТ, поэтому считается, что часть теплоты  $q_1'$  подводится при постоянном объеме. Остальная часть топлива сгорает при движении поршня к НМТ, здесь осуществляется подвод  $q_1''$  тепла при постоянном давлении (как и в цикле Дизеля).

### 2.1.7 Наддув дизелей

Наддувом называют способ повышения мощности двигателя, основанный на подаче в цилиндр воздуха под давлением выше атмосферного при соответствующем увеличении цикловой подачи топлива.

Использование наддува дает возможность в несколько раз (до 4–5) увеличить мощность двигателя без изменения их основных размеров.

Основными способами осуществления наддува являются механический, газотурбинный и комбинированный. При механическом наддуве компрессор приводится в действие от коленчатого вала двигателя через передачу. Эту схему используют обычно в составе комбинированных систем наддува в качестве первой или второй ступени наддува. Как самостоятельная система она нерентабельна.

В судовых дизелях в основном применяется газотурбинный наддув. Система газотурбинного наддува состоит из дизеля, турбины и компрессора. Турбина и компрессор установлены на общем валу и представляют собой единый автономный

агрегат, называемый турбокомпрессором (рисунок 2.11). Компрессор связан с дизелем трубопроводом подачи воздуха, а турбина – трубопроводом подвода газа к соплам турбины от выпускных органов дизеля. Ротор турбокомпрессора связи с коленчатым валом не имеет.

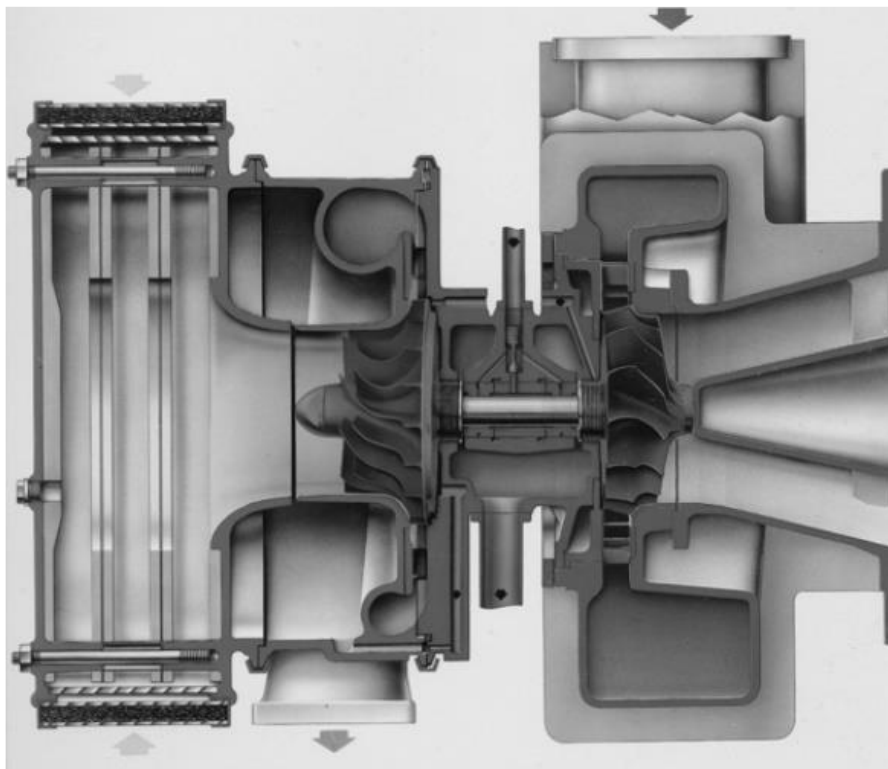


Рисунок 2.11 – Турбокомпрессор наддува ДВС

Мощность, развиваемая газовыми турбинами турбокомпрессоров судовых дизелей, может достигать 30 % индикаторной мощности дизеля, поэтому дизели с газотурбинным наддувом называют комбинированными турбопоршневыми двигателями.

### 2.1.8 Показатели работы ДВС

**Индикаторные показатели.** Индикаторные показатели характеризуют совершенство рабочего цикла в двигателе.

Индикаторная работа  $L_i$  – работа, совершаемая газами в цилиндре за цикл.

Среднее индикаторное давление  $P_i$  – это такое условное постоянное давление, которое, действуя на поршень за время одного рабочего хода, совершает работу, эквивалентную индикаторной работе за цикл. Вводится для удобства ведения расчетов и сравнения разных двигателей.

Индикаторная мощность  $N_i$  – это мощность, соответствующая индикаторной работе замкнутого цикла.

Индикаторный КПД  $\eta_i$  – отношение индикаторной работы в цилиндре к количеству теплоты, подведенной с топливом для совершения этой работы:

$$\eta_i = \frac{L_i}{Q_{\text{под}}}. \quad (2.1)$$

Учитывает все тепловые потери в двигателе (в охлаждающую жидкость, на неполноту сгорания, диссоциацию продуктов сгорания и др.). Доля теплоты, превращенная в работу термодинамического цикла, оценивается термическим КПД. Здесь учитывается лишь один вид потерь – неизбежная отдача теплоты холодному источнику. Все тепловые потери в цикле двигателя учитываются индикаторным КПД.

**Эффективные показатели.** Кроме тепловых необходимо учитывать еще и механические потери, которые имеются при передаче энергии расширения газов через поршень и кривошипно-шатунный механизм на коленчатый вал двигателя.

Эффективная мощность  $N_e$  – мощность, замеренная на фланце отбора мощности коленчатого вала:

$$N_e = N_i = N_M; \quad N_e = M_{кр} \omega; \quad N_e = V_s \frac{n \cdot i \cdot p_e z}{60}, \quad (2.2)$$

где  $M_{кр}$  – крутящий момент;  $\omega$  – угловая скорость;  $V_s$  – рабочий объем цилиндра;  $n$  – частота вращения коленчатого вала;  $i$  – количество цилиндров двигателя;  $p_e$  – среднее эффективное давление;  $z$  – коэффициент тактности (количество циклов за один оборот коленчатого вала).

Механические потери – это потери на трение, на привод навешенных механизмов, вентиляционные потери, насосные потери в четырехтактных ДВС (такт наполнения и выпуска), потери на механический привод компрессора.

Номинальная мощность – это максимальная мощность, которую двигатель может развивать неограниченное время при номинальной частоте вращения.

Цилиндровая мощность  $N_{\text{цл}}$  – мощность одного цилиндра:

$$N_{\text{цл}} = \frac{N_e}{i}. \quad (2.3)$$

Механический КПД  $\eta_m$  – отношение эффективной мощности к индикаторной. Механический КПД учитывает все механические потери в двигателе. У малооборотных дизелей механический КПД находится в пределах 0,87–0,94, у среднеоборотных – 0,84–0,92, у высокооборотных – 0,78–0,85.

Среднее эффективное давление  $P_e$  – является одним из важнейших показателей ДВС, характеризует нагрузку, полноту и своевременность сгорания топлива, степень наддува, т.е. совершенство конструкции в целом:

$$P_e = P_i \eta_m. \quad (2.4)$$

Среднее эффективное давление у судовых ДВС:

- двухтактные без наддува: 450–650 кПа;

- двухтактные с наддувом: 750–1600 кПа;
- четырехтактные без наддува: 500–600 кПа;
- четырехтактные с наддувом: 1200–2500 кПа.

Эффективный КПД  $\eta_e$  – важнейший показатель экономичности работы двигателя; отражает отношение эффективной работы на валу к количеству теплоты, подведенной к двигателю:

$$\eta_e = \eta_i \eta_m. \quad (2.5)$$

Эффективный КПД учитывает все тепловые и все механические потери.

**Тепловой баланс ДВС.** Распределение энергии, подведенной с топливом, характеризуется внешним тепловым балансом. Этот показатель позволяет судить о степени совершенства двигателя, является исходным при проектировании систем охлаждения и смазки и определяет пути наиболее рациональной утилизации тепловых потерь.

Уравнение внешнего теплового баланса:

$$Q_T = Q_e + Q_G + Q_B + Q_M + Q_{н.п.}, \quad (2.6)$$

где  $Q_T$  – теплота сгорания введенного в двигатель топлива, Дж/кг;  $Q_e$  – теплота, эквивалентная эффективной работе двигателя, Дж/кг;  $Q_G$  – теплота, уносимая выпускными газами, Дж/кг;  $Q_B$  – теплота, отводимая от двигателя охлаждающей жидкостью;  $Q_M$  – теплота, отводимая маслом, Дж/кг;  $Q_{н.п.}$  – неучтенные потери (невязка баланса), Дж/кг.

К неучтенным тепловым потерям относят теплоту, отдаваемую от нагретых поверхностей двигателя в окружающую среду, химический недожог и унос топлива с отходящими газами, а также теплоту, соответствующую кинетической энергии выпускных газов.

### 2.1.9 Конструктивное исполнение судовых ДВС

**Остов.** Остов поддерживает и направляет движущиеся детали, воспринимает усилия при работе двигателя. Представляет собой совокупность неподвижных деталей – фундаментной рамы, картера, цилиндров, крышек цилиндров, а также анкерных связей, шпилек и болтов, стягивающих эти детали.

В судовых ДВС применяют различные схемы конструктивного исполнения деталей остова.

На рисунке 2.12 показаны конструктивные исполнения для крейцкопфного и тронкового двигателей.

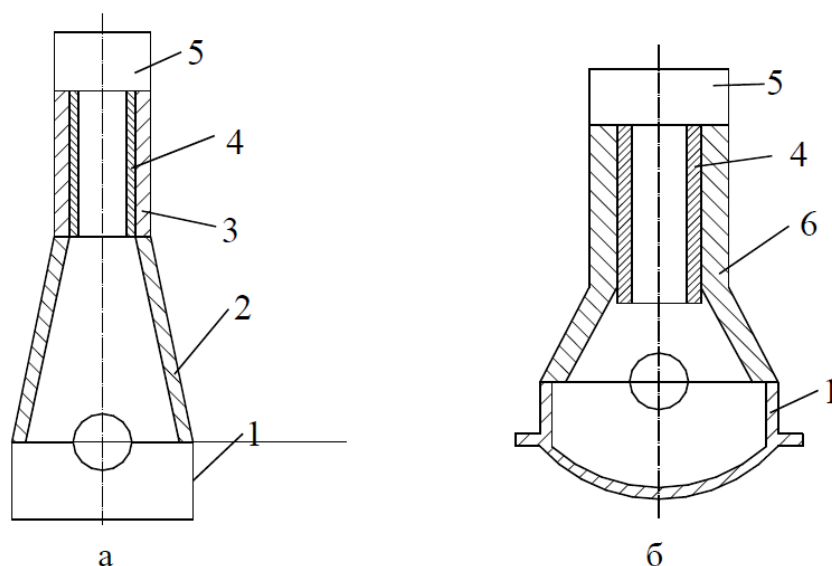


Рисунок 2.12 – Схемы конструктивного исполнения остова ДВС:

а – для крейцкопфного двигателя, б – для тронкового двигателя; 1 – фундаментная рама; 2 – станина; 3 – блок цилиндров; 4 – цилиндровая втулка; 5 – крышка цилиндра; 6 – блок-картер

Фундаментная рама является основанием деталей остова, предназначена для укладки коленчатого вала и служит емкостью для сбора масла, вытекающего из узлов смазывания двигателя.

Станина (картер) служит для соединения цилиндров с фундаментной рамой, образует закрытое пространство для КШМ.

Цилиндры – часть двигателя, где осуществляется рабочий цикл. В тронковых двигателях станина и блок цилиндров объединяются в одну деталь (блок-картер).

Крышка цилиндра закрывает и уплотняет рабочий цилиндр и образует вместе с поршнем и втулкой камеру сгорания.

**Детали движения.** На рисунке 2.13 показаны основные детали движения.

Поршень – предназначен воспринимать давление газов и передавать усилие через шатун на коленчатый вал двигателя.

Шатун – соединяет поршень с коленчатым валом или с крейцкопфом. Служит для передачи усилия от поршня к коленчатому валу.

Коленчатый вал – воспринимает усилие от шатуна и передает вращающий момент потребителю (например, на гребной винт).



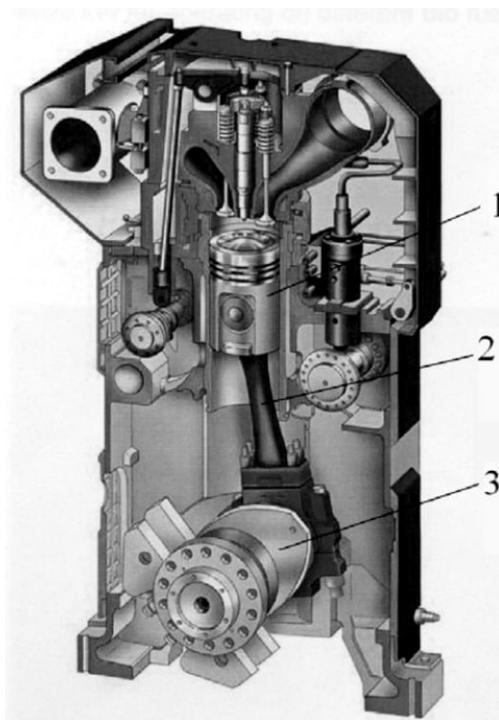


Рисунок 2.13 – Поперечный разрез тронкового четырехтактного ДВС:  
1 – поршень; 2 – шатун; 3 – коленчатый вал

### 2.1.10 Состав и свойства топлив, применяемых в ДВС

Основным топливом для ДВС являются продукты переработки нефти. Топливо, применяемое в судовых ДВС, делится на два класса – дистиллятное и тяжелое.

Дистиллятное топливо – продукт перегонки (дистилляции) нефти. Это топливо имеет малую вязкость, используется в высоко- и среднеоборотных ДВС, иногда в МОД на режимах пуска и маневрирования, а также как добавка к тяжелому топливу для понижения его вязкости.

Тяжелое топливо – смесь крекинг-остатков с дистиллятами. Подразделяется на средне- и высоковязкие сорта. Средневязкие: моторное топливо ДТ, получаемое смешиванием мазута с дистиллятами; флотские мазуты Ф-5, Ф-12, обычно состоящие из 60–70 % маловязкого мазута прямой перегонки, 15–20 % солярового масла и 20–30 % крекинг-мазута.

К высоковязкому остаточному топливу относятся: моторное топливо; ДМ; мазуты М-0,9, М-1,5 и М-2,0; топочные мазуты М40 и М40 В.

Тяжелое топливо обладает значительно худшими показателями, и его применение требует дополнительных затрат на топливоподготовку, но использование в судовых МОД и СОД является экономически оправданным. Они в 1,5–2,0 раза дешевле дистиллятных. Кроме нефтяного можно использовать и другое топливо.

Элементарный состав топлива нефтяного происхождения изменяется примерно в следующих пределах: С – 83–87 %; Н – 12–14 %; S – 0,1–5,0 %; О – 0,1–1,0 %; N – 0,1–0,2 %.

Теплота сгорания – количество теплоты (энергии), выделяющейся при полном сгорании 1 кг топлива.

Плотность топлива – отношение массы топлива к занимаемому им объему. У дизельного топлива плотность  $\rho = 830\text{--}890 \text{ кг/м}^3$ , у тяжелых доходит до  $990 \text{ кг/м}^3$  (моторное  $900\text{--}910 \text{ кг/м}^3$ , мазуты  $950\text{--}990 \text{ кг/м}^3$ ). При увеличении температуры плотность уменьшается, и это нужно учитывать при определении запасов топлива на судне по формуле

$$\rho_T = \rho_T^{20^{\circ}\text{C}} - \gamma(t - 20^{\circ}\text{C}), \quad (2.7)$$

где  $\gamma = (0,712\text{--}0,528)$  – поправочный коэффициент.

Испаряемость (фракционный состав) указывает температурные пределы постепенного выкипания различных фракций топлива. Фракционный состав топлива оказывает влияние на качество смесеобразования. Широкий фракционный состав вызывает ухудшение качества распыливания.

Вязкость (внутреннее трение) топлива – свойство оказывать сопротивление при перемещении частиц вещества под действием внешней силы. Является важнейшей физической характеристикой, определяющей качество распыливания, характер и дальнобойность топливной струи, текучесть топлива по трубопроводам. Различают кинематическую, динамическую и условную вязкость.

Единицей кинематической вязкости  $\nu$  является Стокс (Ст),  $\text{см}^2/\text{с}$ . В основных единицах СИ кинематическая вязкость измеряется в  $\text{м}^2/\text{с}$ ,  $1\text{Ст} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Условной вязкостью (ВУ) принято считать отношение времени истечения 200 мл топлива из вискозиметра при температуре испытания  $t$  ко времени истечения 200 мл дистиллированной воды при  $20^{\circ}\text{C}$ . Единица измерения  $^{\circ}\text{ВУ}$  (градус вязкости условной) соответствует  $^{\circ}\text{Е}$  – градусу Енглера.

Динамическая вязкость –  $\mu = \nu\rho [\text{Па}\cdot\text{с}]$ .

Коксуемость – способность топлива к отложению нагара; выражается в процентах. Коксовым числом называется процентное количество твердых частиц нагара, которые остаются после выпаривания топлива. Они оказывают абразивное действие на детали цилиндра-поршневой группы (ЦПГ).

Кислотность – оценивается количеством миллиграммов КОН, необходимого для нейтрализации кислот, содержащихся в 1 мл топлива. Кислотность вызывает коррозию. Допускаемая кислотность не более 5 мг КОН.

Температура вспышки  $T_{\text{всп}}$  – минимальная температура, при которой топливо, испаряясь, вспыхивает при соприкосновении с открытым пламенем. Российский морской регистр судоходства (РМРС) допускает использовать на судах топливо, температура вспышки которого в закрытом тигле не ниже  $61^{\circ}\text{C}$ .  $T_{\text{всп}}$  – показатель пожарной опасности.

Температура самовоспламенения – минимальная температура, при которой топливо воспламеняется в присутствии воздуха и продолжает гореть без воздействия постороннего источника зажигания.

Температура застывания – температура, при которой теряется способность текучести; для топлив судовых ДВС находится в диапазоне +5...–60 °С.

Цетановое число характеризует склонность топлива к самовоспламенению. Продолжительность периода задержки самовоспламенения определяется по совпадению периода задержки самовоспламенения эталонного и испытуемого топлива, т.е. цетановым числом называется показатель воспламеняемости топлива, численно равный такому процентному (по объему) содержанию цетана ( $C_{16}H_{34}$ ) в смеси с  $\alpha$ -метилнафталином ( $C_{10}H_7CH_3$ ), при котором периоды задержки воспламенения этой смеси и испытуемого топлива будут одинаковы (цетан – легковоспламеняющееся;  $\alpha$ -метилнафталин – трудновоспламеняющееся вещество, цетановое число которого = 0).

У дизельного топлива ц.ч. = 40–60, у тяжелого топлива ц.ч. = 25–40.

Октановое число характеризует антидетонационные свойства топлива.

Октановое число для бензинов может превышать значение 100.

Зольность топлива определяется количеством остатков веществ минерального происхождения, образующихся в результате сжигания топлива. Наиболее вредными зольными элементами являются пятиокиси ванадия  $V_2O_5$  и соли Na, так как у них низкая температура плавления (550–600 °С) и они прилипают к металлическим поверхностям.

Содержание золы должно быть меньше 0,01–0,02 % в дизельном топливе и меньше 0,15 % в тяжелом. Механические примеси в топливе разрушают сопловые отверстия форсунок, что увеличивает длину факела. Возможно зависание плунжеров топливной аппаратуры. Особенно опасны частицы размером более 5 мкм. Показатель механических примесей для тяжелого топлива должен составлять не более 0,5 %.

Вода снижает теплоту сгорания топлива, вызывает электрохимическую коррозию плунжерных пар. Содержание воды в топливе для МОД должно быть меньше 1 %, в ВОД – недопустимо вообще.

Сера – в тяжелом топливе доходит до 5 %. Вызывает коррозию, усиливает нагарообразование. При горении сера окисляется до сернистого ангидрида ( $SO_2$ ) и серного ангидрида ( $SO_3$ ). Реагируя с водяными парами, они образуют пар  $H_2SO_4$ . Реакция усиливается в присутствии ванадия или никеля (которые являются катализаторами). При температуре верхнего пояса цилиндра < 150 °С на нем конденсируются пары  $H_2SO_4$  и способствуют активной электрохимической коррозии цилиндра и поршневых колец. Для борьбы необходимо поддерживать высокую температуру воды в зарубашечном пространстве и применять высокощелочные масла, которые нейтрализуют кислоту.

### 2.1.11 Смазочные материалы для ДВС

Смазочные материалы разделяются на жидкие, пластичные и твердые.

Жидкие смазочные материалы (масла) применяются в высокоскоростных подшипниках с гидродинамическим режимом трения и в гидростатических подшипниках. Кроме собственно смазочного действия они обеспечивают отвод теплоты из зоны трения.

Пластичные (консистентные) смазки применяются:

- в открытых, негерметизированных узлах трения;
- в труднодоступных местах;
- при одновременном использовании в качестве материала для консервации;
- для герметизации подвижных уплотнений и сальников;
- при высоких нагрузках и малых скоростях, ударных нагрузках, периодической работе и частых остановках;
- при вынужденном контакте узла трения с водой.

Твердые смазки используются как присадки к пластичным смазкам; наполнители материалов на полимерной основе и твердосмазочные покрытия; компоненты материалов, получаемых методом порошковой металлургии.

Основным компонентом жидких и пластичных смазочных материалов является хорошо очищенное базовое масло. Его получают из мазута. Мазут перегоняют на масла в вакууме в присутствии водяного пара.

Различают масляные дистилляты (продукты перегонки) и остаток, или полугудрон. Из дистиллятов получают дистиллятные масла, а из остатка – остаточные (масла с повышенной вязкостью). Жидкие смазочные материалы – это базовые масла, легированные присадками. Присадки в базовые масла вводят в строго определенных количествах, в результате получают легированные смазочные материалы, значительно отличающиеся по своим свойствам от исходных природных масел.

Основные типы присадок: антиокислительные, антикоррозионные, противопенные, моющие, антиэмульсионные, вязкостные, депрессорные, противозадирные и противоизносные, противоскачковые (снижают разность между силой трения покоя и силой трения движения).

Смазочные масла подразделяются в зависимости от применения на моторные, промышленные и специальные (компрессорные, турбинные и др.).

#### **Контрольные вопросы:**

1. Назовите основные узлы, детали и системы судового дизеля.
2. Поясните, в чем состоит принципиальное отличие двухтактного дизеля от четырехтактного.
3. Назовите признаки, по которым классифицируют судовые дизели. Как маркируют судовые дизели?
4. Перечислите основные узлы, детали и системы дизеля.
5. Назовите основные параметры, характеризующие экономичность дизеля.
6. Изобразите индикаторные диаграммы двух- и четырехтактных дизелей. В чем проявляется их отличие?
7. Нарисуйте круговые диаграммы газораспределения двух- и четырехтактных дизелей. Поясните, какие процессы и характерные углы на них изображены?

Литература [3, 4, 6, 8, 9]

## **Тема 2.2 Дизельные судовые энергетические установки**

Условия работы дизельной СЭУ зависят от района и объекта промысла, времени года, типа и назначения судна. Принципиально все режимы можно объединить в четырех составляющих, называемыми «элементами рейса»: стоянка в порту, стоянка в море, переход и промысел.

Работа СЭУ на промысле имеет ряд особенностей, заключающихся в том, что траление, являющееся буксировочным режимом, требует особого внимания из-за того, что дизель работает в наиболее неблагоприятных условиях. Мощность, необходимая для буксировки трала, не является постоянной, она изменяется в широких пределах в зависимости от конкретных условий промысла, характера грунта, типа промыслового вооружения, скорости траления, состояния моря и прочих.

В результате изучения темы студент должен знать законы и принципы регулирования и управления судовыми дизелями, уметь правильно выбирать режимы их работы с учетом недопущения тепловых и механических перегрузок и наивысшей экономичностью.

Основные вопросы темы:

- типы главных дизельных энергетических установок, их особенности и комплектация
  - условия и особенности эксплуатации дизельных энергетических установок промысловых и транспортных судов;
  - скоростные и нагрузочные характеристики дизелей;
  - винтовые характеристики, «тяжелый» и «легкий» гребной винт;
  - взаимодействие дизеля, винта и корпуса судна при пуске, нагружении, реверсе. Влияние пусков, реверсов и перегрузок на техническое состояние дизеля;
  - паспортные и универсальные диаграммы и их использование.
- Оптимизация режимов эксплуатации СЭУ промысловых судов с различными схемами передачи мощности на винт;
- основные операции по техническому использованию и техническому обслуживанию судовых дизелей.

### **2.2.1 Типы главных дизельных энергетических установок, их особенности и комплектация**

#### **Классификация ДВС.**

*По назначению* ДВС делятся на главные и вспомогательные. Главные обеспечивают ход судна. Вспомогательные обеспечивают работу электрогенераторов.

*По осуществлению рабочего цикла* ДВС бывают четырехтактными и двухтактными.

*По способу образования рабочей смеси* ДВС могут быть с внутренним и с внешним смесеобразованием. Ко второй относятся карбюраторные, а к первой дизельные ДВС.

*По способу наполнения цилиндров свежим воздухом* – двигатели баз наддува и двигатели с наддувом. В последних воздух в рабочие цилиндры нагнетается под давлением специальным нагнетателем (компрессором или газотурбинным компрессором), в результате чего достигается увеличение воздушного заряда и повышение мощности двигателя.

*По способу воспламенения горючей смеси* различают:

- двигатели, в которых распыленное топливо воспламеняется при смешивании со сжатым воздухом и поэтому разогретым воздухом (дизели);
- двигатели с воспламенением от электрической искры (карбюраторные двигатели).

*По направлению вращения коленчатого вала* различают двигатели правого (вращение по часовой стрелке, если смотреть со стороны потребителя энергии) и двигатели левого (против часовой стрелки) вращения.

*По способу изменения направления вращения вала* двигатели делят на реверсивные и нереверсивные. Реверсивные – такие двигатели, у которых можно изменять направление вращения коленчатого вала. Как правило это мощные двигатели. Нереверсивными выполняют двигатели меньшей мощности (до 220 кВт). Задний ход судна в этом случае выполняется при помощи реверсивной передачи, установленной между двигателем и гребным валом.

*По частоте вращения коленчатого вала* различают двигатели малооборотные ( $n=100...200$  об/мин), среднеоборотные ( $n=200...750$  об/мин) и высокооборотные ( $n>750$  об/мин).

### **Маркировка судовых дизелей.**

Маркировка используется для условного обозначения типа двигателя и выполняется на дизелестроительных заводах. Условные буквенные обозначения отдельных характеристик дизелей, применяемых в России и Украине, в Германии и других странах, приведены в таблице 6. В каждой стране применяется свое обозначение двигателей.

В соответствии с государственным стандартом обозначение двигателей состоит из цифр, указывающих число цилиндров, и буквенных обозначений характеристик двигателя, после которых дробью показаны диаметр цилиндра и ход поршня (в сантиметрах).

Например, обозначение 64Н18/22 расшифровывается так: шестицилиндровый, четырехтактный, с наддувом двигатель с диаметром поршня 180 мм и ходом поршня 220 мм.

Марка 6ДКРН 74/160 обозначает: шестицилиндровый, двухтактный, крейцкопфный, реверсивный, с наддувом, с диаметром цилиндра 740 мм и ходом поршня 1600 мм.

Таблица 6 – Условные обозначения характеристик двигателей.

Характеристики	Страны			
	Россия, Украина	МАН, Германия	Бурмейстер и Вайн, Дания	Зульмер, Швеция
Четырехтактные	Ч	V	V	B
Двухтактный	Д	Z	V	-
Реверсивный	P	U	F	D
Крейцкопфный	K	K	T	S
Тронковый	-	G	-	T
С газотурбинным наддувом	H	A, C	B	A
С реверсивной муфтой	C	-	-	-
С редуктором	П	-	-	-
Дизель	-	D		

В то же время дизели некоторых отечественных заводов имеют особую маркировку. В Германии в маркировку двигателей входят тактность, число цилиндров и ход поршня. Например, двигатель 6VD24 расшифровывается как шестицилиндровый нереверсивный четырехтактный дизель с ходом поршня 240 мм. При наличии наддува, а также если дизель реверсивный дополняются буквы А и U. Например, 8NVD – 48 AU.

На учебном судне института в качестве главного установлен дизель 6NVD26-A-3(шестицилиндровый, нереверсивный, четырехтактный дизель с газотурбинным наддувом, ходом поршня 260 мм, 3-й модификации), а в качестве вспомогательных – два дизеля 64 12/14.

### Типы СЭУ с ДВС

Судовые энергетические установки с ДВС классифицируются по целому ряду признаков.

*По числу гребных валов:* одновальные; двухвальные; трехвальные и т.д.

*По способу передачи мощности от дизеля к гребным винтам:*

- с жесткой передачей без изменения частоты вращения (гребной винт вращается с частотой вращения коленчатого вала главного двигателя);
- с гибкой передачей (с помощью гидромукт, электромагнитных муфт; гидротрансформаторов);
- с электрической передачей – дизели работают на генераторы, а гребные винты приводятся в действие от гребных электродвигателей (ГЭД);

– с гидропередачей, обеспечивающей гидрореактивную движущую силу (на судах с водометными движителями).

*По числу двигателей*, работающих на каждый гребной вал: одномашинные – на каждый гребной вал работает один главный дизель; многомашинные – на каждый гребной вал работают два и более главных двигателей, передающих свою энергию вращения на гребной вал через один общий редуктор.

*По типу применяемых двигателей:*

– однотипные, когда используются однородные типы двигателей;  
– комбинированные – используются несколько типов главных двигателей (например, дизели и газовые турбины и т.п.).

*По типу движителя:* с гребным винтом фиксированного шага (ВФШ); с гребным винтом регулируемого шага (ВРШ); с противоположно вращающимися соосными гребными винтами; с водометными движителями; с крыльчатыми движителями.

Современные мощные главные двигатели выполняются с наддувом и струйным распылением топлива. Четырехтактные дизели выполняются тронковыми, двухтактные – тронковыми и крейцкопфными, а также с противоположно движущимися поршнями и несколькими коленчатыми валами.

**Главные судовые дизели классифицируются по ряду признаков.**

1. *По назначению:*

– всережимные, обеспечивающие все скорости судна от самой малой до полной;  
– ускорительные (форсажные), обеспечивающие полные и близкие к полным хода при кратковременном использовании;  
– маршевые (экономического хода), обеспечивающие длительный экономический ход.

2. *По конструктивному исполнению:*

– рядные с вертикальным расположением цилиндров четырехтактные с числом цилиндров от 6 до 12 и двухтактные с числом цилиндров от 5 до 12;  
– V-образные с числом цилиндров от 8 до 20;  
– X-образные с числом цилиндров от 16 до 32;  
– звездообразные с числом цилиндров от 42 до 56;  
– двухрядные – по существу два дизеля, соединенных общим картером, рамой и зубчатой передачей;  
– Δ-образные двухтактные с противоположно движущимися поршнями с числом цилиндров от 9 до 18.

3. *По реверсивности:* нереверсивные с реверсивными муфтами или с реверс-редукторами; реверсивные.

4. *По массовым и габаритным характеристикам, скоростному режиму и ресурсу:*

– малооборотные тяжелые;  
– среднеоборотные;  
– быстроходные средней удельной массы;  
– быстроходные легкие.



Рассмотрим более детально указанные типы дизелей и сравним их.

*Малооборотные тяжелые дизели* являются в основном двухтактными с клапанной или петлевой продувкой. Они отличаются высокой удельной массой (до 55 кг/кВт), большими габаритами и низкой частотой вращения коленчатого вала. Такие дизели применяют для прямой передачи мощности на гребные винты крупнотоннажных морских судов (танкеров, сухогрузов, рудовозов и др.). Ведущие западные фирмы создали ряд дизелей этого класса с числом цилиндров от 6 до 12, мощностью 30-35 тыс. кВт. Например, дизели фирмы МАН-Бурмейстер и Вайн. К таковым относится дизель  $\angle$  60МС. Это двухтактный крейцкопфный реверсивный с прямоточно-клапанной продувкой и турбинным наддувом.

*Среднеоборотные дизели* получили широкое распространение в качестве главных дизелей СЭУ. Это четырехтактные двигатели с высоким давлением наддува, числом цилиндров от 6 до 20 при рядном или V-образном расположении цилиндров, частотой вращения коленчатого вала 350...550 об/мин. Такая частота вращения коленчатого вала, как правило, не позволяет устанавливать прямую передачу на гребной винт. Поэтому применяются редукторные передачи, соединяемые с дизелем упругими муфтами. Ресурсы дизелей и передач отвечают высоким требованиям морского флота. Причем суммарная масса дизель-редукторного агрегата в 2,0...2,5 раза меньше малооборотных тяжелых дизелей.

На различных судах в качестве главных двигателей широко применяются среднеоборотные дизели фирм: «МАН-Бурмейстер и Вайн», «Зульцер», «Пилстик», «МаК» и др. Они, как и малооборотные дизели эксплуатируются на тяжелых сортах топлива. Примером могут служить среднеоборотные дизели <40/54 фирмы «СЕМТ Пилстик», а также дизели фирмы «МаК» серии М601.

*Высокооборотные (быстроходные) дизели* средней удельной массы. Это дизели рядной и V-образной конструкции мощностью 740...4500 кВт при частоте вращения 750...1500 об/мин. Такие дизели применяются на судах ограниченного водоизмещения (буксирах, небольших танкерах, морских траулерах, речных судах) и в качестве главных дизель-генераторов на судах с электродвижением.

*Быстроходные легкие судовые дизели сложной конструкции* V-, X-, H-образные или звездообразные. Их изготавливают при широком использовании алюминиевых сплавов для получения минимальной массы. Они применяются на наиболее быстроходных судах, требующих развития высокой скорости в легких энергетических установках. Например, на судах с подводными крыльями мощность серийных дизелей этого типа достигает 3700 кВт. Они отличаются малыми размерами диаметра и большим числом цилиндров (12...56). Этот тип двигателей обладает наименьшим ресурсом и в этом их основной недостаток.

#### **Дизельные установки с малооборотными двигателями**

Компоновка, масса, габариты и стоимость установки зависят в основном от характеристик главного двигателя, а малооборотные дизели имеют большие размеры и массу. Поэтому они размещаются в средней части машинного отделения. Чаще всего такие дизели применяются в одновальных установках с размещением в диаметральной плоскости судна параллельно основной плоскости или с незначительным отклонением от линии гребного вала.

Реже встречаются двухвальные установки, а в практике судостроения известен случай строительства трехвального контейнеровоза (Япония) с малооборотными дизелями фирмы «Мицубиси». На этом судне установлено два дизеля эффективной мощностью 18,5 мВт по бортам и один дизель эффективной мощностью 26 мВт – по диаметральной плоскости.

Следует иметь в виду, что многовальная установка во многом уступает одновальной по массе, габаритам, сложности, капитальным затратам, затратам на обслуживание и др. Во многих случаях многовальную установку с малооборотными дизелями не всегда можно считать оправданной, тем более, что в настоящее время максимальная мощность таких дизелей составляет 70 мВт при высокой экономичности. Например, дизели фирмы «Зульцер» типа RTA в 12-ти цилиндровом исполнении.

Таким образом, наиболее эффективны одновальные установки с малооборотными дизелями.

### **Дизель-редукторные установки со среднеоборотными и высокооборотными двигателями**

Такие установки занимают второе место по распространенности и применяются на морских судах транспортного, технического, вспомогательного и промыслового флота, а также на судах смешанного плавания (река-море) и на речных судах.

Число оборотов коленчатого вала среднеоборотных дизелей (250...750 об/мин) превышает допустимые обороты гребного винта и поэтому в состав такой дизельной установки включаются передачи мощности (механические, гидравлические или комбинированные).

Совокупность установленных на общей фундаментной раме главных двигателей и передач, соединительно-разъединительных или пружинных муфт называется *дизель-редукторным агрегатом*.

К передачам, как правило, присоединяются один или два валогенератора, что усложняет схему установки, но дает выигрыш в экономии топлива для выработки электроэнергии при работе главного двигателя. Такое решение также позволяет уменьшить количество дизель-генераторов судовой электростанции и экономить ресурс.

Редукторы и соединительно-разъединительные муфты увеличивают массу (на 25...60%) и габариты (на 30...50%) дизель-редукторной установки. Однако, в целом, они в 1,2...2 раза меньше, нежели установки с малооборотными дизелями. Габариты дизель-редукторного агрегата практически не отличаются от габаритов установки с малооборотным дизелем. Однако, последний в два раза выше.

Незначительная высота среднеоборотных дизелей позволяет использовать их на судах, которые перевозят длинномерные грузы и на которых необходимы палубные проезды для колесной техники (например, суда с горизонтальной грузообработкой).

Конструктивно главные установки со среднеоборотными дизелями и механическими передачами бывают одно-, двух-, трех- и четырехмашинными, которые присоединяются к одному редуктору. Такие СЭУ бывают одно- и многовальными.

По сравнению с установками с малооборотными двигателями, рассматриваемые установки имеют ряд преимуществ:

- машинное отделение судна со среднеоборотными дизелями может иметь меньшую высоту, а сама ГЭУ – меньше массу и габариты;
- наличие редуктора позволяет использовать двигатели и гребной вал при частичных оборотах, что отвечает наибольшему КПД винта;
- эксплуатационные характеристики установки выше за счет того, что при снижении скорости хода судна отдельные двигатели можно остановить, а оставшиеся в работе используются более эффективно;
- неисправность одного из двигателей не приводит к остановке судна, а возможность отключения неисправного двигателя позволяет выполнить его ремонт во время рейса.

Следует отметить и недостатки установок со среднеоборотными двигателями по сравнению с установками с малооборотными:

- ресурс среднеоборотного дизеля значительно ниже;
- из-за затрат энергии в редукторе и муфтах механический КПД меньше;
- более сложна эксплуатация из-за большого количества цилиндров дизелей;
- эти установки имеют повышенный уровень шума, что заставляет принимать дополнительные меры по шумоизоляции, а это ведет к удорожанию установки.

*Установки с высокооборотными дизелями* применяются на рыболовецких сейнерах речного флота, портовых буксирах, судах обеспечения, катерах, судах на подводных крыльях и на воздушной подушке. К этому классу относятся двигатели с частотой вращения коленчатого вала выше 750 об/мин. Поэтому в состав энергетической установки применяется понижающая передача на движители. Как правило, применяется механические, гидравлические, гидромеханические и электрические передачи.

Высокооборотные дизели имеют меньше массогабаритные показатели, чем среднеоборотные, меньшую стоимость и высокую ремонтпригодность. Однако они уступают среднеоборотным экономичностью, ресурсом и требуют использования легкого (дизельного) топлива.

Высокооборотные дизели широко применяются в установках с электропередачами. Это позволяет создавать компактные энергетические установки, так как дизель-генераторы можно размещать в любом месте судна, включая платформы и верхнюю палубу. При наличии условий передачи мощности на гребной винт в таких установках можно обойтись без валопровода.

СЭУ со среднеоборотными и высокооборотными дизелями отличаются между собой разнообразием конструктивных и компоновочных решений, которое определяется в большей степени типом и назначением судов. У них чаще, чем в установках с малооборотными дизелями, применяются навешанные вспомогательные механизмы (электрогенераторы, компрессоры воздушные, насосы топливные, масляные, охлаждения, осушительные, противопожарные), а это упрощает компоновку систем и уменьшает нагрузку на судовую

электростанцию. В то же время навешанные механизмы (в большом количестве) могут снизить надежность и ремонтпригодность установки.

### **2.2.2 Основные типы дизельных энергетических установок судов промыслового флота**

Современная энергетическая установка морского судна представляет собой 'сложный комплекс агрегатов и систем, обеспечивающих надежную работу судна при всех режимах

В зависимости от назначения и условий эксплуатации промысловых судов состав и схемы энергетических установок могут быть различными, однако все они включают в себя: один или несколько главных двигателей; вспомогательные дизель-генераторы; вспомогательные механизмы, устройства и системы, обеспечивающие работу главных двигателей и дизель-генераторов; передачи и движители.

По способу передачи мощности от главного двигателя к гребному винту судовые энергетические установки можно разделить на четыре основных типа: установки с реверсрედукторной передачей мощности на винт от нереверсивного двигателя; установки с непосредственной передачей мощности на винт от реверсивного двигателя; дизель-редукторные установки и дизель-электрические установки.

#### **Энергетические установки с реверсрעדукторной передачей на гребной винт от нереверсивного двигателя.**

Этот вид установок используется на малотоннажных промысловых судах: средних и малых сейнерах, малых траулерах и приемотранспортных судах с мощностью главного двигателя 80—200 л. с. Схема машинного отделения с такой энергетической установкой среднего черноморского сейнера изображена на рисунке 2.14.

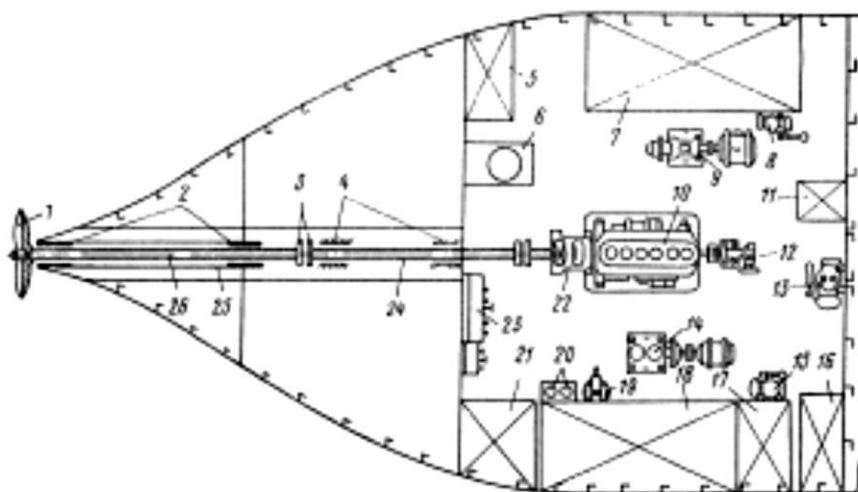


Рисунок 2.14 - План машинного отделения морского промыслового судна

Главный двигатель 10 вращает гребной винт 1. Передача мощности от двигателя к винту осуществляется валопроводом. Он состоит из отдельных

валов: промежуточного 24 и дейдвудного или гребного 26, соединенных между собой фланцами 3. Промежуточный вал расположен в опорных подшипниках 4, а дейдвудный вал — в дейдвудных подшипниках 2, которые установлены в дейдвудной трубе 25. На конце дейдвудного вала закреплен гребной винт 1. Коленчатый вал двигателя соединен с валопроводом через реверсдуктор 22, при помощи которого изменяется направление вращения валопровода и гребного винта. В корпусе реверсдуктора расположен упорный подшипник. Он воспринимает давление, создаваемое гребным винтом.

Для обеспечения энергией судовых вспомогательных и промысловых механизмов — насосов, лебедок, сетеподъемных машин — в машинном отделении у правого борта размещен вспомогательный двигатель 14, который приводит в действие электрогенератор. С левого борта установлен пожарный насос 9 с приводом от электродвигателя. В носовой части расположен осушительный насос 12, откачивающий воду из трюма и приводимый в действие непосредственно от главного двигателя. Запускается главный двигатель электростартером.

Для питания электростартера и для освещения помещений предусмотрены аккумуляторы, расположенные в шкафу 21 по правому борту. В случае выхода из строя электростартера главный двигатель может быть пущен в ход сжатым воздухом, который хранится в баллонах 20. Сжатый воздух используется и для других нужд. Запас его может быть пополнен компрессором 19. У кормовой переборки находятся распределительный щит 23 судового электрохозяйства, котел водяного отопления 6 и угольный бункер 5. По бортам размещены цистерны: основного запаса топлива 7 и 18, масляная 16 и расходная топливная 17. У носовой переборки установлен расходный масляный бак 11. Рядом с цистернами размещены ручные насосы: 8 — для воды, 13 — для масла, 15 — для топлива.

### **Энергетические установки с непосредственной передачей на винт от реверсивного двигателя.**

Эти установки получили наибольшее распространение на промысловых судах. Они используются на средних и больших траулерах, больших сейнерах, транспортных рефрижераторах, плавбазах. В таких энергетических установках коленчатый вал главного двигателя жестко соединен через систему валов с гребным валом. Гребной винт в этом случае имеет ту же частоту вращения, что и вал главного двигателя.

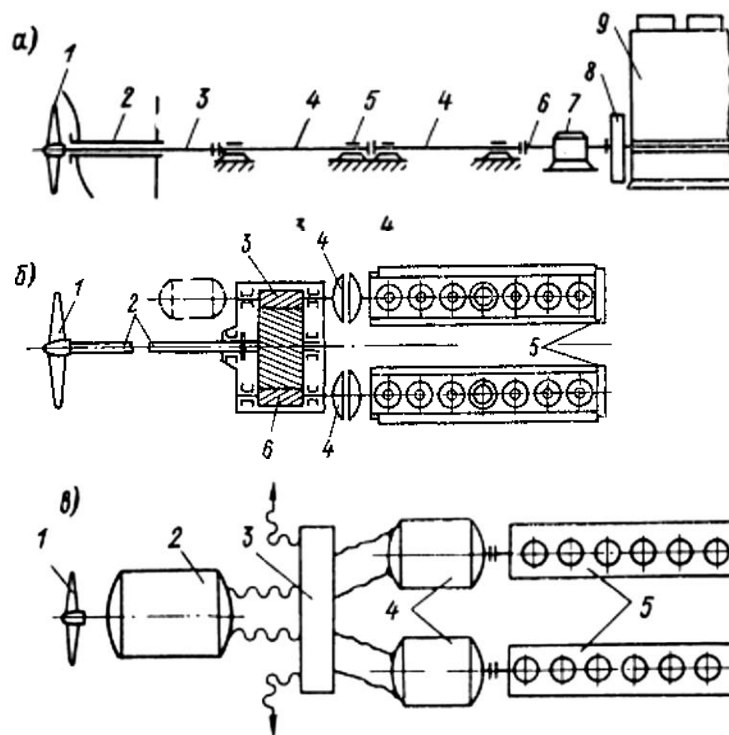


Рисунок 2.15 - Схемы дизельных установок:

*а* — с непосредственной передачей на винт; *б* — с редукторной передачей; *в* — с электрической передачей.

Схема непосредственной передачи от реверсивного двигателя показана на рисунке 2.15, а. С маховиком 8 двигателя 9 непосредственно соединен короткий упорный вал 6, снабженный откованным заодно с ним упорным гребнем. Упорный вал лежит в упорном подшипнике 7, воспринимающем осевое усилие гребного винта. Корпус упорного подшипника неподвижно и прочно прикреплен к набору судна. Упорный вал при помощи фланцев соединяется с промежуточным валом, состоящим из одной или нескольких частей 4, лежащих в опорных подшипниках 5.

Промежуточный вал соединен с гребным валом 3, который вращается в дейдвудной трубе 2. На конце гребного вала укреплен гребной винт 1. Установка такого типа применена на БМРТ типа «Маяковский».

Известно, что к. п. д. гребного винта на номинальном режиме в значительной степени зависит от частоты вращения: с увеличением частоты вращения к. п. д. уменьшается. Поэтому в установках большой и средней мощности с непосредственной передачей мощности на гребной винт применяются главные двигатели с частотой вращения от 110 до 360 об/мин. С точки зрения к. п. д. непосредственная передача наиболее выгодна, поскольку потери в ней при передаче мощности максимальны. Достоинством непосредственной передачи является также ее высокая надежность. Мощность

главных двигателей флота рыбной промышленности в установках с такой передачей находится в пределах от 300 до 10 000 л. с.

### **Энергетическая установка с дизель-редукторной передачей.**

Эта установка имеет в своем составе, как правило, два главных двигателя, от которых мощность передается на один винт через редуктор.

Передаточное отношение редукторов 1:2; 1:4 позволяет использовать двигатели с повышенной частотой вращения. Редукторы в таких установках только снижают частоту вращения коленчатого вала; задний ход обеспечивается путем реверсирования двигателя или с помощью ВРШ.

Схема дизель-редукторной передачи приведена на рисунке 2.15 б. Коленчатые валы двух главных двигателей 5 через две муфты 4 соединены с первичными валами редуктора. Редуктор представляет собой одноступенчатую зубчатую передачу. Шестерни 3 и 6 вращают большое зубчатое колесо, соединенное с валопроводом 2 и гребным винтом 1. В редуктор вмонтирован упорный подшипник валопровода. Благодаря наличию редукторной передачи частота вращения гребного вала может быть снижена до величины, обеспечивающей высокий к. п. д. гребного винта.

В качестве муфт применяются индукционные или гидравлические муфты, допускающие скольжение, что обеспечивает быстрое отключение валопровода от коленчатых валов, отключение одного из двигателей при неисправностях, а также предохраняет шестерни редуктора от резких ударов при включении передачи.

Дизель-редукторная передача применена в установке с двумя главными двигателями 8ДР 43/61 по 2000 л. с. на рыбконсервном заводе «Андрей Захаров».

Аналогичные по типу установки использованы на РТМ «Тропик» и «Атлантик». Они состоят из двух главных двигателей (у РТМ «Тропик» — по 670 л. с., у РТМ «Атлантик» — по 1160 л. с.), соединенных с редуктором при помощи индукционных муфт.

Особенностью установок является применение в их составе обратимых электрических валомашин (на рисунке 2.15,б изображена штриховой линией), позволяющих либо осуществлять отбор мощности от главных двигателей для питания электроэнергией судовых потребителей, либо использовать мощность судовой электростанции для движения судна. Валомашины приводятся от ведомой шестерни редуктора через передачу, повышающую частоту вращения. Такие установки позволяют при выполнении промысловых операций (спуск, подъем орудий лова) использовать резерв мощности главных двигателей для питания электроэнергией промысловых механизмов через валогенератор.

В период переходов валомашина может быть использована как валомотор для увеличения скорости хода судна.

### **Энергетические установки с дизель-электрической передачей.**

Такие установки получили применение главным образом на судах, имеющих мощное рыбообрабатывающее оборудование на борту (производственные рефрижераторы, консервные траулеры), где требуется

гибкое перераспределение энергии, вырабатываемой энергетической установкой: на переходах — максимальное использование вырабатываемой энергии для нужд движения судна, а на промысле — обеспечение работы промысловых и рыбообрабатывающих механизмов. Такую возможность обеспечивает энергетическая установка с электрической передачей.

Электрическая передача показана на рисунке 2.15, в. В машинных отделениях - судов с дизель-электрической передачей устанавливаются агрегаты, состоящие из дизелей 5 и приводимых ими в движение генераторов 4 электрического тока. Гребной винт 1 в этой передаче приводится в действие электродвигателем 2, который получает энергию через распределительный щит 3. Механическая работа главных двигателей 4 в такой передаче превращается в электрическую энергию, которая затем преобразуется в механическую работу в гребном электродвигателе 2 для привода гребного винта. Такое двойное превращение энергии, естественно, уменьшает к. п. д. передачи. Электрическая передача получила распространение на ряде производственных рефрижераторов и консервных траулеров благодаря следующим достоинствам:

- возможности применения нереверсивных быстроходных дизелей с хорошими массогабаритными характеристиками;
- возможности маневрирования числом работающих дизель- генераторов, что позволяет использовать их полностью или частично в зависимости от потребностей в энергии;
- легкому осуществлению реверса при помощи электрических переключателей или ВРШ, что позволяет управлять гребной установкой с мостика;
- возможности размещения энергетической установки независимо от гребных валов (отсутствие промежуточных валов и их туннелей);
- возможности использовать главные генераторы для получения тока, питающего вспомогательные механизмы. К недостаткам электрического привода относятся: невысокий к. и. д., сложность оборудования и необходимость увеличения численности обслуживающего персонала (кроме механиков необходимы еще электромеханики); высокая первоначальная стоимость.

Установка, изображенная на принципиальной схеме рисунке 2.15 в, является установкой с единой электроэнергетической системой. Дизель-генераторы в этом случае не делятся на главные и вспомогательные. Вырабатываемая ими энергия в зависимости от режима эксплуатации судна распределяется через распределительный щит между гребной электрической установкой и другими потребителями. По такой схеме работают энергетические установки траулеров типа «Север», промыслово-производственных рефрижераторов типа «Алтай» и консервных рыболовных траулеров типа «Наталья Ковшова».

Существуют дизель-электрические суда, которые имеют главные и вспомогательные дизель-генераторы, т. е. гребная электрическая установка и



судовая вспомогательная электростанция в этом случае автономны. По такому принципу работают установки китобойных судов типа «Мирный».

В зависимости от рода тока энергетические установки с дизель-электрической передачей могут быть постоянного тока (промышленный рефрижератор типа «Дружба») и переменного тока (промышленные рефрижераторы типов «Алтай», «Зеленодольск»). У китобойцев типа «Мирный» дизель-генераторы гребной установки дают постоянный ток, а электростанции — переменный. Более широкое использование переменного тока в современных дизель-электрических установках объясняется компактностью, простотой конструкции и обслуживания генераторов электродвигателей и другого оборудования переменного тока по сравнению с оборудованием постоянного тока.

### **Энергетические установки с винтами регулируемого шага.**

На всех современных средне- и крупнотоннажных промысловых судах в качестве движителей установлены винты регулируемого шага (ВРШ). Это обусловлено рядом преимуществ ВРШ перед винтами фиксированного шага (ВФШ). Основные из этих преимуществ:

- возможность работы главного двигателя на номинальном режиме независимо от условий и режима работы судна (плавание в неблагоприятных условиях, при повышенном или пониженном сопротивлении движению, буксировка орудий лова и т. д.) за счет выбора соответствующего шага винта;
- значительное повышение маневренных качеств судна, повышение надежности маневра благодаря исключению реверсов главных двигателей и маневрированию только шагом винта без изменения частоты его вращения;
- возможность обеспечения сколь угодно малой скорости хода судна, в том числе режима «Стоп» при вращающемся гребном винте.

При работе на гребной винт нагрузка на двигатель обуславливается сопротивлением, которое встречает движение судна. Мощность, потребляемая гребным винтом, будет зависеть от заданной скорости хода судна, осадки, степени обрастания подводной части корпуса, направления и силы ветра, сопротивления орудий лова и других факторов. Зависимость эффективной мощности от частоты вращения двигателя, работающего на гребной винт, выражается кривой, называемой винтовой характеристикой. При проектировании винтов фиксированного шага их геометрические характеристики рассчитываются, как правило, таким образом, чтобы гребной винт при номинальной частоте вращения на свободном ходу в нормальных условиях плавания и при полной загрузке судна потреблял от главного двигателя мощность, равную номинальной. Такой движитель будет соответствовать корпусу судна и главному двигателю только на одном

номинальном режиме работы судна (точка  $A$  винтовой характеристики 3 на рисунке 2.16).

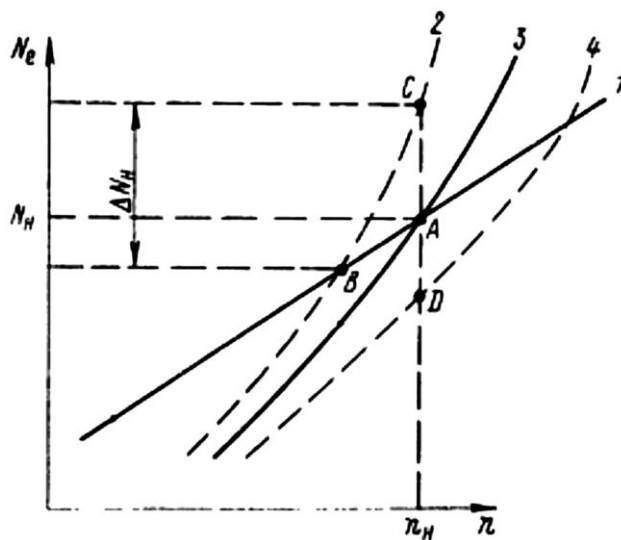


Рисунок 2.16 - Характеристики двигателя:

1, 3 — винтовая и внешняя; 2, 4 — винтовые характеристики, соответствующие «тяжелому» и «легкому» гребным винтам

При буксировке трала, при движении против ветра или обрастании корпуса сопротивление движению судна и мощность, потребляемая гребным винтом при одинаковых с расчетными частотах вращения, возрастают. В этих условиях винт становится, как принято говорить, гидродинамически тяжелым. Винтовая характеристика 2 проходит для этого случая выше расчетной.

Поскольку двигатель внутреннего сгорания имеет верхнюю ограничительную характеристику (кривая 1 на рисунке 58), лимитирующую максимальную нагрузку из условий механической и тепловой напряженности, то область допустимой работы установки

по винтовой характеристике 2 ограничена точкой  $B$ . При увеличении частоты вращения винта по этой характеристике до номинальной (точка  $C$ ) двигатель окажется перегруженным на величину мощности  $\Delta N_n$ . При плавании в балласте или по ветру гребной винт будет потреблять при номинальной частоте вращения мощность, меньшую, чем номинальная мощность главного двигателя (точка  $D$ ). В этих условиях винт окажется гидродинамически легким и винтовая характеристика 4 расположится ниже расчетной. Таким образом, винт фиксированного шага не позволяет эффективно использовать энергетические возможности главного двигателя во всех условиях плавания судна.

Это создает предпосылки к использованию винта регулируемого шага. При всяком изменении условий плавания такой движитель может быть

приведен в соответствие с корпусом и главным двигателем путем выбора соответствующего шага.

Винты регулируемого шага являются сложным устройством, состоящим из двух основных элементов — винта с поворотными лопастями (ВПЛ) и механизма изменения шага (МИШ).

На рисунке 2.17 показана общая схема устройства ВРШ с гидравлическим МИШ, расположенным на валопроводе.

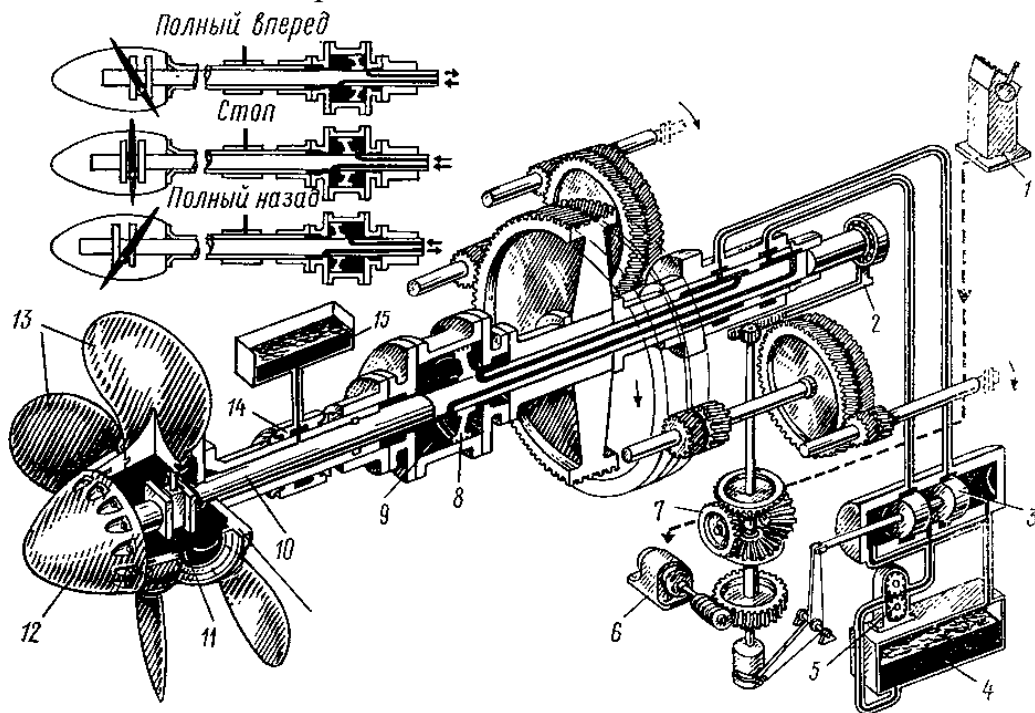


Рисунок 2.17 - Общая схема устройства ВРШ.

Внутри ступицы винта 13 имеется полость, закрываемая обтекателем 12. В этой полости на конце штанги 10 закреплен ползун 11 с четырьмя выфрезерованными пазами (для четырех лопастей). В пазах установлены пальцы, эксцентрично закрепленные в дисках лопастей. Штанга 10 проходит внутри полого гребного вала. На штанге закреплен поршень 8, находящийся в гидроцилиндре 9. Полости гидроцилиндра (справа и слева от поршня) через сверления в штанге сообщаются с гидросистемой. Гидравлическая система состоит из расходного бака 4, масляного насоса 5 и трубопроводов. Для изменения шага винта рукояткой поста управления 1 включается исполнительный электродвигатель 5, который через червячную и рычажную передачи перемещает золотник 3 из среднего положения, благодаря чему масло насосом 5 будет нагнетаться в одну из полостей гидроцилиндра 9 и выпускаться из другой в бак 4. Под действием разности давлений масла на поршень штанги вместе с ползуном 11 начнет перемещаться вдоль оси вала. Ползун, воздействуя через пальцы, будет разворачивать лопасти винта. Перемещение штанги с

помощью зубчатой рейки 2 и дифференциального механизма 7 поставит золотник в среднее положение; поворот лопастей прекратится.

Подача масла в ступицу винта осуществляется из напорной цистерны 15 через маслобуксу 14.

Судоводительский состав при управлении установкой с ВРШ с мостика должен особое внимание уделять выбору оптимальных, наиболее экономичных режимов работы установки.

Следует иметь в виду, что при недостаточно умелой эксплуатации установок с ВРШ возможны значительные перегрузки главного двигателя. Некоторые установки с ВРШ имеют автоматические системы защиты главного двигателя от перегрузки, снижающие нагрузку на дизель путем уменьшения шага винта.

На отдельных судах имеются системы сигнализации о перегрузке двигателя с сигналами на пульте управления. Эти системы должны быть включены и содержаться в исправности. При управлении установкой с ВРШ с мостика должны быть использованы все возможные методы контроля нагрузки на главный двигатель.

Системы аварийно-предупредительной сигнализации и дистанционное управление в судовых энергетических установках. Для улучшения технической эксплуатации судовых энергетических установок, для повышения надежности их работы и исключения аварийности на современных судах предусматривают автоматическую аварийно-предупредительную сигнализацию. Она представляет собой комплекс измерительных и сигнализирующих элементов и служит для извещения вахтенного персонала об отклонении параметров работы двигателя, вспомогательных механизмов и обслуживающих их систем от нормальных.

Известно, что для нормальной работы дизеля необходимо правильное функционирование систем охлаждения, смазки и подачи топлива. Так как правильная работа указанных систем определяется давлениями, температурами и уровнями, то по этим параметрам и выполняется аварийно-предупредительная сигнализация.

Сигнализация о снижении давления предусматривается в системах циркуляционного масла, охлаждающей воды, в топливоподкачивающей системе; о повышении температуры — в системах охлаждения, смазки, в главных и вспомогательных двигателях. Сигнализация об уровне жидкости применяется в танках циркуляционного масла, в расходных топливных танках, в расширительных цистернах систем охлаждения.

В судовых дизельных установках преимущественное распространение получили системы автоматической сигнализации с использованием электрических устройств. Такая система сигнализации состоит из группы первичных и группы вторичных приборов. К группе первичных приборов (датчиков) относятся различные реле: температуры, давления, уровня. Составной частью каждого реле является чувствительный элемент, предназначенный для замыкания электрической цепи в случае отклонения контролируемого параметра от установленного значения. Группу вторичных

приборов составляют промежуточные устройства (электромагнитные реле, выключатели, переключатели), а также световые и звуковые сигнальные устройства.

Чувствительные элементы первичных приборов разнообразны по конструктивному выполнению и принципу действия. Например, чувствительные элементы температуры могут быть сильфонного, дилатометрического типа, в виде термопары; чувствительные элементы давления — сильфонного, манометрического и мембранного типов. Для измерения уровней используются поплавковые датчики. Чувствительными элементами приборов, сигнализирующих о повышении температуры подшипников, служат фотоэлементы, срабатывающие при изменении плотности масляных паров в месте нагрева подшипника.

Сигнализация предупреждает обслуживающий персонал об опасных отклонениях в работе установки, но не обеспечивает автоматического исполнения действий, необходимых для предотвращения аварии; эти функции выполняют системы автоматического регулирования защиты. Устройство этих систем принципиально не отличается от устройства системы сигнализации. Различие состоит лишь в конечном действии систем. Конечным действием систем регулирования параметров

является их автоматическое поддержание на заданном уровне путем изменения режима работы вспомогательных систем, обеспечивающих изменение этих параметров. Конечным действием систем защиты в большинстве случаев является отключение объекта при угрозе аварии.

В некоторых случаях система защиты объединяется с предупредительной сигнализацией через промежуточное реле времени. При достижении параметром предельного значения включаются сигнализация и реле времени. Если через определенный промежуток времени значение параметра не будет восстановлено до нормального, сработает защита, и объект остановится.

Для упрощения управления энергетической установкой и повышения маневренности судна используется дистанционное управление СЭУ. Системой дистанционного управления (в отличие от местного) называется такая система, при которой органы управления, поддерживающие заданный режим, находятся вне двигателя (на мостике). Все органы дистанционного управления группируются в одном месте, которое называется постом или пультом управления.

Системы дистанционного управления судовыми дизелями подразделяются на неавтоматизированные (ДУ) и автоматизированные (ДАУ). В неавтоматизированной системе (рисунок 2.18, а) дистанционный пост 2 управления может иметь одну, две или несколько рукояток. Все операции по установлению заданного режима выполняет вахтенный штурман в надлежащей последовательности и в установленные промежутки времени. Каждая рукоятка дистанционного поста непосредственно или через сервомотор действует на соответствующий орган управления дизелем 1.

При автоматизированной системе (рисунок 2.18, б) в рубке 2 (или на мостике) имеется, как правило, одна рукоятка управления дизелем /, перемещающая

которую, вахтенный штурман может задавать любой режим работы дизеля (пуск, реверс, изменение частоты вращения, стоп), после чего система управления автоматически воспроизводит в определенное время и в требуемой последовательности все необходимые операции.

Большинство траулеров промыслового флота оборудовано винтами регулируемого шага. Управление шагом винта у них также выполняется дистанционным.

На рисунке 2.18, в дана схема системы дистанционного управления дизельной установкой с винтом регулируемого шага БМРТ «Маяковский». С дистанционного поста 5 управляют только шагом винта 1. Дизелем 3 управляют с местного поста 4 в соответствии с командами, передаваемыми из рулевой рубки по машинному телеграфу 6. В схеме предусмотрен также пост 2 управления винтом регулируемого шага в машинном отделении.

Недостатком этой схемы является невозможность изменять скоростной режим двигателя с дистанционного поста. Поэтому на ряде судов, на которых установлены двигатели с винтом регулируемого шага, управление частотой вращения двигателя также выведено в рубку. Дистанционный пост в этом случае имеет две рукоятки.

Для получения высокоэкономичной дизельной установки с винтом регулируемого шага необходимо непрерывно поддерживать строго определенное, наивыгоднейшее соотношение между частотой вращения главного двигателя и шагом гребного винта. Это достигается с помощью программной системы дистанционного управления, изображенной на рисунке 2.18, г.

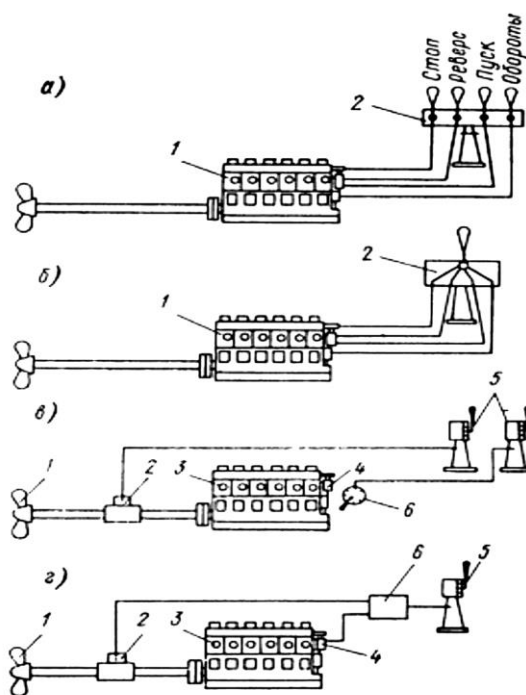


Рисунок 2.18 - Схемы систем дистанционного управления:

а — дизелем неавтоматизированная; б — дизелем автоматизированная; в — винтом регулируемого шага; г — программная система управления дизелем и винтом регулируемого шага.

Команда с дистанционного однорукоятчного поста 5 поступает в программное устройство 6, называемое иногда комбинатором, которое в соответствии с нужной скоростью движения судна автоматически задает наивыгоднейшие значения шага винта 1 через пост управления 2 и частоту вращения дизеля 3 через пост управления 4. При системе совместного управления двигателем и ВРШ достигается наименьший расход топлива на различных режимах и предотвращается перегрузка двигателя (при неизменных условиях плавания).

На случай выхода из строя программного устройства или для установления режима, отличающегося от программного (например, при работе с тралом), предусмотрено раздельное управление шагом винта и частотой вращения двигателя. По такой схеме выполнены системы дистанционного управления дизельными установками БМРТ типа «Лесков», ППР типов «Грумант» и «Рембрандт».

На промысловых судах с редукторной передачей и отбором мощности на валогенератор переменного тока (РТМ «Атлантик») и дизель-электрическими установками на переменном токе (ППР «Алтай» и БКРТ «Наталья Ковшова») частота вращения двигателей остается всегда постоянной. Режим работы судна изменяется только путем изменения шага винта, управление которым — дистанционное.

В зависимости от используемой энергии системы дистанционного управления делятся на механические, гидравлические, пневматические, электрические и смешанные.

### **2.2.3 Обслуживание судовых двигателей внутреннего сгорания**

Подготовка к пуску. Для обеспечения нормальной подготовки главного двигателя и всей дизельной установки к пуску капитан обязан заранее, с учетом времени на подготовку, предусмотренного инструкцией по эксплуатации дизеля, поставить в известность старшего механика о времени, к которому установка должна быть подготовлена.

При подготовке двигателя к пуску необходимо выполнить следующее.

1. Произвести наружный осмотр дизеля. Проверить надежность крепления двигателя, трубопроводов, валопровода. Убедиться в отсутствии посторонних предметов на дизеле и валопроводе, а также подтеканий на трубопроводах систем.

2. Произвести осмотр топливной системы. Проверить, достаточно ли топлива в топливных (расходных) цистернах. Спустить отстой из расходных баков и убедиться, что положение кранов и вентиля обеспечивает подачу топлива от расходного бака к двигателю. Если температура в МО превышает температуру застывания топлива не более чем на 15—20° С, топливо в расходных цистернах должно быть подогрето. При использовании тяжелых и высоковязких сортов топлива необходимо предварительно пустить в ход все системы подогрева,

сепарации и фильтрации топлива и переключить топливную систему на работу дизеля в период пуска на топливе, не требующем подогрева.

1. Произвести осмотр масляной системы. Проверить, достаточно ли масла в расходном баке, в картере или маслосборнике двигателя. Удалить отстой из масляного бака и убедиться, что положение кранов, вентилей и переключателей фильтров обеспечивает подачу масла из расходного бака к двигателю. Прокачать масляную систему с помощью насоса, имеющего автономный электрический привод, или ручного насоса. Смазать места ручной смазки, подать масло к цилиндрам, провернув лубрикатор вручную. При температуре в МО ниже  $+15^{\circ}\text{C}$  масло должно быть прогрето до температуры  $+45^{\circ}\text{C}$ .

2. Осмотреть систему охлаждения. Убедиться в том, что наружный и внутренний контуры охлаждения заполнены соответственно забортной и пресной водой. Проверить, открыты ли отливной клапан и кингстон. При температуре в МО ниже  $+15^{\circ}\text{C}$  необходимо прогреть дизель до температуры охлаждающей воды в замкнутом контуре ( $+25$ ) — ( $+45$ ) $^{\circ}\text{C}$ .

3. Осмотреть систему воздухопуска. Проверить давление сжатого воздуха в пусковых баллонах. В случае необходимости пополнить запас воздуха в баллонах при помощи компрессора.

4. Осмотреть систему управления. Проверить легкость перемещения рукояток управления. Установить рукоятки управления двигателя в нужное положение.

5. Подготовить валоповоротное устройство к проворачиванию и включить его. Провернуть коленчатый вал на два-три оборота при открытых индикаторных кранах, тщательно прослушивая дизель, редуктор, муфты и т. д. Коленчатый вал следует проворачивать, одновременно прокачивая его маслом и охлаждающей водой. При проворачивании следить за открытыми индикаторными кранами, убедиться в отсутствии в рабочих цилиндрах воды, топлива и масла. Убедиться в том, что вода или топливо не поступает в картер дизеля. После проворачивания коленчатого вала включить и надежно застопорить валоповоротное устройство.

По окончании всех операций осуществляют пробные пуски двигателя до первых вспышек в цилиндрах. Включение винта или пуск главного двигателя с прямой передачей на винт производится только с разрешения и по сигналу с мостика. В установках, имеющих разобщительные муфты, отключают винт и пускают двигатель на малые обороты холостого хода. В установках с ВРШ пуск двигателя производится при положении лопастей винта, соответствующем нулевому упору. Даже незначительные дефекты, обнаруженные при подготовке двигателя, должны быть устранены, так как они могут послужить причиной серьезной аварии. О завершении подготовки к пуску вахтенный механик докладывает старшему механику и с его разрешения сообщает на мостик о готовности двигателя.

**Учет расхода топлива и масла.** Запас топлив на судне состоит из основного и аварийного, составляющего 20% основного запаса. Проверка наличия топлива на судне и учет его расхода производится третьим механиком судна один раз в сутки. Суточный расход топлива заносится в машинный журнал и



ежесуточно проверяется старшим механиком. Ежемесячно старший механик составляет и по прибытии из рейса представляет в механико-судовую службу судовладельца теплотехнический и топливный отчеты, которые служат основными документами для учета выполнения норм и достигнутой экономии топлива.

Расход масла на доливку в масляную систему устанавливается в каждом отдельном случае инструкцией завода-строителя или специальными указаниями механико-судовой службы.

Учет ежесуточного расхода масла ведет второй механик.

Запас масла на судне, как и топливный запас, складывается из основного и аварийного (20% основного).

#### **2.2.4 Техника безопасности при эксплуатации двигателей внутреннего сгорания**

Весь персонал, обслуживающий двигатель, должен пройти техминимум и специальный инструктаж по технике безопасности.

Машинное отделение должно содержаться в чистоте, быть хорошо освещенным и вентилируемым. Проходы в машинном отделении всегда должны быть свободными. Настил вокруг двигателя и трапы своевременно и тщательно протирают для удаления масла и топлива.

При работе в ночное время обеспечивают хорошее освещение помещения, рабочих мест для обслуживающего персонала, а также участков расположения контрольно-измерительных приборов. Машинное отделение должно быть оборудовано средствами пожаротушения в соответствии с противопожарными нормами. В районе двигателя не должно быть воспламеняющихся веществ и материалов. Выпускные коллекторы двигателей должны быть хорошо изолированы.

Все детали движения механизмов, не требующие непрерывного наблюдения (маховики, муфты, зубчатые передачи и пр.), надежно ограждают укрепленными кожухами или щитками, которые нельзя снимать во время работы механизма.

Во избежание взрыва категорически запрещается запускать двигатель сжатым кислородом (кислородные баллоны окрашены в голубой цвет). Нельзя быстро, без задержки открывать вентили на воздушных баллонах и на трубопроводах сжатого воздуха во избежание ударов и разрывов трубопроводов.

Запрещается оставлять работающий двигатель без наблюдения.

Нельзя чистить и обтирать движущиеся части механизмов во время работы двигателя. Некоторые детали двигателя можно смазывать вручную на ходу лишь с помощью приспособлений, делающих эту работу безопасной. Ощупывать и смазывать движущиеся детали механизмов следует очень внимательно и осторожно, протягивая к ним руку только по ходу детали, а ни в коем случае не

навстречу ее движению. Не допускается исправление и ремонт двигателей на ходу, в том числе подтягивание болтов на движущихся деталях.

При пуске в ход главного двигателя и вспомогательных механизмов необходимо предупреждать об этом лиц, находящихся вблизи движущихся частей механизмов. Нельзя оставлять ломик (если маховик двигателя проворачивается при помощи лома) в отверстиях обода маховика во избежание аварий или несчастных случаев при пуске.

Работы в картере двигателя могут быть начаты при следующих условиях: клапан пускового воздуха на двигателе должен быть закрыт; давление воздуха в пусковом трубопроводе понижено до атмосферного; подвод топлива к двигателю перекрыт; индикаторные краны на крышках рабочих цилиндров открыты; валоповоротное устройство выключено; на посту управления вывешена табличка с надписью «Не пускать! Ведутся работы».

Запрещается пользоваться открытым огнем при осмотре двигателя.

### **2.2.5 Техничко-экономические характеристики СЭУ с ДВС и возможности их повышения**

Дизельные установки имеют наибольшую экономичность по сравнению с ПТУ и ГТУ. Это достигнуто, как правило, их совершенствованием и часто за счет усложнения тепловой схемы и конструкции. Прежде всего, за счет введения глубокой утилизации теплоты выхлопных газов, охлаждающей воды, надувочного воздуха и смазочного масла.

ДВС имеют наиболее высокий КПД, который в лучших образцах достигает 50...54% в малооборотных и 48...52% в среднеоборотных дизелях. Но в них теряется значительное количество теплоты. Например, с выхлопными газами теряется от 28 до 40% теплоты, с охлаждающей пресной водой – от 10 до 14%, отбираемая от надувочного воздуха – от 7 до 10%, со смазочным маслом в узлах трения – от 4 до 7%, рассеивается в окружающую среду от 1,5 до 2% теплоты, полученной от сжигаемого топлива в цилиндрах двигателя.

Анализ тепловых балансов дизельных установок транспортных судов свидетельствует, что 80...85 % топлива затрачивается на получение механической энергии для движения судна, 8...12% - на производство электроэнергии, а остальные на выработку тепловой энергии во вспомогательных котельных установках. Ясно, что получение электрической и тепловой энергии не за счет сжигания топлива, а за счет утилизации теплоты рабочих сред установки является существенным резервом для повышения экономичности установки.

Следует иметь в виду, что утилизация тепловых потерь ограничивается температурами утилизируемых сред. Так, температура масла на выходе из двигателя не должна превышать 70...80°C, а охлаждающей воды – 75...90°C. Эти ограничения определяют возможные зоны утилизации тепловых потерь с маслом и водой.

Современные ДВС имеют высокое давление наддува (до 0,35...0,40 мПа), что повышает температуру воздуха за компрессором до 150...180°C. Потенциал теплоты надувочного воздуха можно использовать сполна для получения пара низких параметров (0,1...0,2 мПа) и подогрева тяжелого топлива. Наибольший потенциал имеет теплота выхлопных газов (260...350°C), что позволяет использовать ее для получения насыщенного или перегретого пара давлением до 1,5 мПа. В тоже время для современных ДВС (особенно малооборотных, обеспечивающих длительный ход) характерно снижение температуры выпускных газов, что значительно уменьшает возможности получения пара в утилизационном котле.

Опыт эксплуатации свидетельствует о высокой экономической эффективности систем утилизации вторичных энергоресурсов, так как генерируемого утилизационным котлом пара достаточно, чтобы при мощности 6...7МВт полностью удовлетворить все общесудовые потребности и исключить работу вспомогательного котла в ходовом режиме. Ресурсы теплоты выхлопных газов, сжатого воздуха, воды и масла называют вторичными потому, что главное предназначение ДВС – получение механической энергии (первичного ресурса). При более высоких мощностях главного двигателя появляется излишек пара, который после перегрева в утилизационном котле используется для привода утилизационного паротурбогенератора электростанции. Это позволяет полностью или частично заменить в ходовом режиме дизельгенератор. Такая утилизация теплоты получила название *глубокой*.

Однако наибольший эффект достигается при использовании *комплексной системы утилизации*, которая позволяет существенно сократить затраты насыщенного пара на общесудовые нужды и увеличить получение перегретого пара в утилизационном котле. С этой целью применяют трехсекционные охладители надувочного воздуха. Нагретая в *первой секции* пресная вода до температуры 100...150°C идет на подогрев тяжелого топлива в цистернах основного запаса и расходных, а также на обогрев судовых помещений. *Вторая секция* охладителя надувочного воздуха используется для подогрева питательной воды утилизационного котла, а *третья* – для охлаждения надувочного воздуха забортной водой.

Система охлаждения надувочного воздуха позволяет генерировать на 60...70% больше энергии по сравнению с системой утилизации только теплоты выхлопных газов. Это значительно расширяет диапазон эксплуатационных нагрузок на главный двигатель (практически до 50% от номинальной), при котором возможно полное удовлетворение потребностей в тепловой и электрической энергии на ходовом режиме исключительно за счет внутренних энергоресурсов.

При больших мощностях дизелей целесообразна глубокая утилизация теплоты, что позволяет удовлетворить все потребности в теплоте и электроэнергии, а также получать дополнительную механическую энергию и передавать ее на гребной вал. Для этого предусматривается силовая газовая утилизационная турбина, механическая энергия которой передается на гребной вал через

специальную передачу. Это позволяет повышать эффективный КПД дизеля на 55%, но существенно усложняет конструкцию установки.

Силовая газовая турбина может устанавливаться на всех больших и мощных дизелях фирмы «МАН-Бурмейстер и Вайн», типа МС МСЕ, а также фирмы «Зульцер» типа RTA.

### **Контрольные вопросы:**

1. Перечислите состав, изобразите различные схемы главной энергетической установки промышленных и транспортных судов: с прямой передачей, дизель редукторный агрегат с валогенератором и без.
2. Охарактеризуйте особенности поведения дизелей при пусках, реверсах, сбросах и набросах нагрузки. К чему может привести несоблюдение правил управления дизелями на этих режимах?
3. Поясните, какие характеристики называют скоростными и нагрузочными?
4. Изобразите винтовые характеристики дизелей, работающих на винты регулируемого и нерегулируемого шага. В чем их отличие?
5. Объясните, что такое «легкий» и «тяжелый» винты? Какие факторы способствуют утяжелению и облегчению винтовых характеристик?
6. Поясните понятия «тепловая и механическая напряженность дизеля». От чего они зависят?
7. Какие принципы заложены в основу регулирования и управления судовыми дизелями?

Литература [3, 4, 6, 8, 9]

### **Тема 2.3. Судовые котельные установки**

В процессе изучения темы следует познакомиться с основной терминологией, используемой в области судовых котельных установок, разобраться в принципиальной схеме котельной установки. Особое внимание следует уделить изучению факторов, влияющих на экономичность паровых котлов, а значит — на себестоимость производимого ими пара.

Основные вопросы темы:

- принцип действия и устройство водотрубного котла;
- принцип действия и устройство газотрубного и комбинированного котла;
- состав и схема котельной установки, системы и механизмы, обслуживающие котлы, и их взаимодействие;
- основные параметры и классификация паровых котлов;
- требования Морского Регистра Судоходства к паровым котлам и котельным установкам в целом.

### 2.3.1 Общие сведения о паровых котлах

**Судовая котельная установка.** Для привода в действие главных машин или турбин, для отопления, бытовых нужд и технологических целей на теплоходах используется пар, вырабатываемый судовой котельной установкой.

Принципиальная схема котельной установки изображена на рисунке 2.19.

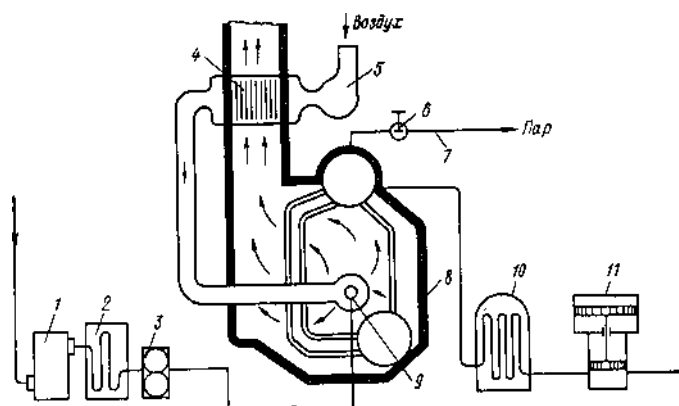


Рисунок 2.19 - Схема котельной установки

Установка состоит из парового котла 8 и вспомогательных механизмов и агрегатов, которые подают в котел питательную воду, топливо и воздух. Питательная вода в водяное пространство котла нагнетается насосом 11 через подогреватель 10. Жидкое топливо (мазут) насосом 1 через подогреватель 2 и топливный фильтр 3 подается к форсунке 9.

Воздух засасывается вентилятором 5 и через подогреватель 4, установленный в дымовой трубе, нагнетается в топку. В топке котла распыленный форсункой мазут, смешиваясь с воздухом, сгорает и образующаяся при этом теплота идет на нагрев воды, из которой получается пар. При открытом клапане 6 пар отводится к потребителям по трубопроводу 7.

Подогрев питательной воды и топлива в подогревателях 2 к 10 теплотой отработавшего пара и подогрев воздуха в подогревателе 4 теплотой отводимых газов повышает экономичность работы котельной установки, так как на подогрев топлива и воздуха перед сгоранием в топке и на получение пара из предварительно подогретой воды расходуется меньше теплоты, а следовательно, и топлива.

#### **Схема устройства и принцип действия парового котла.**

Паровой котел — это теплообменный аппарат, в котором происходит превращение воды в пар с давлением выше атмосферного за счет теплоты сгорающего топлива. Рассмотрим принцип действия его на примере водотрубного котла (рисунок 2.20). Он представляет собой два цилиндрических барабана (коллектора) У, заполненных водой, которые пучками водогрейных труб 2 соединены с верхним пароводяным коллектором 5. Пространство котла, занимаемое водой (нижние коллекторы, трубки и часть верхнего коллектора), называется водяным пространством, а занимаемое паром (другая часть верхнего коллектора)—паровым пространством. Поверхность, разделяющая водяное и паровое пространства, называется зеркалом испарения.

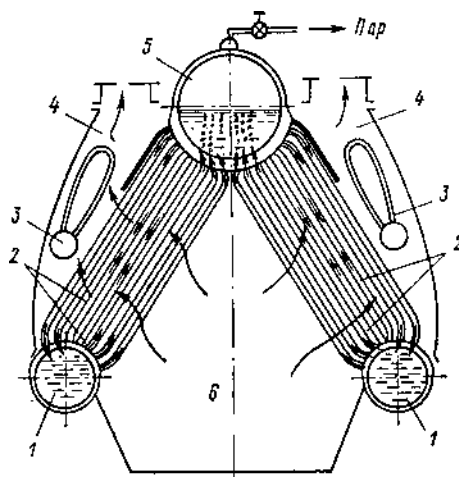


Рисунок 2.20 - Схема двухпроточного водотрубного котла.

Горячие газы образуются при сгорании мазута в топке 6 и, двигаясь к газоходам 4, служащим для направления потока газов, пересекают пучки водогрейных трубок. Первые ряды трубок, расположенные ближе к топке, воспринимают больше теплоты, чем трубки последних рядов.

Поэтому в первых рядах трубок за один и тот же промежуток времени образуется больше пара, чем в трубках, расположенных дальше от зоны горения.

Так как пар в несколько сот раз легче воды, занимающей тот же объем, то удельная масса пароводяной смеси в первых рядах трубок меньше, чем в последних рядах.

Следовательно, в течение всего времени работы котла в его трубках происходит непрерывное движение воды и пароводяной смеси, направленное вверх в трубках первых рядов котла и вниз в трубках последних рядов. Это движение воды внутри котла, вызываемое неодинаковым нагревом трубок, называется естественной циркуляцией воды в котле.

Трубки котла, по которым вода и пароводяная смесь поднимаются вверх, называются подъемными, а трубки, по которым вода опускается, — опускными. Пар из подъемных трубок попадает в пароводяной коллектор, проходит толщу воды, всплывает на поверхность зеркала испарения и собирается над поверхностью воды в паровом пространстве. Так образуется насыщенный пар, который может быть использован для санитарно-бытовых и технологических нужд. Для получения перегретого пара, необходимого для привода паровых машин и турбин, насыщенный пар из пароводяного коллектора подается в пароперегреватели 5, расположенные в газоходах, где он осушается и превращается в перегретый пар за счет теплоты горячих дымовых газов.

Рассмотренный котел является водотрубным симметричным двухпроточным котлом шатрового типа.

### **Основные характеристики паровых котлов.**

Работу всякого котла характеризуют следующие основные данные: поверхность нагрева, паропроизводительность, удельный паросъем, параметры пара, коэффициент полезного действия.

Поверхность нагрева — это поверхность всех металлических стенок котла, которая с одной стороны обогревается пламенем горящего топлива и дымовыми газами, а с другой стороны омывается водой. Поверхность нагрева позволяет судить о размерах котла. Она обозначается буквой  $H$  и измеряется в квадратных метрах ( $\text{м}^2$ ) со стороны, омываемой газами. Поверхность нагрева современных главных судовых котлов составляет примерно  $500\text{—}1000\text{ м}^2$ , вспомогательных —  $10\text{—}100\text{ м}^2$ .

Паропроизводительность котла — это количество пара, производимое котлом в единицу времени при заданных параметрах пара; обозначается она буквой  $D$  и измеряется в т/ч или кг/с. Паропроизводительность главных судовых котлов составляет  $5,0\text{--}60\text{ т/ч}$ , вспомогательных  $0,5\text{—}12\text{ т/ч}$ .

Удельный паросъем котла представляет собой количество пара, получаемого с  $1\text{ м}^2$  поверхности нагрева в единицу времени:

$$d = \frac{D}{H} \text{ т/}(\text{м}^2 \cdot \text{ч}) \text{ или кг/}(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Удельный паросъем характеризует интенсивность работы котла. На современных судах с каждого квадратного метра поверхности нагрева котла снимается до  $60\text{ кг}$  пара в час.

К параметрам пара относятся рабочее давление  $p$  (МПа, кгс/см<sup>2</sup>) и температура  $t$  (°С). Состояние перегретого пара определяют два параметра — давление и температура, а насыщенного — давление и степень сухости или влажности.

В установках с паровыми машинами применяется пар с избыточным давлением  $1,5\text{—}2\text{ МПа}$  ( $15\text{—}20\text{ кгс/см}^2$ ) и температурой  $300\text{—}370^\circ\text{С}$ . Современные судовые котельные установки, дающие пар для паровых турбин, работают при параметрах пара  $3,0\text{--}3,4\text{ МПа}$  ( $30\text{—}45\text{ кгс/см}^2$ ) и  $475\text{—}500^\circ\text{С}$ .

Коэффициент полезного действия (к. п. д.) парового котла является основной качественной характеристикой, отражающей экономичность работы котла. Он представляет собой отношение теплоты, использованной в котле для получения пара, ко всему количеству теплоты, выделившейся при сгорании топлива в топке. Для судовых котлов к. п. д. составляет  $0,75\text{—}0,93$ . Это значит, что  $75\text{—}93\%$  теплоты идет на создание пара в котле, а  $25\text{—}7\%$  теряется с уходящими газами и излучается в окружающую среду.

### **Классификация паровых котлов.**

Судовые паровые котлы можно классифицировать по ряду признаков:

- по назначению — главные паровые котлы, вырабатывающие пар, используемый в главных машинах или турбинах; вспомогательные, устанавливаемые на судне для вспомогательных и технологических целей (отопление судна, душевых, обогрев судовых систем, обработка рыбы в рыбомучных и жиромучных установках и т. д.);

- по конструкции — водотрубные, огнетрубные, комбинированные. В водотрубных котлах (см. рисунок 26) горячие газы омывают наружные поверхности труб, вода же находится в трубах; в огнетрубных котлах горячие газы проходят внутри труб, а вода омывает их снаружи. Комбинированные котлы соединяют в себе отдельные элементы водотрубных и огнетрубных котлов;

- по роду используемого топлива — котлы, работающие на жидком (мазут) и твердом (каменный уголь) топливе. В настоящее время главные судовые котлы в основном работают на мазуте; вспомогательные котлы работают либо на мазуте, либо используют отходящие газы двигателей внутреннего сгорания (утилизационные котлы);

- по типу циркуляции воды и пароводяной смеси — котлы с естественной циркуляцией (см. рисунок 26) и котлы с принудительной циркуляцией, у которых движение воды по трубкам создается насосом;

- по виду тяги — котлы с искусственной тягой, у которых непрерывная подача воздуха в топку котла и удаление продуктов сгорания осуществляется с помощью котельного вентилятора, и котлы с естественной тягой, у которых тяга осуществляется с помощью дымовой трубы.

### 2.3.2 Конструкции судовых паровых котлов

#### Водотрубные котлы.

В водотрубных котлах вода циркулирует внутри водогрейных труб, омываемых горячими газами. Водотрубные котлы подразделяются на вертикально-водотрубные (барабанные), у которых водогрейные трубки наклонены под углом более  $30^\circ$ , и горизонтально-водотрубные (секционные) с наклоном трубок менее  $30^\circ$ .

Рассмотренный ранее (см. рисунок 25) вертикально-водотрубный трехбарабанный двупроточный котел имеет серьезный недостаток: в нем нельзя получить высокие параметры пара [давление свыше 5 МПа (50 атм)] при достаточной производительности. Это объясняется тем, что газы, выходя через два газохода, имеют сравнительно невысокую скорость, а следовательно, в единицу времени не могут передать водогрейным трубкам большое количество теплоты.

На современных морских судах получили распространение барабанные однопроточные экранированные котлы с развитой хвостовой частью. Они могут быть построены для работы при высоких давлениях пара — до 10—12 МПа (100—120 кгс/см<sup>2</sup>).

Принципиальная схема и внешний вид корпуса такого котла представлены на рисунке 2.21.

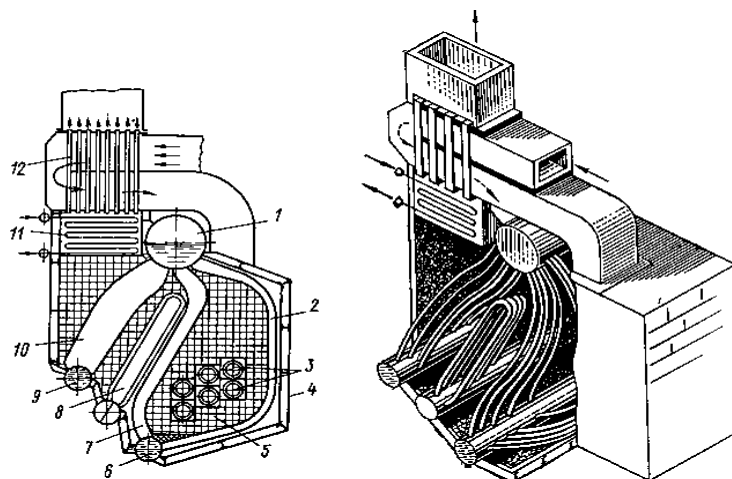


Рисунок 2.21 - Однопроточный водотрубный котел.



Котел состоит из пароводяного барабана 1 и водяных барабанов 6 и 9. Барабаны соединены пучками водогрейных труб 10, 7 и 2. Трубки пучка 10 обогреваются за счет теплопередачи конвекцией (соприкосновения с горячими движущимися газами); притопочный пучок трубок 7 воспринимает теплоту и конвекцией и излучением, а пучок 2 — только излучением. Этот ряд трубок 2, проходящий вдоль пола и боковой стенки котла, называется экраном. Экран предохраняет стенки котла от разрушения пламенем топки и создает дополнительную поверхность нагрева. Во всех пучках трубок происходит подъем пароводяной смеси. Спуск воды в водяные барабаны осуществляется по необогреваемым трубам 4, расположенным за пределами обшивки котла.

Между конвективным пучком 10 и притопочным 7 размещен пароперегреватель 8, состоящий из барабана и петлевого пучка труб.

Питательная вода, прежде чем попасть в пароводяной барабан, подогревается горячими газами в змеевиковом экономайзере 11. На переднем фронте топки 5 котла имеются фурмы для шести форсунок 3. Необходимый для горения воздух, нагнетаемый вентилятором, проходит через воздухоподогреватель 12, откуда поступает на передний фронт котла, а затем к воздухонаправляющим устройствам форсунок.

Управление горением топлива, питанием котла и регулирование температуры перегретого пара в современных котельных установках осуществляются автоматически.

Наличие одного газохода, обеспечивающего высокую скорость газов, развитая хвостовая часть (экономайзер, воздухоподогреватель), экранирование топки, спуск воды по необогреваемым трубам позволяют получить к. п. д. таких котлов до 93%,.

Барабанные котлы отличаются высокой надежностью в эксплуатации. Котлы такого типа установлены на плавбазе «Восток».

На рисунке 2.22 показана схема секционного водотрубного котла.

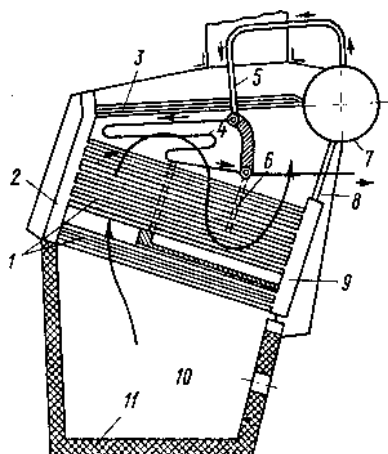


Рисунок 2.22 - Схема секционного водотрубного котла

Поверхность нагрева такого котла образована водогрейными трубами, расположенными под углом 15—25° к горизонтальной оси. Водогрейные трубы обоими концами завальцованы в передние 9 и задние 2 камеры, имеющие коромысловую форму.

Передняя и задняя камеры с развальцованными в них трубками образуют секцию котла.

Вода для питания котла подается в верхний пароводяной барабан 7 и по соединительным патрубкам 8 опускается к передним камерам 9, а затем по водогрейным трубам 1 движется к задним камерам 2, испаряясь в пути. Образовавшаяся в трубах пароводяная смесь по задним камерам поднимается вверх и по горизонтальным соединительным трубам 3 идет в барабан 7. Из барабана пар по трубопроводу 5 поступает в пароперегреватель 4, откуда направляется в паровую машину или турбину. Для лучшей циркуляции воды и облегчения выхода образующихся пузырьков пара секции сделаны наклонными. Для увеличения скорости протекания газов, что усиливает интенсивность теплоотдачи, ставят перегородки 6. Стенки топки 10 котла выкладывают изнутри огнеупорным кирпичом 11.

Секционные котлы изготавливают на давление пара до 4,5—5 МПа (45—50 кгс/см<sup>2</sup>). На рыбопромысловом флоте такие котлы установлены в качестве главных на сельдебазах типа «Северодвинск» и других паровых судах старой постройки.

Недостатком секционных котлов по сравнению с другими водотрубными является большая масса вследствие наличия массивных камер.

### Огнетрубные котлы.

На паровых траулерах и других судах флота рыбной промышленности старой постройки до сих пор встречается значительное количество огнетрубных котлов. Такие котлы отличаются большим сроком службы (до 30—40 лет). Поэтому, несмотря на то, что в последнее время их перестали устанавливать на судах в качестве главных, они будут встречаться на флоте еще ряд лет. Огнетрубные котлы могут быть пролетными и оборотными.

Пролетные котлы имеют прямой ход газа; на морских судах они не применяются.

На рисунке 2.23 представлена схема огнетрубного однопроточного оборотного котла.

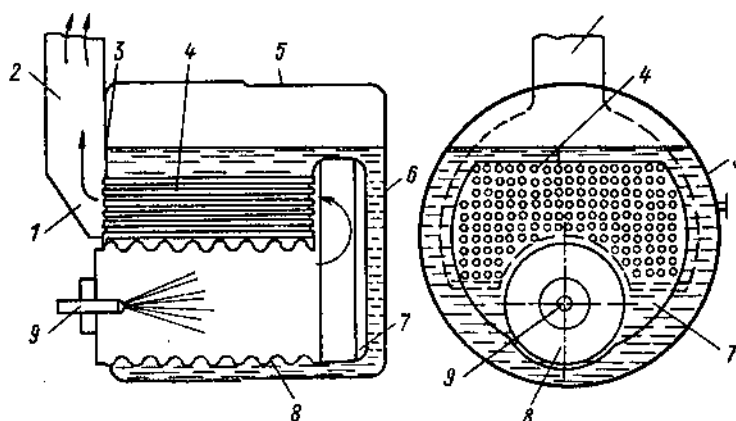


Рисунок 2.23 - Схема огнетрубного котла.

Котел состоит из бочки 5, к которой приклепывают или приваривают переднее днище 3 и заднее 6. Внутри бочки размещена огневая камера 7. К переднему днищу котла и к передней стенке огневой камеры присоединена жаровая труба 8, внутренняя полость которой представляет собой топку котла. Жаровые трубы имеют диаметр от 700 до 1200 мм. Они подвергаются давлению

снаружи, поэтому во избежание сплющивания их делают волнистыми. Над жаровой трубой расположены дымогарные трубы 4, концы которых завальцованы в переднее днище котла и переднюю стенку огневой камеры. Бочка котла заполнена водой так, что водой омываются дымогарные трубы, огневая камера и жаровая труба.

Топливо в топку подается через форсунку 9. Горячие газы из топки попадают в огневую камеру, откуда через дымогарные трубы, сделав оборот,— в дымовую коробку 1 и далее в дымовую трубу 2.

Огнетрубные оборотные котлы просты в обслуживании. Основными недостатками огнетрубных котлов являются: большая масса; нецелесообразность использования их на давлениях свыше 2,0 МПа (16 кгс/см<sup>2</sup>), так как при этом значительно увеличивается толщина стенок; низкая паропроизводительность (до 6,5 т/ч); низкий к. п. д. (70-75%).

### **Комбинированные котлы.**

С целью улучшения циркуляции в огнетрубных котлах, уменьшения их массы и повышения удельного паросъема были сконструированы котлы, работающие по смешанному принципу, т. е. содержащие элементы как огнетрубных, так и водотрубных котлов. Комбинированные котлы по устройству сходны с огнетрубными и отличаются от них наличием дополнительной приставной огневой камеры, внутри которой размещены барабаны, заполненные водой, и водогрейные трубы.

Комбинированные котлы успешно работают на некоторых наших паровых рыболовных траулерах старой постройки. Но в связи с тем, что у этих котлов сохранились основные недостатки, присущие огнетрубным, в настоящее время новых комбинированных котлов не строят.

### **Вспомогательные и утилизационные котлы.**

На паровых промысловых и транспортных судах вспомогательные котлы устанавливают редко, так как пар для бытовых нужд и для работы вспомогательных механизмов обычно отбирается от главных котлов и пропускается через устройство, снижающее давление и температуру пара.

На теплоходах установка вспомогательного котла является неизбежной. При этом для производства пара на ряде судов используется теплота отходящих газов двигателей внутреннего сгорания, имеющих температуру 300—500° С. Котлы, в которых пар получают таким образом, названы утилизационными. В связи с тем, что утилизационные котлы могут вырабатывать пар только тогда, когда работают главные двигатели, вспомогательный и утилизационный котлы иногда объединяют в единую конструкцию.

Насчитывается большое количество различных систем вспомогательных и утилизационных котлов.

В качестве вспомогательных используют обыкновенные водотрубные и огнетрубные котлы малой производительности, конструкция которых более проста благодаря отсутствию пароперегревателей, а зачастую и хвостовых поверхностей нагрева. Давление пара во вспомогательных котлах, обычно не превышает 1,2 МПа (12 кгс/см<sup>2</sup>). При этом часто котлы работают на том же топливе, что и двигатели

внутреннего сгорания; это исключает необходимость иметь на судне два вида топлива.

В качестве вспомогательных наиболее широкое распространение на промышленном флоте получили водотрубные котлы однопроточного типа. Типовая конструкция такого КВВА (котел вспомогательный водотрубный автоматизированный) отечественной постройки показана на рисунке 2.24, *а*. Котел имеет пароводяной барабан 1 и водяной барабан 5. Поверхность нагрева состоит из водогрейных трубок основного пучка 6 и трубок бокового экрана 2. Топка котла оборудована двумя форсунками 3. Необходимый для сгорания топлива воздух предварительно подогревается в воздушном кожухе 4, что способствует уменьшению массы котла благодаря сокращению толщины кирпичной кладки и снижает потери теплоты в окружающую среду.

Котлы КВВА имеют паропроизводительность 1—7,5 т/ч. К. п. д. котлов лежит в пределах 74—82%; низкие значения к. п. д. объясняются отсутствием дополнительных поверхностей нагрева.

На рисунке 2.24, *б* представлен вспомогательный водотрубный котел КВЦ (котел вертикальный цилиндрический), устанавливаемый на средних рыболовных траулерах. В цилиндрическом разъемном корпусе 5 закреплен барабан 3, в нижней части которого размещается топка, а в верхней — несколько рядов водогрейных трубок 4. Верхняя часть барабана — выпуклая, к потолку приварен цилиндр 2. Он проходит через верхнее днище корпуса котла и служит основанием для дымовой трубы. Вода заполняет пространство между корпусом и барабаном и внутреннее пространство водогрейных трубок.

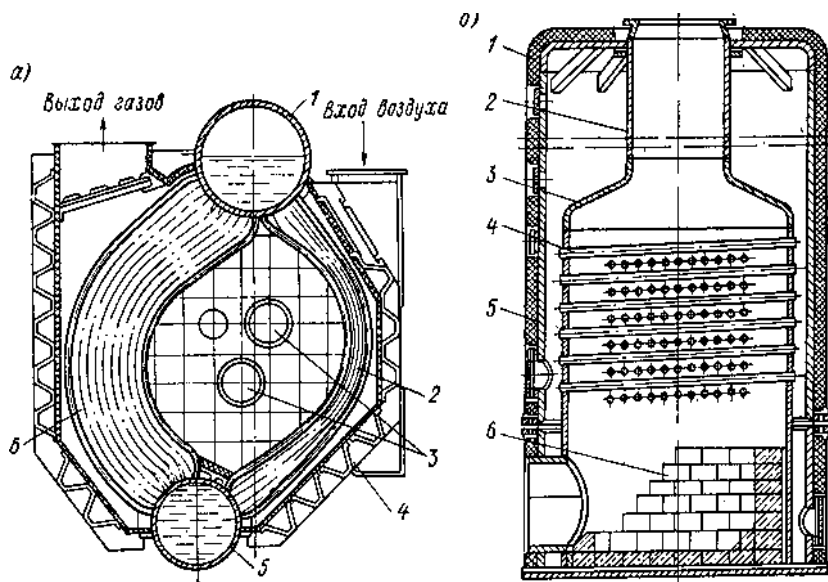


Рисунок 2.24 - Вспомогательные водотрубные котлы:  
*а* — двухбарабанный; *б* — цилиндрический.

Для обеспечения лучшей циркуляции водогрейные трубки выполнены с небольшим уклоном (примерно 10°). Полость между верхней частью корпуса котла и цилиндром 2 образует паровое пространство. Футеровка 6 топки выполнена из

огнеупорного кирпича. Снаружи корпус котла покрывают слоем изоляции и окрашивают.

На БМРТ типа «Пушкин» и транспортных рефрижераторах типов «Яна», «Светлогорск» в качестве вспомогательных установлены огнетрубные котлы. По устройству они отличаются от котла, изображенного на рисунке 28, лишь количеством паровых труб.

На СРТМ типа «Маяк», малых рыболовных траулерах и ряде других судов используются вспомогательные огнетрубные котлы вертикального типа марок КОВ (котел огнетрубный вертикальный). Корпус такого котла установлен вертикально, в нижней его части размещена топка, а в верхней — вертикальные дымогарные трубки. При наличии у этих котлов средств автоматики им присваивается марка КОВА.

Утилизационные котлы также могут быть огнетрубными и водотрубными, причем огнетрубные котлы имеют естественную циркуляцию, а водотрубные, как правило, выполняются с искусственной циркуляцией. Огнетрубные котлы в качестве утилизационных используются сравнительно редко. Наиболее широко распространенный водотрубный утилизационный котел КУП (котел утилизационный паровой) представляет собой ряд спиральных змеевиков, размещенных в выпускных трактах двигателей, по которым насосом прокачивается вода.

Иногда утилизационный змеевиковый котел с искусственной циркуляцией и вспомогательный котел имеют общую пароводяную магистраль. Схема такой котельной установки показана на рисунке 2.25.

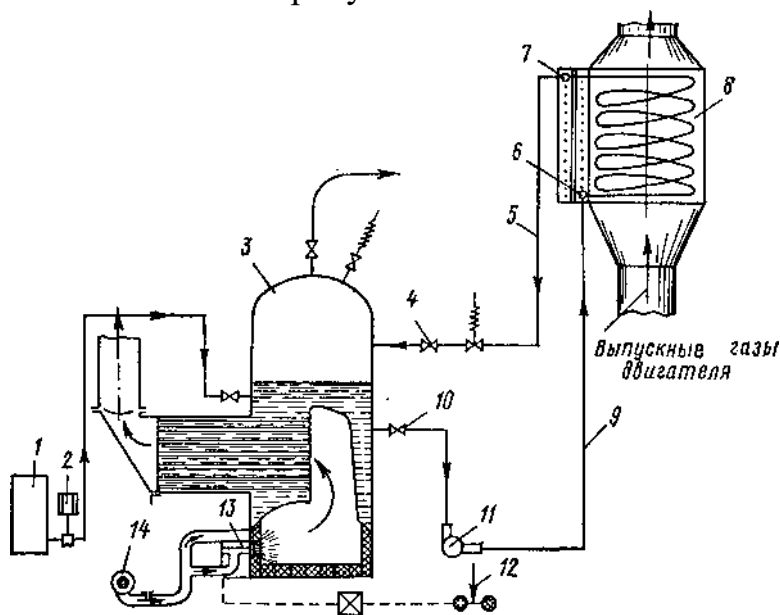


Рисунок 2.25 - Схема включения вспомогательного и утилизационного паровых котлов

В этом случае вспомогательный огнетрубный котел 3 и утилизационный котел со змеевиками 8 соединяются водяной 9 и пароводяной 5 магистралями.

На стоянке, когда главные двигатели не работают, закрываются клапаны 4 и 10, в результате чего утилизационный котел разобщается от вспомогательного. Необходимое количество пара обеспечивается сжиганием топлива в топке котла 3.

Для этого предусмотрена одна форсунка 13, топливо к которой подается по трубопроводу 12. Воздух в топку нагнетается электроприводным вентилятором 14. Питательная вода из теплого ящика 1 подается в котел насосом 2.

На ходовом режиме, когда работают главные двигатели, выключают форсунку 13, в результате чего вспомогательный котел прекращает работу. Открываются клапаны 4 и 10 и включается циркуляционный насос И, который подает воду из вспомогательного котла в приемный коллектор утилизационного котла. Пароводяная смесь, образующаяся в рядах спиральных змеевиков 8, отводится из коллектора 7 в паровое пространство котла 3. Таким образом, пар к потребителю подается только из котла 3 как при работе вспомогательного, так и при работе утилизационного котла. Требуемый уровень воды в котле 3 обеспечивается регулированием производительности питательного насоса 2. Включение по такой схеме вспомогательного и утилизационного котлов осуществлено на БКРТ «Наталья Ковшова», ТР типа «Ветер» и тунцеловной базе «Ленинский луч».

На добывающих судах с прямой передачей мощности на гребной винт энергетическая установка длительное время работает на переменных и долевых режимах, и поэтому применять утилизационные котлы на таких судах неэффективно.

### **2.3.3 Арматура котлов**

Приборы, установленные на котле и предназначенные для его обслуживания и контроля за его работой, называются арматурой. Различают арматуру парового и водяного пространства.

К арматуре парового пространства относятся манометры, предохранительные и главные стопорные клапаны, воздушные краны, к арматуре водяного пространства — водоуказательные стекла, пробные краны, краны верхнего и нижнего продувания, кран для определения солености котловой воды.

Размещение арматуры на вспомогательном огнетрубном котле показано на рисунке 2.26.

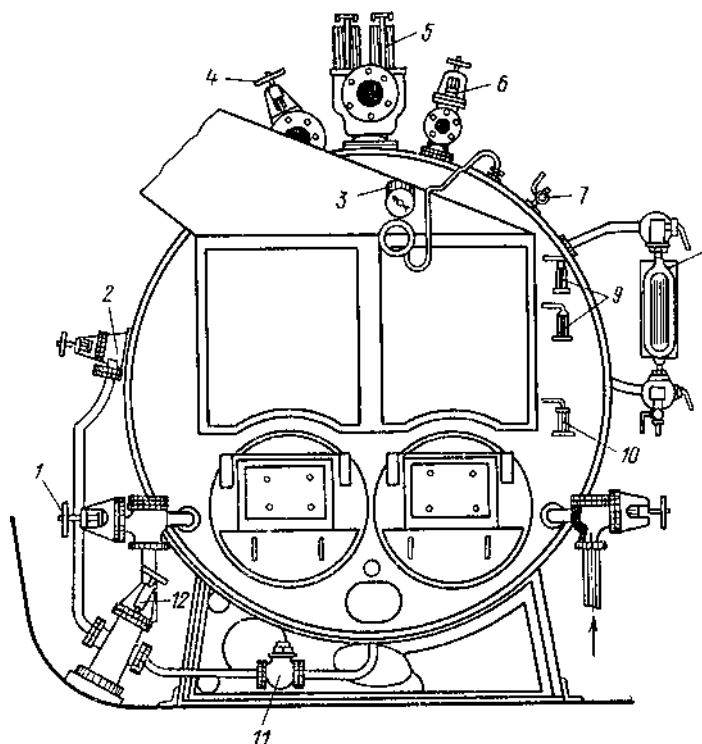


Рисунок 2.26 - Расположение арматуры на огнетрубном котле

Манометр 3 служит для измерения давления пара в котле. На шкале манометра имеется красная черта, выше которой поднимать давление пара запрещается. Предохранительные клапаны 5 предотвращают превышение нормы давления пара в котле. При повышении давления предохранительные клапаны срабатывают (приоткрываются) и стравливают часть пара до тех пор, пока давление не станет нормальным.

Главные стопорные клапаны 4 и 6 служат для сообщения и разобщения котла с паропроводом. Кроме обычного закрытия маховиком предусмотрено дистанционное закрытие (открытие) клапанов.

Воздушный кран 7 используется для выпуска воздуха из котла в период подъема пара и при проведении гидравлических испытаний. Эти краны устанавливаются в верхних точках котла.

Водоуказательный прибор (водомерное стекло) 8 служит для определения уровня воды в котле. Он представляет собой водомерное стекло, закрепленное в угловых штуцерах. Верхняя часть прибора патрубком сообщается с паровым пространством, нижняя — с водяным. Прибор работает по принципу сообщающихся сосудов. Штуцера имеют краны, с помощью которых стекло отключается от котла и может быть продуто при засорении. Водомерные стекла снабжены указательными стрелками низшего, нормального и высшего уровней воды в котле. Как правило, на котле устанавливают два водоуказательных прибора, причем на видимой и хорошо освещенной стороне.

Пробные краны 9 предназначены для определения уровня воды в котле в случае выхода из строя водоуказательных приборов. На каждом котле установлено

два-три пробных крана, нижний из которых должен находиться на низшем допустимом уровне воды, а последующие соответственно на 100 и 200 мм выше нижнего.

Клапан верхнего продувания 2 соединен трубопроводом, размещенным внутри котла, с воронкой, горловина которой находится на уровне поверхности зеркала воды. Через воронку при открытом кране удаляют с поверхности испарения грязь и масло, попадающие в котел с питательной водой. Эта операция называется верхним продуванием котла. Уровень установки воронки отмечен чертой на корпусе котла.

Клапан нижнего продувания 11 предназначен для удаления из котла грязи и шлама, которые осаждаются в нижней части водяного пространства, а также для полного осушения котла.

Трубопроводы нижнего и верхнего продувания выводятся в кингстон продувания 12.

Питательные клапаны 1 соединены с насосом и служат для питания котла водой. На каждом котле для надежности устанавливают по два питательных клапана. Клапаны обычно изготавливаются невозвратными, благодаря чему при остановке питательного насоса предотвращается выход воды из котла.

Кран солёности 10 служит для отбора пробной воды с целью определения ее качества (на содержание солей). Для отбора воды можно пользоваться пробными кранами и кранами продувания на водоуказательных приборах.

### **2.3.4 Основы автоматического регулирования котлов**

В работающем паровом котле необходимо регулировать количество подаваемого топлива, воздуха и питательной воды в зависимости от изменения расхода пара, уровня воды в котле и давления пара. Современные паровые котлы оборудованы системами автоматического регулирования.

В систему автоматического регулирования парового котла входят:

- прибор, реагирующий на изменение какого-либо параметра: так называемый чувствительный элемент, или датчик;
- устройство для передачи импульса от датчика к исполнительному или регулирующему органу (зачастую импульс усиливается посторонним источником энергии — специальным усилителем);
- исполнительный или регулирующий орган, изменяющий режим горения топлива или питания котла водой.

Чаще всего усилители конструктивно бывают выполнены заодно с исполнительными механизмами, которые называются сервомоторами.

Все вспомогательные котельные установки промысловых судов последних лет постройки оборудованы средствами автоматизации процессов питания и горения.

На некоторых судах предусмотрена еще автоматическая защита, т. е. отключение котельной установки, когда некоторые параметры становятся предельными. Например, на БКРТ типа «Наталья Ковшова» имеется защита, отключающая котел при превышении предельного давления пара, предельного



уровня воды, при отсутствии воздуха, срыве факела в топке и исчезновении напряжения в сети автоматики.

Чувствительные элементы (датчики) в системах автоматического регулирования и защиты реагируют на изменение уровня, давления, температуры и других параметров.

На рисунке 2.27 показаны некоторые виды датчиков. В схеме чувствительного поплавкового элемента уровня (рисунок 2.27, *а*) поплавков *1* выполняют в виде пустотелого шаровидного тела. Своими патрубками датчик соединен с барабаном котла. При изменении уровня воды в котле перемещается стержень *2*, который через сервомотор открывает или закрывает клапан, расположенный на питательной магистрали.

На рисунке 2.27, *б* показана схема мембранного чувствительного элемента давления. Мембрана *3* представляет собой диск из эластичного материала, зажатый по окружности между половинками корпуса *б*. В средней части мембрана зажата между двумя алюминиевыми дисками *5*, к которым крепится подвижный шток *2*. Полость Л, соединенная с паровым пространством котла, герметична, а усилие давления на мембрану уравнивается пружиной *1*. Во избежание провисания и перекосов диски подвешены на нити *4*, которая компенсирует вес подвижных частей мембран.

Такие датчики используются в системах автоматического регулирования горения и автоматической защиты по предельному давлению пара.

Регулирование горения производится следующим образом. Предположим, что давление пара в котле снизилось. Мембрана в этом случае переместится вправо, а шток *2* воздействует на два клапана, один из которых увеличит подачу мазута к форсунке, а другой увеличит подачу пара к турбине, вращающей котельный вентилятор. В результате в котел будет поступать больше топлива и воздуха. Горение станет более интенсивным, давление пара возрастет.

Чувствительный элемент датчика температуры сильфонного типа изображен на рисунке 2.27, *в*. Датчики такого типа устанавливают, например, в системах автоматического регулирования температуры мазута.

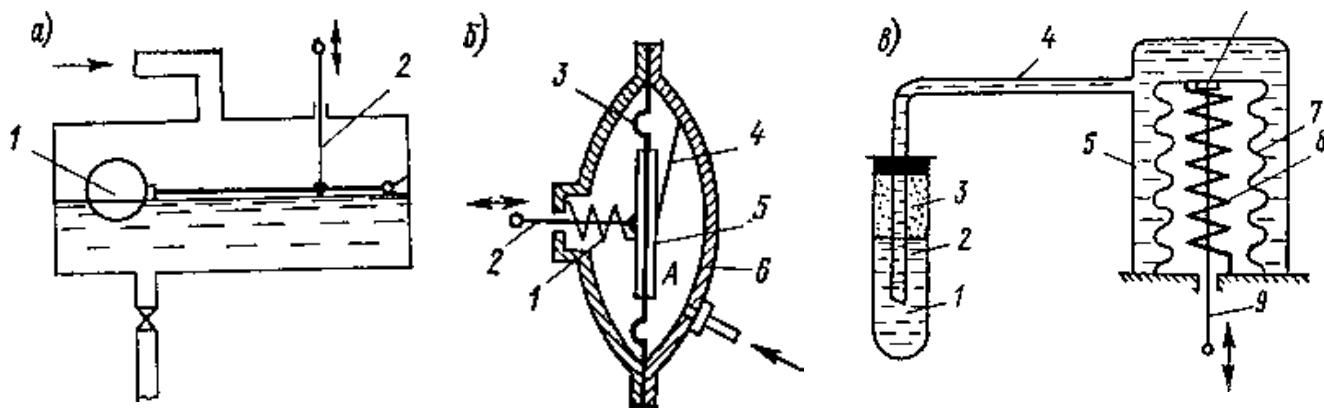


Рисунок 2.27 - Схемы чувствительных элементов приборов сигнализации:  
*а* — поплавкового типа; *б* — мембранного типа; *в* — сильфонного типа.

Термобаллон *1*, заполненный определенным количеством легкоиспаряющейся жидкости *2*, помещается в мазут. Над уровнем жидкости в

термобаллоне всегда имеется паровое пространство 3. При повышении температуры мазута давление в термобаллоне увеличивается. Увеличение давления по капиллярной трубке 4 передается в полость под кожухом 5. В результате подвижный торец 6 сильфона 7 перемещается вниз, а шток 9 воздействует на клапан, установленный в паровой магистрали подогревателя. Вследствие этого начинает уменьшаться количество пара, отводимого на подогреватель, и температура мазута понижается. При падении температуры мазута ниже нормы шток перемещается в исходное положение под действием пружины 8.

Датчиком в системах автоматической защиты по срыву факела в топке является фотоэлемент.

### 2.3.5 Гарнитура котла

Для обеспечения безопасной работы котлов на них оборудуется ряд устройств, которые обычно называют гарнитурой котла. К гарнитуре котла относятся следующие устройства.

1. Предохранительные клапаны. На котле устанавливают два предохранительных клапана, которые препятствуют повышению давления в котле. После того как в присутствии ответственного лица будет установлено давление срабатывания клапана, его пломбируют. Изменять самостоятельно давление срабатывания клапана запрещается. Клапан открывается автоматически, если давление достигает определенного установленного значения.

2. Главный стопорный клапан. Этот клапан обычно невозвратного типа, устанавливается на главном паропроводе.

3. Вспомогательный стопорный клапан. Устанавливается на вспомогательном трубопроводе. Клапан меньшего размера, как правило, невозвратный.

4. Питательный клапан. Обычно устанавливают два питательных клапана: один — главный, другой — вспомогательный, или резервный. По конструкции клапан невозвратный, он должен быть снабжен указателем открытого и закрытого положения.

5. Водомерное стекло. Обычно устанавливают два водомерных стекла по обе стороны котла. Конструкция стекол зависит от расчетного давления котла.

6. Манометровые штуцера. Там, где это необходимо, на паровом коллекторе, пароперегревателе и в других местах, устанавливают манометры для контроля давления.

7. Воздушные краны. Их устанавливают на паровых коллекторах и в других частях котла для выпуска воздуха из водяной полости при заполнении котла водой и при первом пуске котла.

8. Арматура для взятия проб. На питательном трубопроводе устанавливают кран отбора с охлаждающим устройством для взятия проб воды и ее анализа. Конструкция крана может предусматривать возможность ввода в питательный трубопровод различных химических добавок.

9. Клапан продувки котла. С помощью этого клапана обеспечивается продувка или спуск воды из котла. Клапан может использоваться для частичного и

для полного осушения котла.

10. Стопорный клапан свистка. Это небольшой невозвратный клапан на трубопроводе от парового коллектора котла к паровому свистку.

### **Гарнитура водотрубных котлов.**

На водотрубных котлах, в связи с тем, что в них имеется меньшее количество воды по отношению к производимому пару, требуется установка некоторых следующих дополнительных устройств.

1. Автоматический регулятор питательной воды. Его устанавливают до главного питательного клапана. Служит для обеспечения постоянного уровня воды в котле независимо от расхода пара. В котлах с высокой интенсивностью парообразования используется многоимпульсная система регулирования подачи воды в котел (см. гл. 15).

2. Сигнализатор минимального уровня. Это устройство, подающее звуковой сигнал при снижении уровня воды до минимального.

3. Перепускной клапан пароперегревателя. Через него проходит пар при разжигании котла и повышении давления пара в котле.

4. Сажеобдувочное устройство. Применяется для удаления сажи и других продуктов сгорания с поверхности трубок. Работает на паре или сжатом воздухе. Несколько таких устройств монтируется в наиболее важных частях котла. Затем их включают в работу, выдувают сажу. После работы сажеобдувочные приспособления вынимают.

### **Водомерные стекла.**

По водомерному стеклу можно визуально наблюдать за уровнем воды в котле, если этот уровень в пределах нормы. Если уровень воды в котле резко повысится, вода может попасть в паропровод и серьезно повредить механизмы, работающие на паре. Если уровень воды в котле понизится, то теплопередающие поверхности, оказавшиеся без воды, могут выйти из строя. Поэтому важно постоянно следить за уровнем воды в котле. Так как судно подвержено качке, необходимо для правильного суждения об уровне воды в котле иметь два водомерных стекла с обеих сторон котла.

В зависимости от значения давления в котле существуют водомерные стекла двух различных типов. При давлении до 1,7 МПа в котлах применяют водомерное стекло с круглой стеклянной трубкой. Такое стекло при помощи штуцеров, на которых стоят краны, крепится на корпусе котла (рисунок 2.28).

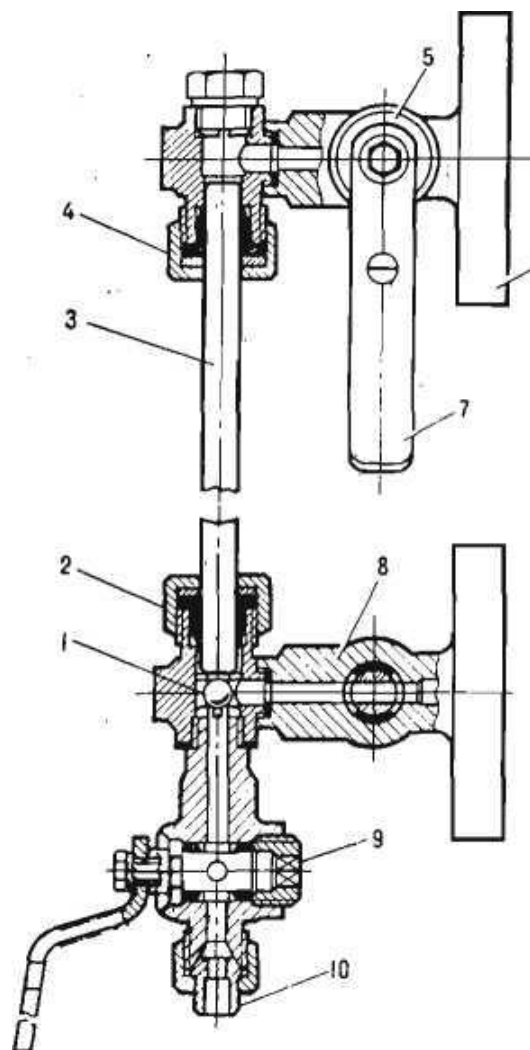


Рисунок 2.28 - Водомерное стекло со стеклянной трубкой:

1- шариковый клапан; 2 — гайка; 3 — стеклянная трубка; 4—уплотнительное устройство; 5 — паровой кран; 6 — фланец для присоединения к корпусу котла; 7 — рукоятка крана; 8 — водяной кран; 9 — спускной кран; 10 — трубка спуска в трюм

Для уплотнения мест присоединения и предотвращения утечки устанавливают уплотнительные кольца. Обычно вокруг трубки помещают кожух, защищающий стекло от случайных повреждений, а также обслуживающий персонал от возможных травм при повреждении стекла. На трубках, ведущих в паровое и водяное пространство, ставят разобщительные клапаны. Кроме того, устанавливают спускной кран. На случай повреждения трубки снизу устанавливают шариковый невозвратный клапан, отсекающий воду при резком увеличении скорости потока.

Для котлов с рабочим давлением свыше 1,7 МПа применяются водомерные приборы с плоскими стеклами. Вместо стеклянной трубки здесь используют сборку

из плоского стекла, помещаемого в металлический корпус. Сборка напоминает многослойный пирог. Спереди и сзади установлены металлические плитки, затем стеклянные плитки, а между ними — снова металлическая плитка. Между металлическими и стеклянными плитками имеются уплотнения, а на поверхности стекла, соприкасающейся с водой и паром, накладывается слой слюды. Слюда выполняет роль надежного изолятора, который предохраняет стекло от поломки при очень высоких температурах. При сборке этой конструкции, затяжку болтов нужно производить равномерно по кругу и с большой осторожностью.

При затяжке болтов во время сборки стекло может быть повреждено, и появится утечка. По мимо визуальные наблюдения за уровнем воды в котле, существуют дистанционные указатели уровня в центральном посту управления

Поскольку нельзя предотвратить закупоривание паровых и водяных трубок кусочками окалины и твердыми частицами, водомерные стекла могут давать неправильные показания. Для контроля за чистотой парового и водяного каналов необходимо их периодически продувать. Для водомерного стекла, показанного на рисунке 4.9, при закрытии водяного крана и открытии спускного крана из последнего пойдет сильная струя пара. Если закрыть паровой кран и открыть водяной кран, то из спускного крана пойдет сильная струя воды. Если струи нет, то канал, на котором открыт кран, засорен.

### **Предохранительные клапаны.**

Эти клапаны устанавливают обычно по два на одной клапанной коробке. Каждый клапан рассчитан так, что он может выпустить весь пар, который вырабатывается в котле в установленный период времени, при условии, что давление в котле за это время поднимается не более чем на 10%.

На судах устанавливают клапаны, нагруженные пружинами, так как они лучше работают в условиях качки. Клапаны располагают в области парового пространства парового коллектора. Традиционный предохранительный клапан показан на рисунке 2.29.

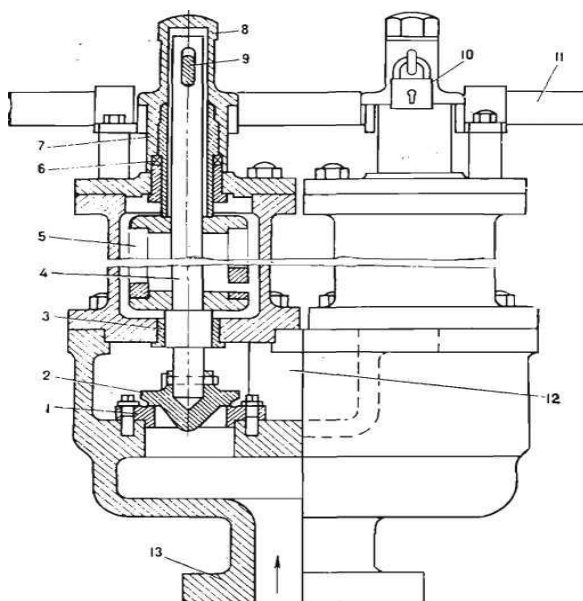


Рисунок 2.29 - Предохранительный клапан, нагруженный пружиной:

1 — седло клапана; 2 — тарелка клапана; 3 — втулка; 4 — шпindelь клапана; 5 — спиральная пружина; 6 — пружинное кольцо; 7 — нажимная гайка; 8 — колпак; 9

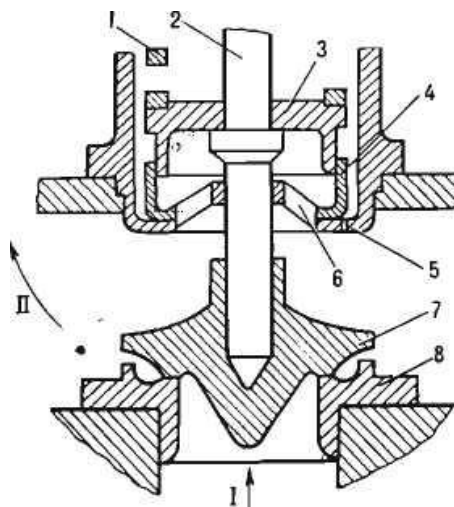
— чека; 10 — замок; 11 — разгрузочное устройство; 12 — патрубок выхода пара;  
13 — патрубок входа пара

Клапан закрыт под действием спиральной пружины, затяжка которой регулируется при помощи гайки, расположенной в верхней части клапана. Установленная в присутствии ответственного лица затяжка пружины клапана фиксируется и пломбируется. Когда давление пара превышает установленное значение, пружина сжимается и клапан открывается. Выходящий пар через отводную трубу выходит в дымовую трубу и далее в атмосферу. По сравнению с усилием, при котором происходит первоначальное открытие клапана, требуется несколько большее усилие для дальнейшего перемещения клапана в сторону открытия и для сжатия пружины.

Эта проблема решается путем применения специального кольцевого выступа на тарелке клапана, благодаря которому при открытии клапана площадь тарелки увеличивается. Предусмотрено также аварийное открытие клапана при помощи разгрузочного устройства с ручным приводом.

В конструкцию пружинных предохранительных клапанов вносятся различные усовершенствования, направленные на увеличение высоты подъема клапана.

В усовершенствованной конструкции с увеличенной высотой подъема клапана (рисунок 2.30) сделаны изменения в конструкции нижней тарелки пружины клапана, выполненной в виде поршня, на который пар действует снизу. Полое кольцо вокруг поршня выполняет роль парового цилиндра. Окна для прохода пара выполнены в днище цилиндра, которое служит направляющей для штока. Пар после прохода через открытый клапан воздействует на нижнюю тарелку пружины, создавая дополнительное усилие, в результате чего клапан поднимается дальше вверх. Когда после стравливания пара его давление станет нормальным, клапан под действием пружины резко закроется. Что бы смягчить удар при посадке клапана на седло, в седле имеются специальные выемки, которые



смягчают удар.

Рисунок 2.30 - Усовершенствованная конструкция предохранительного клапана с увеличенной высотой подъема:

1 — пружина; 2.— шток клапана; 3 — нижняя тарелка пружины; 4 — свободно сидящее кольцо (цилиндр); 5 — спускное отверстие; 6 — окно для входа пара; 7 — тарелка клапана; 8 — седло клапана; I — пар из котла; II — выход пара

В наружной полости клапана имеются спускные отверстия для конденсата, который в случае накапливания над клапаном мог бы затруднить его открытие при превышении расчетного давления.

### 2.3.6 Процесс сгорания топлива

Сгорание — это процесс сжигания топлива с целью получения теплоты. Для полного и эффективного сгорания нужно, чтобы в топку были введены топливо и воздух в пропорции, при которой масса воздуха должна примерно в 14 раз превышать массу топлива. Топливо и воздух должны быть тщательно перемешаны. Для полного сгорания топлива необходимо, чтобы количество воздуха было немного больше теоретически требуемого. При недостатке воздуха сгорание получается неполным и выходящие газы приобретают черный оттенок.

**Подача воздуха.** Перепад давлений, при котором воздух проходит через топку котла, называют тягой. Судовые котлы имеют принудительную тягу, т. е. воздух нагнетается в топку вентиляторами.

Существует ряд конструкций топок с принудительной тягой. Обычная конструкция — это большой вентилятор, от которого по воздухопроводу воздух подается к переднему фронту топки. Со стороны переднего фронта оборудуется камера коробчатой формы, называемая воздушным регистром, в которой осуществляется регулирование подачи воздуха в топку. Воздухопровод к регистру на каком-то участке проходит через дымоход, и благодаря этому воздух немного подогревается. Тягу называют искусственной, если вентилятор расположен в дымоходе и всасывает воздух в топку. Существует также уравновешенная тяга, когда устанавливаются вентиляторы обоих типов и тогда давление в топке становится близким к атмосферному.

**Подача топлива.** Современные паровые котлы отапливаются низкосортным жидким топливом. Хранится топливо обычно в цистернах междудонного пространства, откуда топливоперекачивающим насосом оно подается в отстойные цистерны. В отстойниках из топлива выделяется вода, которая затем спускается.

Из отстойников топливо через фильтры подается к топливным насосам, которые нагнетают его через топливоподогреватели к фильтрам тонкой очистки. Процесс подогрева топлива должен тщательно контролироваться, так как при повышенной температуре может произойти распад молекул нефти. В схеме предусмотрена возможность подачи к форсунке дизельного топлива для разжигания котла или для его работы на малой мощности. От фильтров тонкой очистки топливо подается к форсунке, в которой оно мелко распыливается и в таком виде подается в топку. Для разогрева топлива перед разжиганием котла предусмотрена труба рециркуляции.

**Сгорание топлива.** Топливо к форсунке подается под высоким давлением и выходит из нее мелко распыленной струей (рисунки 2.31). Благодаря завихряющей

пластине струя приобретает форму вращающегося конуса и в таком виде поступает в топку. Существуют различные конструкции форсунок. Упомянутая выше форсунка известна под названием механической (рисунк 2.31, а). В форсунке с вращающейся головкой (рисунк 2.31. б) распиливание и завихрение топлива производится посредством срывания топлива с кромок вращающегося конического колпачка. В паровой форсунке (рисунк 2.31, в) топливо распыливается и завихряется струей пара, обладающей высокой скоростью. Пар подводится в форсунку через центральную втулку.

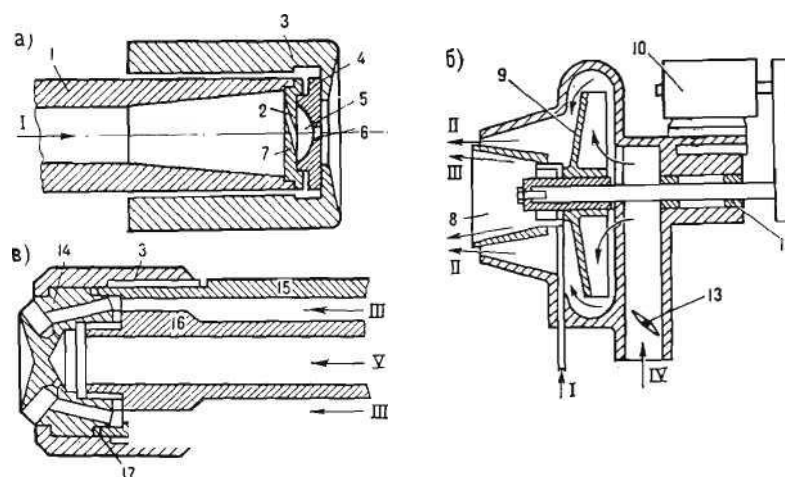


Рисунок 2.31 - Типы форсунок:

а — механическая; б — с вращающейся головкой; в — паровая;

1 — корпус форсунки; 2 — завихряющие каналы; 3 — колпачковая гайка; 4 — диафрагма; 5 — завихряющая камера; 6 — отверстие; 7 — завихряющая пластина; 8 — вращающийся конус; 9 — вентилятор; 10 — электродвигатель; 11 — привод вращения конуса; 12 — подшипник; 13 — заслонка; 14 — распиливающее сопло; 15 — наружный корпус; 16 — внутренний корпус; 17 — прокладки; I — подача топлива; II — выход воздуха; III — выход топлива; IV — подача воздуха; V — подача пара

Воздушный регистр представляет собой комплект заслонок и направляющих, расположенных вокруг форсунок в пространстве между кожухами котла. Регистром устанавливаются размеры проходного сечения для поступления воздуха из воздушного короба.

Отсечка воздуха осуществляется с помощью поворотной воздушной заслонки. Воздух обтекает форсунку, и при помощи завихрителя ему придается вращательное движение, противоположное тому, в котором вращается топливная струя. Благодаря этому обеспечивается перемешивание топлива с воздухом (рисунк 2.32).



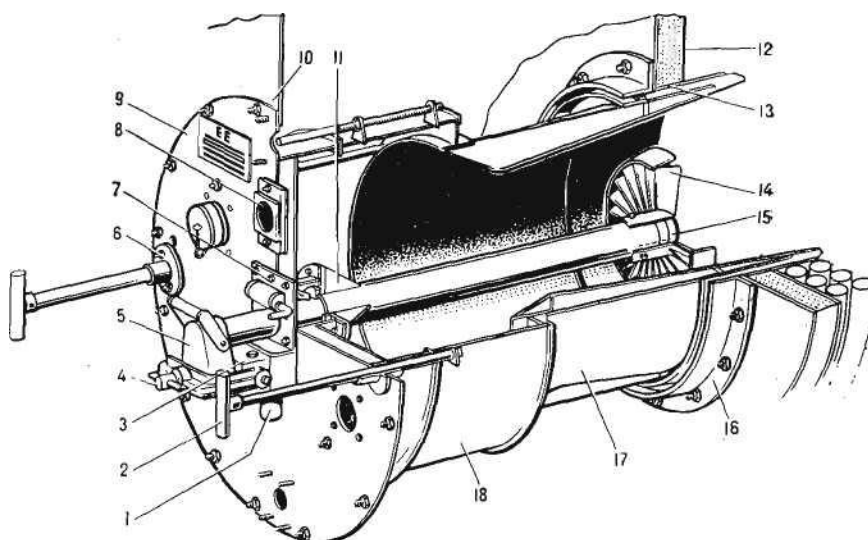


Рисунок 2.32 - Воздушный регистр:

1 — труба подвода пара; 2 — Т-образная рукоятка; 3 — блок управления; 4 — нажимной винт; 5 — распыливающее устройство; 6 — направляющая Т-образной рукоятки; 7 — лючок; 8 — смотровое окно; 9 — наружная плита форсунки; 10 — наружный кожух; 11 — опорная трубка диффузора; 12 — внутренний кожух; 13 — сменный наконечник; 14 — диффузор или завихритель; 15 — наконечник форсунки; 16 — направляющее кольцо; 17 — трубка Вентури; 18 — поворотная втулка

Топливо, поступающее из форсунки, необходимо сначала воспламенить. После воспламенения в процессе горения вначале сгорают легкие фракции, образуя первичный факел. Благодаря теплоте первичного факела во вторичном факеле сгорают тяжелые фракции топлива. К этим факелам подводится соответственно первичный и вторичный воздух.

### 2.3.7 Обеспечение чистоты питательной воды

В современных паровых котлах, работающих при высоких давлениях и температурах и имеющих высокую паропроизводительность, необходимо, чтобы питательная вода обладала высокой степенью чистоты.

Даже в самой чистой воде растворены соли, которые выделяются при кипячении. Эти соли в виде накипи откладываются на нагревательных поверхностях и уменьшают теплоотдачу, что может вызвать местный перегрев и повреждение трубки. Некоторые соли остаются в растворе и образуют кислоты, действующие агрессивно на металлические элементы котла. Избыток в воде солей в совокупности с возникающими при работе котла напряжениями приводит к состоянию металла котла, именуемому каустической хрупкостью. Металл становится хрупким, из-за чего могут возникнуть серьезные повреждения котла.

Наличие растворенных в питательной воде кислорода и углекислого газа может вызвать сильную коррозию котла и его питательной системы. Если в питательной воде имеются взвешенные частицы, избыток солей или если туда попадает масло, то может произойти интенсивное образование пены на

поверхности воды в паровом барабане котла. Это приводит к выбросу воды из котла вместе с уходящим паром. Даже небольшое количество воды при попадании в турбину может вызвать в ней значительные повреждения.

**Примеси, содержащиеся в воде.** В воде в различном количестве присутствуют соли. К ним относятся хлориды, сульфаты, бикарбонат кальция или магния. Иногда в воде встречается сера. Содержание солей в воде определяет ее жесткость. В наибольшей степени на жесткость воды влияет наличие солей кальция и магния. Бикарбонаты кальция и магния при нагревании выделяются из воды и образуют накипь. Эти соли создают так называемую временную жесткость. Хлориды, сульфаты и нитраты при кипении воды не выделяются и создают так называемую постоянную жесткость. Общая жесткость — это сумма временной и постоянной жесткости, и ею оценивается количество накипеобразующих солей в питательной котельной воде.

### 2.3.8 Обслуживание паровых котлов

Обслуживание паровых котлов, установленных на судах промыслового флота, регламентировано заводскими инструкциями и правилами обслуживания паровых котлов на судах флота рыбной промышленности. В этих правилах подробно освещены все вопросы эксплуатации судовых котлов при различных условиях работы. Практика показывает, что в большинстве случаев аварии котлов бывают результатом нарушения обслуживающим персоналом правил технической эксплуатации. Ниже приводятся основные требования по обслуживанию судовых паровых котлов.

**Приготовление к растопке.** Вначале необходимо проверить, открыт ли дымоход, повернуть все заслонки и установить их в надлежащее положение.

Открыть все вентиляционные краны, краны к приборам, указателям, аварийным устройствам.

Открыть клапан перепуска к пароперегревателю и спускные краны, чтобы убедиться в том, что пар будет поступать к пароперегревателю. Все другие краны продувки и спуска должны быть проверены на закрытие. Заполнить котел горячей деаэрированной водой чуть ниже рабочего уровня.

По мере появления воды из воздушных кранов водяных коллекторов краны должны быть закрыты. Необходимо проверить экономайзер, убедиться в его заполнении водой и полном выходе из него воздуха.

Проверить работу вентилятора. Для воздухоподогревателей универсальных котлов обеспечить перепуск выпускных газов, минуя воздухоподогреватель. Затем проверить правильность положения клапанов и других элементов топливной системы котла. После этого, включив топливную систему на циркуляцию, подогреть топливо.

**Растопка котла.** Пустить вентилятор и в течение нескольких минут продувать воздухом топку, чтобы очистить ее от остатков продуктов сгорания и масляных паров. Воздушные заслонки на всех регистрах, за исключением заслонок растопочной форсунки, должны быть закрыты. Открыть подачу топлива растопочной форсунке, зажечь ее и отрегулировать факел так, чтобы горение было

небольшим, но с полным сгоранием топлива. При таком режиме горения форсунки нужно отрегулировать давление топлива и дутьевого воздуха, добиваясь устойчивого пламени.

Как только появится пар из спускных кранов коллектора пароперегревателя, их следует закрыть. Когда давление в паровом коллекторе достигнет 0,21 МПа, необходимо закрыть его воздушный кран. Давление пара в котле доводить до рабочего медленно, чтобы обеспечить постепенное тепловое расширение конструкции, избежать перегрева отдельных элементов пароперегревателя и повреждения огнеупорной кладки. При поставке котла фирма-изготовитель, как правило, прикладывает к нему табличку, на которой графически показано увеличение давления в паровом коллекторе в зависимости от времени после, зажигания факела.

После этого нужно прогреть главный и вспомогательный трубопроводы и закрыть на них краны продувки, продуть водомерные стекла и проверить правильность их показаний. Когда давление пара будет на 0,3 МПа меньше рабочего, необходимо приоткрыть разгрузочное устройство и выпустить немного пара.

Когда давление в котле достигнет рабочего, к нему можно подключить нагрузку и закрыть клапан перепуска на пароперегревателе. Необходимо тщательно следить за уровнем воды в котле и за правильной работой автоматического регулятора подачи воды.

**Уход за котлом во время эксплуатации.** Во время работы котла в нем необходимо поддерживать постоянное давление пара, постоянный уровень воды и бездымное горение в топке.

Давление пара в котле измеряют манометром 3. Не следует допускать снижения давления пара более чем на 5% нормального. Если давление пара в котле возрастает, необходимо своевременно уменьшить интенсивность горения, чтобы избежать излишних подрывов предохранительных клапанов и подпитать котел водой. Уровень воды в водоуказательных приборах должен равномерно колебаться около отметки «Рабочий уровень». Не допускается отклонение за пределы допустимых высшего и низшего уровней, отмеченных на водоуказательных приборах. Утечка воды и превышение наибольшего уровня недопустимы, так как в первом случае оголяются и перегреваются поверхности нагрева, что приводит к повреждению котла, а во втором случае уменьшается зеркало испарения и вода попадает в паропроводы. О качестве горения в топке судят по цвету пламени и дыма: признаком хорошего горения топлива служит соломенно-желтый цвет пламени.

Во избежание засорения подводящих каналов во время каждой вахты продувают водоуказательные стекла. Для очистки поверхностей зеркала испарения от грязи и масла клапаном 2 (см. рисунок 32) производят верхнее продувание котла. Для удаления шлама, скопившегося в нижнем барабане, с определенной периодичностью, указанной в инструкции по обслуживанию котла, клапаном 11 производят нижнее продувание.

При стоянке судна в течение 1—2 сут главные котлы не выводят из действия, а переводят на режим поддержания пара, который характеризуется ослабленным

горением топлива при избыточном давлении в котле без расходования пара. При этом в работе оставляют одну форсунку.

**Прекращение действия котла.** Порядок прекращения действия котлов следующий:

- закрывают стопорный клапан и выключают форсунки, одновременно снижая частоту вращения вентилятора;
- останавливают топливный насос и выключают подогреватели топлива;
- подпитывают котел и останавливают питательный насос;
- выключают котельные вентиляторы.

Не ранее чем через 2 ч после выключения форсунок начинают постепенно снижать давление пара; одновременно делают верхнее продувание. Затем в течение нескольких часов сливают воду.

Если котел выводится из действия на срок свыше 30 сут, то после спуска воды его тщательно подсушивают жаровнями с древесным углем и плотно закрывают все клапаны, лазы и горловины. Для поглощения влаги устанавливают противни с негашеной известью, хлористым кальцием или силикагелем. Поверхности нагрева со стороны огня смазывают малосернистым мазутом.

**Особенности обслуживания автоматизированных котлов.** Перед разводкой огня в котле все регуляторы автоматики устанавливают в положение «Ручное управление» и готовят котел к действию, как было описано выше. Затем установкой соответствующих выключателей и переключателей в рабочее положение включают систему автоматического управления. Происходит воспламенение топлива и начинается подъем пара. В этот период проверяют действие отдельных элементов системы автоматического регулирования и при необходимости осуществляют их подрегулировку.

Во время работы котла кроме выполнения рассмотренных ранее операций периодически проверяют визуально состояние систем автоматики. Перед выключением котельной установки регулирующие устройства переводят на ручное управление и в указанной выше последовательности выводят котел из действия.

**Учет расхода топлива.** Расход жидкого топлива учитывает старший механик ежедневно по расходным цистернам или измерительным приборам и проверяет по остаткам в цистернах основного запаса. Данные о фактическом расходе топлива регулярно заносятся в машинный вахтенный журнал. Кроме того, ежедекадно производится замер остатков топлива во всех хранилищах, а один раз в месяц составляется акт о наличии топлива на первое число месяца, следующего за отчетным.

**Техника безопасности при обслуживании котельных установок.** К обслуживанию паровых котлов допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие медицинское освидетельствование и имеющие удостоверение о сдаче экзаменов по техминимуму. Обслуживающий персонал котельной установки должен иметь соответствующую спецодежду и обувь на кожаной подошве (во избежание скольжения).

В котельном отделении должен быть отдельный независимый выход на палубу. Котлы, дымоходы и паропроводы изолируют, чтобы предохранить работающих от ожогов и от излучения тепловой энергии. Водоуказательные

приборы и манометры должны быть хорошо освещены и видны с поста управления котлом. На шкале манометра красной чертой отмечается допустимое рабочее давление пара в котле.

Перед зажиганием форсунок необходимо тщательно провентилировать топку. При поднесении к форсунке факела или электрозапальника котельный машинист во избежание ожогов должен стоять сбоку от котла.

При авариях котельной установки личный состав должен принять все меры к немедленному устранению повреждений.

Запрещается при нахождении котла под парами выполнять на нем ремонтные работы, связанные с ударами, сверлением отверстий, сваркой и т. д. Перед выполнением ремонтных работ на всех опасных местах обязательно следует вывешивать плакаты и предупредительные надписи, указывающие безопасные методы работы.

Одним из основных требований правил техники безопасности является соблюдение чистоты и порядка в машинно-котельном отделении. Грязь, разбросанный инструмент, беспорядок, загромождение проходов нередко служат причиной несчастных случаев.

**Сравнительная эксплуатационная оценка паровых котлов.** К судовым котлам предъявляется ряд требований. Они должны отличаться высокой надежностью, т. е. обеспечивать выдачу пара определенных параметров при различных условиях (при качке, креке, дифференте, при резких изменениях режима работы судна или его технологического цеха и т. д.). Котлы должны иметь простую и удобную в обслуживании конструкцию, а также высокую экономичность при минимальных ' возможных габаритах и массе. Они должны обеспечивать быструю готовность к действию и быть безо- N пасными в работе.

Наиболее полно этим требованиям отвечают водотрубные вертикальные котлы. Это обусловлено следующими их преимуществами.

1. Время подъема пара (обеспечения готовности к действию) у водотрубных котлов составляет 1—2 ч и меньше, причем благодаря эластичности водогрейных труб быстрота проведения этой операции не отражается на плотности и прочности соединений. В то же время жесткость конструкции огнетрубных котлов не допускает резких тепловых изменений, вследствие чего подъем пара в главных огнетрубных котлах длится 10—12 ч (иногда более — в зависимости от размеров котла), а во вспомогательных котлах—3—4 ч.

2. Водотрубные котлы значительно легче огнетрубных, проще по конструкции и менее сложны в изготовлении. Кроме того, водотрубные котлы занимают меньше места и их легче разместить в машинно-котельном отделении.

3. Водотрубные котлы менее опасны при взрыве, чем огнетрубные.

4. Водотрубные котлы по сравнению с огнетрубными более надежны в условиях качки, крена и дифферента, так как вероятность оголения мест входа водогрейных труб в пароводяные барабаны у водотрубных котлов меньше, чем вероятность оголения потолка огневой камеры у огнетрубных котлов. Кроме того, в водяном пространстве пароводяных барабанов некоторых водотрубных котлов устанавливают поперечные перегородки, препятствующие перемещению массы воды в условиях бортовой качки и крена, если котел установлен поперек судна.

5. Масса воды в водотрубных котлах в 5—10 раз меньше, чем в огнетрубных. Малое водосодержание водотрубных котлов сокращает время на подъем паров и их остановку. Для обеспечения надежной работы котел снабжают системой автоматического регулирования уровня воды; следует иметь в виду, однако, что средства автоматизации на большинстве промысловых судов требуют постоянного наблюдения и обслуживания. В частности, при качке возможно периодическое ложное срабатывание поплавковых автоматов питания, которые обеспечивают постоянный уровень воды во вспомогательных котлах.

6. С другой стороны, малое водосодержание водотрубных котлов является их недостатком, так как при резком изменении режима работы судна или его технологического цеха в водотрубных котлах происходят сильные колебания давления пара. У огнетрубных котлов отсутствует этот недостаток, они отличаются большой аккумулирующей способностью, т. е. создают большой запас теплоты в воде, благодаря чему обеспечивают малые изменения давления пара и уровня воды даже при резких колебаниях нагрузки, что очень важно для таких судов, как буксиры или траулеры.

7. Водотрубные котлы предъявляют более высокие требования к качеству питательной воды, чем огнетрубные. Это обстоятельство послужило одной из причин установки на многих дизельных танкерах вспомогательных огнетрубных котлов, в водяное пространство которых не исключено попадание нефтепродуктов, разогреваемых паром из котлов.

### **Контрольные вопросы:**

1. Поясните, в чем заключается принципиальное отличие газо- и водотрубных котлов? Назовите достоинства и недостатки, присущие этим видам котельной техники.
2. Перечислите основные показатели, характеризующие паровой котел как теплообменный аппарат.
3. Перечислите основные элементы, образующие газо- водотрубные котлы, поясните их назначение.
4. Назовите виды и сроки освидетельствования паровых котлов Регистром.
5. Перечислите основную котельную арматуру и поясните ее назначение.
6. Что такое «упуск воды»? Назовите его основные причины и последствия.
7. Перечислите основные правила техники безопасности при эксплуатации паровых котлов.

Литература [3, 4, 5, 6, 8, 9]

## **Тема 2.4 Судовые системы и устройства. Вспомогательные механизмы**

В процессе изучения темы следует изучить классификацию и назначение судовых систем, выяснить назначение и познакомиться с конструкцией их составных элементов, ознакомиться с требованиями Морского Регистра Судоходства к судовым системам.

При рассмотрении конструкций судовых насосов необходимо понять принцип их действия, процессы, протекающие в их проточной части, познакомиться с основными характеристиками (подачей, напором, КПД). Особое внимание при изучении принципа действия насосов следует обратить на взаимосвязь геометрических характеристик, напора и мощности.

При знакомстве с рулевыми машинами, якорно-швартовными и грузовыми механизмами особое внимание следует обратить на требования Морского Регистра Судоходства, предъявляемые к этим устройствам.

Промысловые механизмы следует рассматривать, исходя из основных операций с орудиями лова.

Основные вопросы темы:

- общесудовые системы, их классификация;
- системы, обслуживающие энергетическую установку;
- судовые насосы, разновидности, классификация, принцип действия;
- рулевые машины, их разновидности, устройство и принцип действия.

Правила Морского Регистра Судоходства;

— якорно-швартовные механизмы, их разновидности, устройство и принцип действия. Правила Морского Регистра Судоходства;

— грузоподъемные механизмы, их разновидности, устройство и принцип действия. Правила Морского Регистра Судоходства;

#### 2.4.1 Системы дизельных энергетических установок

**Системой ДЭУ** называется совокупность специализированных трубопроводов с механизмами, аппаратами, устройствами и приборами, предназначенная для выполнения определенных функций, обеспечивающих нормальную эксплуатацию установки.

Работу главных и вспомогательных дизелей обеспечивают следующие системы:

- топливная;
- смазочного и охлаждающего масла;
- охлаждения;
- сжатого воздуха (для пуска и реверса главного дизеля);
- свежего воздуха (для работы двигателей);
- отвода отработавших газов

Каждая из перечисленных систем ДЭУ должна обладать надежностью и живучестью.

**Надежность** – свойство системы выполнять заданные функции, сохраняя в процессе эксплуатации *безотказность* в работе, *ремонтпригодность* и *долговечность* составляющих ее элементов.

**Живучестью** системы называется ее способность сохранять и восстанавливать работоспособность при чрезвычайных обстоятельствах: при аварии, пожаре, затоплении машинного отделения и прочих повреждениях судна.

Надежность и живучесть любой системы может быть обеспечена и повышена за счет следующих мер:

- минимизация количества элементов системы;
- резервирование элементов и участков системы;
- применение стойких конструкционных материалов и изделий;
- размещение элементов системы на одном фундаменте;
- рациональное размещение в машинных отделениях;
- унификация элементов системы;
- улучшение условий эксплуатации, обеспечивающих эффективный контроль состояния систем;
- повышение квалификации обслуживающего персонала;
- применение комплексной автоматизации.

#### **2.4.1.1 Топливные системы**

Топливные системы *предназначены* для приема, хранения, очистки, подогрева и подачи топлива на берег и другим судам.

Структура топливной системы зависит от вида используемого топлива и типа двигателей.

В энергетических установках морских и речных судов используются жидкие нефтяные топлива, являющиеся продуктом переработки нефти.

Топлива делятся на 4 группы:

- *дизельное*, которое относится к категории дистилятных;
- *моторное*, которое производят смешиванием дистилятного топлива с мазутом;
- *флотский мазут*, который получают во время прямой перегонки нефти или смешиванием остатков нефтепродуктов с дистилятным топливом;
- *котельный мазут*, который представляет собой остаток процессов перегонки или крекинга нефти.

Дизельное топливо называется легким, а остальные – тяжелыми топливами.

Качество жидкого топлива определяется физико-химическими свойствами: фракционным составом, температурами застывания и вспышки, плотностью, испаряемостью, содержанием воды и механических примесей, наличием сернистых соединений и смолистых веществ, теплотой сгорания, вязкостью и др.

Одним из основных показателей топлива является *вязкость*, так как она характеризует возможность перекачивания и использования топлива в СЭУ.

В судовых установках используются топлива малой вязкости, средней вязкости и высокой вязкости – легкое и тяжелое. С увеличением температуры топлива его вязкость и плотность снижаются. Поэтому для улучшения распыления топлива его подогревают.

*Дизельное топливо* относится к категории легких и считается наиболее подходящим для высокооборотных ДВС и ГТД авиационного типа. Для среднеоборотных, малооборотных и ГТД оно используется только во время пуска и работы на режимах маневрирования.



Дизельное топливо классифицируется на летнее (Л) и зимнее (З), а также арктическое (А).

*Моторное топливо марки ДТ и дизельный мазут марки ДМ* используют для среднеоборотных и малооборотных дизелей. Для сжигания этих топлив в дизелях необходим их подогрев.

*Флотский мазут* марок Ф5, Ф12 относится к тяжелым топливам повышенной вязкости и является основным для малооборотных и среднеоборотных дизелей.

Вопросы технической эксплуатации топлив будут изучены в отдельной дисциплине.

Судовая топливная система условно может быть разделена на три подсистемы:

- приема и хранения топлива;
- топливообработки;
- подачи топлива к двигателям.

Каждая из этих систем состоит из ряда самостоятельных трубопроводов, укомплектованных механизмами и устройствами в зависимости от типа СЭУ и сорта используемого топлива.

*Топливная система дизеля* состоит из топливных систем низкого и высокого давления и топливной аппаратуры.

Топливная система *низкого давления* представляет собой часть топливной системы дизеля и предназначена для подготовки и подачи топлива к системе высокого давления и включает в себя: цистерны, фильтры, насосы, смесители, сепараторы, гомогенизаторы, подогреватели и топливопроводы. Состав этой системы зависит от типа топлива.

Топливная система *высокого давления* предназначена для нагнетания топлива в камеры сгорания: она осуществляет впрыскивание топлива в камеры сгорания дизеля и включает в себя топливный насос высокого давления (ТНВД) и форсунки, обычно соединенные топливопроводом высокого давления. Если применяются насос-форсунки, то топливопровод высокого давления отсутствует.

Большинство дизелей транспортных судов на основных режимах плавания работают на тяжелых (вязких) сортах топлива. Для запуска и на переходных режимах, а также перед остановкой двигателя приходится использовать легкие топлива. Поэтому в состав топливной системы входят две системы: тяжелого и легкого топлива (на современных средне- и малооборотных дизелях).

Прием топлива осуществляется в запасные цистерны легкого и тяжелого топлива с палубы через фильтр; при переполнении цистерн топливо по переливным трубам переливается в переливную цистерну. Для хранения топлива могут использоваться топливобалластные замещающие танки.

Применение вязких топлив требует установки в цистернах змеевиков парового подогрева или оборудования струйного подогрева в цистерне, при котором в районе расходного патрубка размещаются паровые змеевики для местного подогрева топлива.

Для предварительной очистки топлива от воды и механических примесей предусматриваются отстойные цистерны тяжелого и легкого топлива. На

отдельных судах отстойные цистерны отсутствуют, но есть сепараторы для очистки топлива от воды и механических примесей. Кроме того система сепарации включает в себя фильтры, насосы, подогреватели топлива на его пути в расходные цистерны.

Сепараторы для тяжелого топлива могут быть: самоочищающимися и работающими в автоматическом режиме. Дизельное топливо перед сепарацией не подогревают.

Отходы от сепарации накапливаются в специальной цистерне, а затем направляются в сборник отходов масла, топлива и шлама или в мусоросжигательную печь.

Гомогенизатор служит для разрушения асфальтосмолистых образований.

Наиболее простой является топливная система подачи легкого топлива, т.к. система топливоподготовки в этих случаях упрощается за счет исключения подогрева топлива, гомогенизатора и других элементов.

Для обеспечения работы малооборотных дизелей и четырехтактных вспомогательных дизель-генераторных установок применяется **универсальная система топливоподдачи**. В такой системе применяется подогрев и сепарирование тяжелого топлива, а также его подача к ТНВД и отвод от ТНВД и форсунок в автоматизированном режиме с точным приборным контролем температуры, давления, вязкости топлива и поддержанием этих параметров.

В процессе работы дизеля можно перейти с тяжелого топлива на дизельное и наоборот.

Вспомогательные дизели также могут работать как на дизельном, так и на тяжелом топливе.

Более детально топливные системы представляется возможным изучить на практических занятиях и во время плавательной практики на судах.

#### 2.4.1.2 Системы смазочного и охлаждающего масла

В СЭУ используются, как правило, *минеральные масла*, которые производятся из нефтепродуктов и могут быть дистиллятными или компаундными. В особых случаях (при высоких температурах и нагрузках), когда минеральные масла непригодны, используются *синтетические масла*. Они имеют лучшие качества, но стоимость их высока, и поэтому чаще используют *смеси минеральных и синтетических масел*.

Требования к маслам изучаются в специальной дисциплине.

*Системы смазочного и охлаждающего масла предназначены* для приема, хранения, очистки от воды, механических примесей и подачи масла к местам охлаждения и смазки трущихся деталей механизмов, а также для передачи его на другие суда и на берег.

В зависимости от назначения системы делятся на: приемоперекачивающие, циркуляционные смазочные, сепарирования масла, дренажные, подогрева.

Прием масла на судно производится по приемоперекачивающему трубопроводу закрытым способом (по шлангам) внесудовыми средствами через

наливные палубные втулки или приемные патрубки, расположенные в станциях приема топлива и масла. Через эти патрубки производится и выдача масла.

*По способу создания давления различают системы:*

- напорную, в которой давление масла (0,2...0,8 мПа) перед узлами трения создается насосом;
- гравитационную, в которой давление (0,07...0,1 мПа) зависит от высоты расположения напорной цистерны, из которой масло самотеком поступает к смазываемым узлам.

Гравитационная система выгодно отличается от напорной постоянством напора и наличием определенного запаса масла, гарантирующего его подачу при пусках и остановках смазываемого агрегата и при аварийном отключении насоса.

ДВС оборудуют напорными системами, обычно называемыми циркуляционными.

В дизельных установках в зависимости от типа дизеля и его мощности используют масляные циркуляционные системы с «мокрым» или «сухим» картером. Система с «мокрым» картером применяется в высокооборотных дизелях малой и средней мощности. В этой системе поддон картера дизеля используется в качестве циркуляционной масляной цистерны, из которой масло поступает в систему через фильтр и охладитель.

Основным недостатком такой системы является быстрая потеря маслом своих качеств из-за следующих причин:

- интенсивное загрязнение масла продуктами неполного сгорания топлива, попадающими в картер со стенок цилиндров;
- тепловое воздействие на масло отводом тепла в картер от поршней;
- утечка газов в картер через неплотности поршневых колец;
- высокая частота циркуляции масла в системе из-за ограниченного объема поддона картера.

В рассматриваемой системе масло циркулирует по замкнутому контуру и ее подразделяют на две взаимосвязанные: внутреннюю и внешнюю.

Задача внутренней системы заключается в подаче масла к рамовым подшипникам, к шатунным и головным подшипникам, подшипникам распределительного вала, промежуточной шестерне привода смазочного насоса и др. элементам дизеля.

К элементам внешней системы относятся резервный и предпусковой насосы, насос ручной подачи, шестеренчатый масляный насос, маслоохладитель, фильтр, термостатический клапан и др.

Эта простая компоновка масляной системы повышает степень автономности двигателя.

Система с «сухими» картером применяется для малооборотных и среднеоборотных двигателей. В таких системах масло самотеком сливается в циркуляционные цистерны, размещенные под двигателем.

Достоинством циркуляционной смазки с «сухими» картером является более длительный срок службы масла вследствие меньшей интенсивности его загрязнения и окисления.

Однако такая система имеет существенные недостатки:

- большая сложность из-за увеличения числа механизмов и устройств;
- повышенные затраты мощности на привод насосов.

Устройство систем смазочного масла дизелей существенно зависит от особенностей их устройства. Например, в дизелях «МАН-Б и В Дизель» распределительный вал смазывается от отдельной системы. В смазочной системе крейцкопфного дизеля имеется отдельная система смазывания цилиндропоршневой группы. В малооборотных крейцкопфных дизелях имеется система сточного масла из сальников поршневых штоков и другие особенности.

### 2.4.1.3 Системы охлаждения

Системы охлаждения предназначены для отвода теплоты от различных механизмов, устройств, приборов и рабочих сред в теплообменных аппаратах.

Рабочими охлаждающими средами с СЭУ является забортная и пресная вода, масло, топливо и воздух.

Вода по сравнению с прочими охлаждающими средами имеет большую теплоемкость и при скорости 0,5-3,0 м/с высокий коэффициент теплоотдачи. Это легкодоступная охлаждающая среда и поэтому широко применяется в энергоустановках всех типов. Однако в воде содержатся растворимые соли, микроорганизмы и другие примеси, выпадающие в осадок при нагревании. Особенно много солей и примесей в морской забортной воде, поэтому ее нагрев выше 55°C нежелателен. Исходя из этого на судах применяют двухконтурные системы охлаждения: в низкотемпературном контуре используется забортная вода, а в высокотемпературном – пресная.

Пресная вода допускает нагрев в системах охлаждения при атмосферном давлении до 80-90°C, а при повышенном давлении – более 100°C.

Атмосферный воздух, как охлаждающая среда, имеет по сравнению с водой в 4 раза меньшую теплоемкость. Поэтому в системах охлаждения его требуемое количество весьма существенно и подается воздух со скоростью до 10 м/с и более. Это создает дополнительные проблемы, связанные с затратами энергии и поэтому воздух используется только в тех случаях, когда нельзя применять жидкие охлаждающие среды. Например, в электрических машинах используются только воздух для их охлаждения.

В судовых дизельных установках применяются три типа систем охлаждения – проточная, замкнутая и центральная.

*Проточная система охлаждения забортной водой* в ДЭУ используется для двигателей небольшой мощности, их редукторов, компрессоров сжатого воздуха, подшипников и для всех теплообменников.

*Замкнутая система* судовых ДЭУ применяется обычно для отвода теплоты от деталей двигателей, а *проточная* – для охлаждения рабочих сред в теплообменниках (масла, воздуха).

Применение замкнутой системы охлаждения пресной водой исключает коррозию деталей дизелей, позволяет повышать температуру в системе баз интенсификации образования накипи.

Для охлаждения современных судовых дизелей применяют исключительно замкнутые системы охлаждения, в которых используется пресная вода, циркулирующая по замкнутому контуру. Нагретую пресную воду пропускают через охладитель, прокачиваемый заборной водой. Это позволяет поддерживать необходимый температурный режим. *Центральная система* водяного охлаждения отличается тем, что она имеет только один теплообменник, охлаждаемый заборной водой. Остальные холодильники, включая холодильник пресной воды охлаждения цилиндров двигателя, охлаждаются от системы пресной воды низкой температуры.

Мы не рассматриваем здесь устройство каждого из типов систем охлаждения, так как это зависит от конкретной ДЭУ и изучается на судне во время практики.

#### **2.4.1.4 Системы воздухообеспечения**

Назначением системы воздухообеспечения является получение, хранение и подача воздуха различных параметров к потребителям.

Система воздухообеспечения состоит из двух подсистем: системы подачи воздуха для сжигания топлива и системы сжатого воздуха. *Первая служит для подачи воздуха к главным и вспомогательным дизелям*, вспомогательным котлам и т.д. Эта система подводит воздух к потребителям в необходимых количествах для обеспечения нормального сгорания топлива.

На судах для горения топлива в дизелях воздух обычно подается из машинного отделения, куда он поступает через световой люк и из системы вентиляции. Турбонагнетатели расположены в верхней части дизеля и снабжены приемным патрубком с фильтрами для очистки воздуха и снижения шума воздушного потока. В некоторых установках предусматривается автономный подвод воздуха к дизелям. Это служит для того, чтобы поступающий к дизелям воздух не снижал температуру в машинном отделении (например, при плавании в высоких широтах).

Чтобы предотвратить попадание в камеры сгорания солей морской воды, воздухоприемные устройства размещаются в верхней части судовой надстройки и на входе в воздухоприемную шахту устанавливают двух- и трехступенчатые фильтры. На крупных морских судах воздухоприемные устройства представляют собой сложные и громоздкие конструкции. Это каналы большого сечения с минимальными изгибами, протянутые от верхней части судовой надстройки к дизелям. Внутренние стенки воздухоприемной шахты облицовывают звукопоглощающими материалами, так как скорость воздуха в шахте достигает 30 м/с и создает сильный шум.

### 2.4.1.5 Система сжатого воздуха

Такой системой оборудуются СЭУ всех типов. Наиболее развиты эти системы на дизельных транспортных и промысловых судах. Различают системы сжатого воздуха **низкого** (до 1 мПа), **среднего** (до 3 мПа) и **высокого** (более 5 мПа) давления. *Воздух низкого давления* используется для хозяйственных нужд судна и ЭУ (продувание механизмов, кингстонов), *среднего давления* – в основном для пуска и реверса главных дизелей, а *высокого* – в системах пуска вспомогательных ДВС и других целей.

В основном сжатый воздух расходуется на пуск главных и вспомогательных дизелей. Кроме этого он используется для работы пневмоавтоматики, контролирующих устройств и предупредительной сигнализации, для создания давления в пневмоцистернах пресной и забортной воды, для продувания нагревательных змеевиков, фильтров и кингстонов.

Большую группу потребителей сжатого воздуха составляют пневматические устройства общесудового назначения: тифоны, пневмоинструмент и станки, пневматические грузоподъемные механизмы, углекислотные станции, воздушно-пенные аппараты и др.

На судах промыслового флота сжатый воздух используют для работы технологического оборудования.

Обычно в состав системы сжатого воздуха *входят* поршневые электрокомпрессоры, маслоотделители, баллоны для хранения воздуха, редукционные клапаны, трубопроводы, контрольно-измерительные приборы и устройства автоматического регулирования.

Согласно требованиям «Правил Регистра» воздух для пуска главного двигателя должен храниться в двух баллонах одинаковой вместимости. Давление пускового воздуха составляет 2,5...3 мПа. На небольших судах и для пуска вспомогательных двигателей используют воздух с давлением 5...7 мПа. Запас пускового воздуха на судне должен быть достаточным для 12 последовательных пусков (попеременно на передний и задний ход) каждого реверсивного главного двигателя.

Для пуска нереверсивных главных двигателей запас воздуха должен быть достаточным для 6-ти пусков двигателя наибольшей мощности, а при наличии более двух двигателей – для 3- пусков каждого двигателя.

Для дизель-генераторов допускается применять один баллон, вместимость которого обеспечивает 6-ть последовательных пусков одного двигателя.

Если дизели-генераторы расположены на разных бортах судна, ставятся по одному баллону на каждый борт и соединяются между собой трубопроводом.

При размещении главных двигателей в двух помещениях, разделенных водонепроницаемой переборкой, в каждом из помещений устанавливают не менее чем по одному баллону на разных бортах и по одному главному компрессору.

Необходимая вместимость баллонов пускового воздуха оценивается специальным расчетом.

Сжатый воздух на судне расходуется не только для пуска двигателей, но и для других нужд, поэтому вместимость баллонов увеличивается из расчета на общесудовые нужды.

Запас сжатого воздуха пополняется с помощью главных компрессоров, которых должно быть не менее двух (один резервный), и одного первичного компрессора с автономным двигателем. Последний служит для создания необходимого запаса сжатого воздуха с целью запуска дизель-генератора («оживления» установки), а затем могут быть запущены электрокомпрессоры.

Компрессорная станция согласно «Правилам Регистра» должна быть такой, чтобы обеспечивать заполнение пусковых баллонов главного двигателя в течение 1-го часа, начиная от минимально допустимого давления до рабочего начального давления. Минимально допустимое давление – это давление, при котором возможен последний пуск или маневр двигателя.

Сжатый воздух все шире применяется на современных судах для различных целей, несмотря на то, что затраты на его получение выше, чем затраты на получение других видов энергии.

#### **2.4.1.6 Системы выпускных газов**

Система газовыпуска служит для отвода продуктов сгорания от главных и вспомогательных двигателей и котлов.

В состав системы входят газовыпускные трубопроводы, глушители шума, искрогасители, компенсаторы температурных расширений, утилизационный котел и другие элементы.

По газовыпускной системе транспортируются газы, имеющие высокую температуру (150...500°C), обладающие токсичностью и несущие несгоревшие частички топлива в виде искр, способных вызвать пожар. Это заставляет предъявлять ряд специальных требований к газовыпускным системам при их проектировании и эксплуатации.

##### **Система выпускных газов главного двигателя.**

Выпускные газы, образующиеся при сгорании топлива в цилиндрах дизеля, направляются через выпускные клапаны с переменным давлением в коллектор, имеющий большой объем. В коллекторе сглаживается пульсация давлений и газы при постоянном давлении поступают в турбокомпенсатор. Для компенсации температурных деформаций элементов системы между выпускными клапанами и газовым коллектором и турбокомпрессором установлены компенсаторы (сальниковые, резинометаллические, линзовые).

Для предохранения попадания в турбину возможных обломков поршневых колец между коллектором и турбокомпрессором устанавливается защитная решетка.

По требованию Регистра коллектор выпускных газов и соединительные патрубки должны иметь тепловую изоляцию и обшиваться стальным листом.

Выпускные газы могут использоваться, кроме привода турбокомпрессора наддува, для приведения в действие утилизационного котла.

##### **Система газоотвода.**

После использования энергии выпускных газов в турбокомпрессоре и утилизационном котле они должны отводиться за борт.

Согласно «Правилам Регистра» каждый двигатель должен иметь отдельный газовыпускной трубопровод, который выводится на верхнюю палубу через общий кожух-трубу.

На судах специального назначения и катерах газоотвод может осуществляться через борт. В таких случаях газоотвод от двигателя разделяют на надводный и подводный.

Газовыпускные трубы крепят при помощи жестких опор и упругих пружинных подвесок, что обеспечивает свободные температурные расширения труб.

Для уменьшения шума выпуска в газовыпускном тракте устанавливают глушители (активные, реактивные).

На судах, перевозящих легковоспламеняющиеся грузы (танкеры, хлопковозы) обязательно устанавливаются искрогасители.

При установке утилизационных котлов глушители шума и искрогасители не устанавливаются, т.к. глушение и искрогашение происходит в котле.

## **2.4.2 Устройство судового нагнетателя**

### **Судовые нагнетатели**

Электроприводы нагнетателей являются основными потребителями электроэнергии. На их долю приходится около 50 % вырабатываемой электроэнергии судовой электростанции. Нагнетатели обеспечивают работу энергетической установки судна и общесудовых систем. Эти механизмы имеют весьма ответственное назначение и предназначены для обеспечения:

1. движения судна;
2. безопасности мореплавания;
3. сохранности перевозимых грузов;
4. улучшения обитаемости и бытовых условий экипажа судна.

Нагнетатели потребляют энергию от электропривода и сообщают ее рабочему телу - жидкости или газу. Эта энергия вызывает движение рабочего тела в трубопроводах, причем давление рабочего тела за нагнетателем больше, чем перед ним.

Другими словами, нагнетатели служат для перемещения жидкостей или газов и сообщения им энергии. Рабочее тело поступает в нагнетатель через всасывающий трубопровод с давлением. В нагнетателе рабочему телу сообщается энергия, и в нагнетательном (напорном) трубопроводе давление будет больше начального.

### **Разновидности судовых нагнетателей**

К судовым нагнетателям относятся: насосы, вентиляторы и компрессоры.

*Насос* — гидравлическая машина, преобразующая механическую энергию приводного двигателя или мускульную энергию (в ручных насосах) в энергию потока жидкости, служащая для перемещения и создания напора жидкостей всех



видов, механической смеси жидкости с твёрдыми и коллоидными веществами или сжиженных газов.

Разность давлений жидкости на выходе из насоса и присоединённом трубопроводе обуславливает её перемещение.

*Вентилятор* — устройство для перемещения газа со степенью сжатия менее 1,15 (или разностью давлений на выходе и входе не более 15 кПа, при большей разнице давлений используют компрессор).

Основное применение: системы принудительной приточно-вытяжной и местной вентиляции зданий и помещений, обдув нагревательных и охлаждающих элементов в устройствах обогрева и кондиционирования воздуха, а также обдув радиаторов охлаждения различных устройств.

Вентиляторы обычно используются как для перемещения воздуха — для вентиляции помещений, охлаждения оборудования, воздухоснабжения процесса горения (воздуходувки и дымососы). Мощные осевые вентиляторы могут использоваться как движители, так как отбрасываемый воздух, согласно третьему закону Ньютона, создает силу противодействия, действующую на ротор.

*Компрессор* — устройство промышленного применения для сжатия и подачи воздуха и других газов под давлением.

Общепринятая классификация механических компрессоров по принципу действия, под принципом действия понимают основную особенность процесса повышения давления, зависящую от конструкции компрессора. По принципу действия все компрессоры можно разделить на две большие группы: динамические и объёмные.

Разновидности насосов и их характеристики

*Насос* – устройство (гидравлическая машина) для напорного перемещения (всасывания и нагнетания) жидких сред (не только воды) или газов. Без насосного оборудования современная жизнь практически невозможна.

Достаточно сказать, что насосное оборудование потребляет 20% всей вырабатываемой в мире электроэнергии.

Основной характеристикой насоса является осуществляемая им объёмная подача воды - количество жидкости, перемещаемое за единицу времени, а также развиваемое давление или соответствующий ему напор (полное количество энергии, сообщаемое единице массы жидкости), потребляемая мощность и КПД. По сфере применения насосы разделяют на бытовые и промышленные.

Бытовые насосы используют для водоснабжения, отопления и канализации в жилых и производственных помещениях.

Промышленная насосная техника - это насосы для систем охлаждения, подачи воды в различных промышленных установках, установках для водоочистки, насосы для промывки под высоким давлением, перекачивания пищевых продуктов, подачи воды в котлы, повышения давления, для перекачивания нефти и нефтепродуктов, агрессивных сред в химических производствах и множества других специфических операций.

Существует множество типов насосов, различающихся по принципу действия и конструкции. Можно выделить два основных вида: насосы объемного действия и динамические насосы.

В объемных насосах рабочим органом является изменяющая объем камера и преобладают силы давления, принудительно перемещающие вещество.

Насосы объемного действия могут использоваться для перекачки вязких жидкостей. В этих насосах происходит одно преобразование энергии - энергия двигателя непосредственно преобразуется в энергию жидкости. Это высоконапорные насосы, они чувствительны к загрязнению перекачиваемой жидкости. Рабочему процессу в объемных насосах присуща высокая вибрация, поэтому для них необходимы массивные фундаменты. Однако преимуществом таких насосов можно считать способность к сухому всасыванию (самовсасыванию).

К насосам объемного типа относятся:

1. роторные насосы - общее название насосов, которые перемещают жидкости при движении роторов, кулачков/клиньев, винтов, лопастей/лопаток или похожих деталей в фиксированном корпусе;

2. шестеренные насосы - простой тип насосов с принудительным смещением, которое вызывается изменением объемов в полостях сцепленных между собой шестерен;

3. импеллерные насосы - в которых рабочее колесо с лопастями из эластичного материала вращается внутри эксцентрического корпуса, что приводит к сгибанию лопастей и вытеснению жидкости;

4. кулачковые насосы - в которых жидкость перемещается внутри рабочей камеры насоса благодаря вращению двух независимых роторов. Благодаря высокой точности изготовления корпуса насоса и роторов между ними находятся малые зазоры, препятствующие противотоку жидкости внутри насоса. Такие насосы могут перекачивать жидкости с большими включениями (например, джем с целыми ягодами) и поэтому широко применяются в производстве продуктов питания, напитков, молочных продуктов, фармацевтической промышленности;

5. перистальтические насосы - рабочим элементом в этих насосах является гибкий многослойный рукав из эластомера. Двигатель вращает вал с башмаками (роликами), которые пережимают рукав насоса, перемещая жидкость внутри рукава;

6. винтовые насосы - в которых металлический ротор винтообразной формы находится внутри статора, сделанного из эластомера. При вращении ротора изменяется объем полостей внутри пары ротор-статор и жидкость, вытесняясь из-за вращения ротора, перемещается по оси насоса.

В динамических насосах преобладают динамические силы. Для них характерно двойное преобразование энергии, они обладают равномерной подачей и уравновешенностью рабочего процесса. В отличие от объемных насосов, они не способны к самовсасыванию.

К динамическим насосам относятся:

1. центробежные насосы - в них рабочим органом насоса является рабочее колесо, при прохождении через которое увеличиваются кинетическая энергия жидкости (увеличивается скорость) и потенциальная энергия давления;
2. вихревые насосы - аналогичны центробежным, отличаются малыми габаритами и массой. Недостатками таких насосов являются низкий КПД, не превышающий в рабочем режиме 45%, и непригодность для подачи жидкости, содержащей абразивные частицы (так как это приводит к быстрому изнашиванию стенок торцевых и радиальных зазоров);
3. струйные насосы - разделяются на водоструйные (гидроэлеваторы), принцип действия которых основан на передаче кинетической энергии рабочей жидкостью перекачиваемому веществу и эрлифты, в которых подается сжатый воздух от компрессора и водовоздушная смесь двигается благодаря подъемному действию пузырьков воздуха.

### 2.4.3 Механизмы рулевых устройств

Рулевое устройство (рисунок 2.42) обеспечивает судну управляемость и состоит из четырех дополняющих одна другую частей, каждая из которых выполняет определённое назначение. Руль 1 воспринимает давление воды и изменяет направление движения судна. Рулевой привод 2 связывает руль с рулевой машиной и передает вращающий момент, необходимый для поворота баллера. Рулевая машина (двигатель) 3 создает усилие и обеспечивает работу рулевого привода. Цилиндрическая передача (телемотор) 4 связывает рулевую машину с постом управления судна.

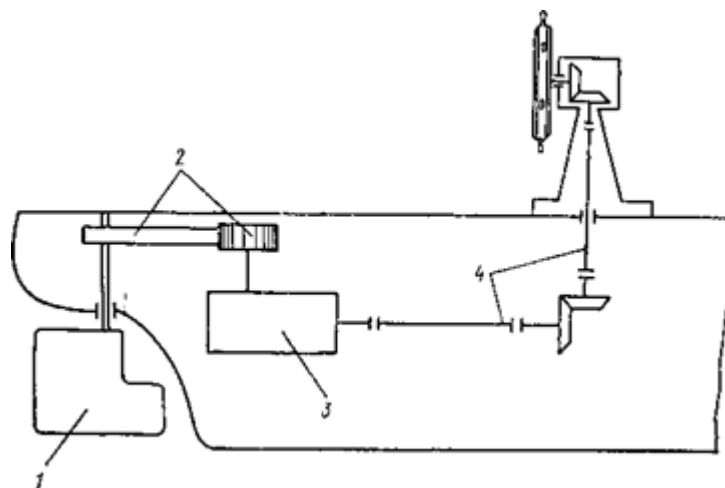


Рисунок 2.42 - Принципиальная схема рулевого устройства.

Рулевые приводы подразделяются на две группы: приводы с гибкой связью (штуртросные, цепные) и приводы с жесткой связью (зубчатые, гидравлические, винтовые).

Рулевые машины могут быть ручными, паровыми, электрическими и электрогидравлическими. Ручные рулевые машины устанавливают на маломерных судах. Паровые рулевые машины распространены на паровых судах. Широкое

распространение на всех судах получили электрические рулевые машины. При больших значениях вращающего момента, возникающего на баллере руля при перекладке (на БМРТ, плавбазах), применяют электрогидравлические рулевые машины.

Телемоторы бывают механические (валиковые, стержневые, тросовые), электрические и гидравлические. Наиболее часто встречаются электрические и гидравлические телемоторы.

Рассмотрим принципиальные схемы рулевых устройств с различными рулевыми приводами, рулевыми машинами и телемоторами, применяемые на промысловых судах.

Рулевое устройство с зубчатым секторным приводом, электрической рулевой машиной и электрическим телемотором показано на рисунке 2.43.

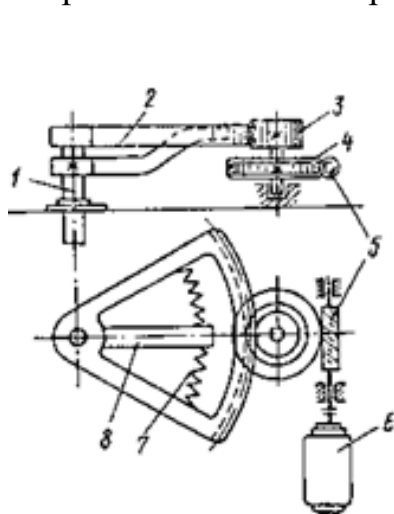


Рисунок. 2.43 - Рулевое устройство  
с гидравлическими элементами

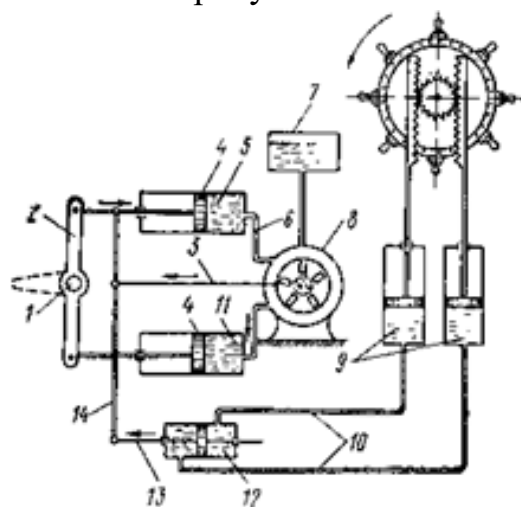


Рисунок 2.44 - Схема рулевого  
устройства с зубчатым секторным  
приводом

С ходового мостика команда (импульс) через электрическую дистанционную систему (телемотор) передается на электродвигатель 6, который начинает вращаться в ту или другую сторону. Электромотор через передачу, состоящую из червяка 5 и червячной шестерни 4 вращает цилиндрическую шестерню 3. Шестерня 3 входит в зацепление с зубьями сектора 2, свободно посаженного на баллер 1. Вращение шестерни вызывает поворот зубчатого сектора, который, воздействуя через буферные пружины 7 на румпель 5, осуществляет перекладку руля.

На рисунке 2.44 изображена схема рулевого устройства транспортного рефрижератора типа «Яна», у которого рулевой привод, рулевая машина и телемотор — гидравлические.

Румпель 2, посаженный на баллере 1, шарнирно соединен со штоками поршней прессов 5 рулевого привода. Полости рабочих Цилиндров прессов 5 и 11

трубопроводами 6 связаны с насосом 8 рулевой машины, получающим привод от электродвигателя. Телемотор состоит из датчиков 9, установленных в рулевой рубке, и приемника 12, находящегося в румпельном отделении. Датчики и приемник связаны трубопроводами 10. Шток 13 приемника связан с рычагом 14, верхний конец которого шарнирно соединен со штоком пресса 5. К этому рычагу прикреплен левый конец тяги 3 управления насосом. Для компенсации утечек жидкости из насоса и из прессов привода предусмотрен бачок 7.

Насос 8 рулевой машины устроен таким образом, что дает возможность при одной и той же частоте вращения (от электродвигателя) подавать жидкость в разных направлениях и с различной производительностью (либо к прессу 5, либо к прессу 11) в зависимости от положения тяги 3.

При повороте штурвала, например, против часовой стрелки поршень приемника 12 будет перемещаться влево и отклонять влево нижний конец рычага 14. В результате тяга 3, перемещаясь влево, установит регулирующий орган насоса 8 в такое положение, что насос начнет отсасывать жидкость из полости пресса 5 и нагнетать ее в полость пресса 11. Поршни 4, перемещаясь в разные стороны, разворачивают румпель 2\ происходит перекладка руля. Вместе с верхним поршнем 4 вправо будет перемещаться верхний конец рычага 14, который через тягу 3 стремится установить регулирующий орган насоса в первоначальное (нейтральное) положение.

Когда поворот штурвала закончится, тяга 3 установит регулирующий орган насоса в нейтральное положение и перекладка руля прекратится. Если продолжать поворачивать штурвал, то шток 13 и нижнее плечо рычага 14 будут отклоняться вместе с тягой 3 влево и руль, как мы выяснили ранее, будет перекадываться.

При повороте штурвала по часовой стрелке тяга 3 переместится вправо и насос начнет перекачивать жидкость из полости 11 в полость 5. Руль будет перекадываться в обратную сторону. Такая система управления называется следящей.

#### **2.4.4 Якорно-швартовные, грузовые и буксирные механизмы**

Якорные и швартовные механизмы.

Якорно-швартовные механизмы входят в состав якорного и швартовного устройств. Якорное устройство состоит из станковых якорей, якорных цепей, стопоров для крепления станковых якорей по-походному, механизма для крепления и отдачи коренного конца якорной цепи и механизмов для отдачи и подъема станковых якорей с якорными цепями, а также для удержания на месте судна при отданных станковых якорях. Швартовное устройство обеспечивает подтягивание судна к береговым или плавучим причальным сооружениям и надежное крепление к ним. В состав швартовного устройства входят комплект тросов(швартовов) для швартовки.

На судах флота рыбной промышленности применяют якорные, швартовные и якорно-швартовные механизмы. Конструктивно они делятся на три вида: брашпили, шпили, якорные и швартовные лебедки. Приводы у них могут быть паровые, электрические или гидравлические. На отечественных рыбопромысловых судах распространены якорно-швартовные брашпили с электрическим приводом.

Кинематическая схема электроручного брашпиля, устанавливаемого на средних рыболовных траулерах, показана на рисунке 2.45.

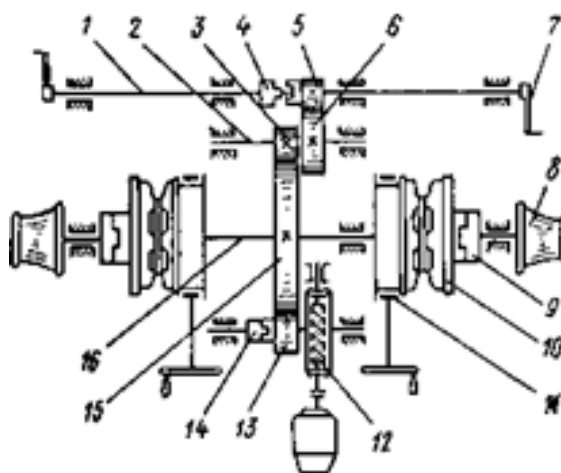


Рисунок 2.45 - Кинематическая схема электробрашпиля СРТ

На грузовом валу 16 неподвижно закреплены приводная шестерня 15 и турочки 8, служащие для выбора швартова. Рабочие звездочки 10 установлены на валу свободно, но могут включаться, т. е. соединяться с валом, при помощи кулачковых муфт 9. Рабочие (цепные) звездочки снабжены ленточными тормозами И.

Грузовой вал получает вращение от электродвигателя через червячный редуктор 12 и пару цилиндрических шестерен 13 и 15. Шестерни посажены на валике редуктора свободно и включаются кулачковой муфтой 14. Ручной привод брашпиля состоит из рукояток 7, валика 1, шестерен 3, 5, 6 и промежуточного валика 2. Шестерня 3 промежуточного валика постоянно находится в зацеплении с шестерней 15. Шестерня 5 сидит на валике свободно. Для подъема якоря вручную муфту 4 включают, а муфту 14 выключают.

Для выбора носовых швартовов обычно пользуются брашпилем. Кормовые швартовы выбирают шпилем; кроме того, кормовой шпиль можно использовать для подъема кормового якоря. Шпили получили свое название от того, что рабочий вал (или баллер) их всегда выполняется вертикальным. По конструктивному исполнению шпили подразделяются на баллерные и безбаллерные. У баллерных шпилей грузовой барабан закреплен на баллере, а привод вынесен отдельно. У безбаллерных шпилей привод размещен внутри барабана. Эти шпили более компактны и требуют меньшей площадки для размещения.

По способу установки шпили подразделяются на одно- и двухпалубные. Само название показывает, что в первом случае весь механизм шпиля

устанавливают на одной палубе, а во втором случае привод выносится на палубу, расположенную ниже. Для привода шпилей применяются паровая машина, электро- и гидроприводы. Ручной привод используется обычно в качестве запасного и выполняет роль основного лишь у маломощных шпилей.

На рисунке 2.46 показана схема электроручного баллерного однопалубного якорно-швартовного шпиля. На баллере 4 неподвижно закреплен швартовный барабан 5, составляющий одно целое со звездочкой для якорной цепи. На валу электродвигателя 10 находится червяк 11, сцепленный с червячным колесом 9. На валу червячного колеса установлена шестерня 12, сцепленная с колесом 1, приводящим во вращение баллер. Вращение баллера 4 передается барабану 5 и звездочке, свободно надетым на баллер, через головку 7 и закладные штыри 6.

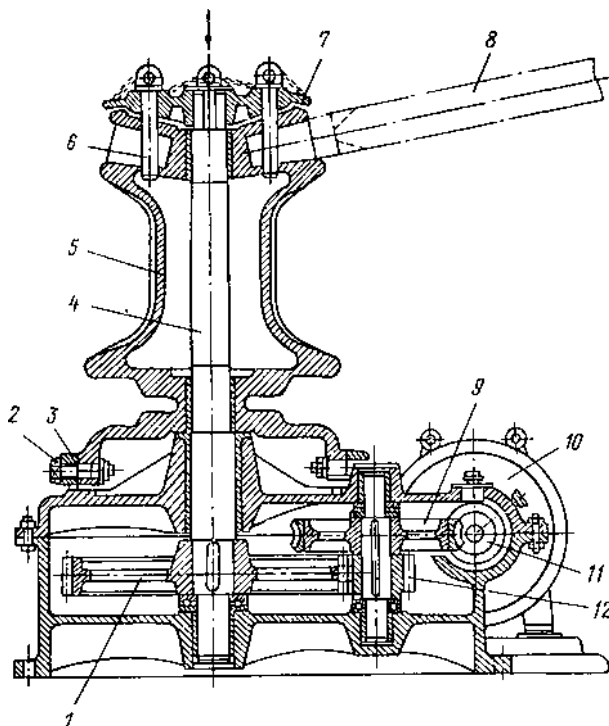


Рисунок 2.46 - Якорно-швартовный шпиль.

Ручной привод шпиля осуществляется от вымбовок 8. Для перехода на ручной привод нужно вынуть закладные штыри 6 и опустить палы 3, свободно посаженные на пальцах 2, так чтобы концы пал, упираясь в выемки на корпусе червячной передачи, препятствовали обратному вращению барабана и звездочки.

### **Обслуживание якорно-швартовных механизмов**

Перед приготовлением механизма к действию необходимо произвести его наружный осмотр, убедиться в исправности деталей и в отсутствии посторонних предметов, мешающих работе механизма. Необходимо отключить ручной привод, зажать ленточный тормоз, отключить цепную звездочку или барабан. Якорная цепь должна быть чистой и ровно лежать на звездочке.

После подготовки привода к действию производят пробные пуски механизма на холостом ходу. Если все исправно, цепная звездочка или барабан вводится в

зацепление кулачковой либо фрикционной муфтой, и на мостик сообщают о готовности механизма к действию.

Во время работы электроприводного механизма необходимо следить за показаниями амперметра и за отсутствием шумов и стуков при паровом приводе. Состояние тормозов и их нагрев, а также вмазку механизма периодически контролируют. Если глубина стоянки превышает 50 м, отдают якорь с помощью привода брашпиля или шпиля, пока до грунта не останется 30 м. Дальнейшая отдача якоря, а также отдача его на глубинах менее 50 м происходит под действием веса якоря и якорной цепи на ленточном тормозе. Муфта сцепления цепной звездочки или барабана должна быть отключена. Подъем якоря производится при включенной цепной звездочке и ослабленном ленточном тормозе.

Инспекция Регистра ежегодно осматривает якорные и швартовные механизмы. Раз в четыре года производятся очередные классификационные осмотры, которые обычно приурочивают к постановке судна в док.

Перед каждым выходом в рейс необходимо проверять состояние якорного устройства и действие стопорных и тормозных приспособлений. При длительном бездействии (во время стоянки, промысла и на длительных переходах) брашпиль (шпиль) надо проворачивать без нагрузки. Износ якорных цепей не должен превышать 10% по диаметру (калибру). В случае обнаружения на звеньях якорной цепи трещин или ослабления контрфорсов смычки с такими дефектами следует заменить.

Перед выходом судна в рейс швартовные механизмы должны быть смазаны и опробованы в действии. Они должны иметь исправные и надежно действующие тормозные и стопорные приспособления, не допускающие самопроизвольного стравливания швартовов. Если у стальных швартовных тросов обнаружены лопнувшие проволоочки (более 10,% от их общего количества по длине троса, равной восьми диаметрам), тросы необходимо заменить.

Не разрешается выход судна в море при наличии неисправностей брашпиля, препятствующих подъему или отдаче якоря, при проскакивании звеньев якорной цепи на звездочке во время отдачи и подъема якорей, при неисправных ленточных тормозах, когда они недостаточно надежно зажимают цепные звездочки, при неисправных  
разобщительных муфтах, не обеспечивающих включение и выключение цепных барабанов.

#### **2.4.5 Грузовые механизмы**

К грузовым механизмам относятся грузовые, шлюпочные лебедки и краны, которые в сочетании со стрелами осуществляют подъем, наклонное и горизонтальное перемещение грузов и судового оборудования, орудий лова, а также погрузку-выгрузку промыслового снаряжения, рыбы и рыбной продукции.



Грузовые лебедки на современных судах выполняются с электро- /или гидроприводом, а на паровых судах старой постройки— с паровым приводом. Характеристиками лебедки служат ее грузоподъемность (в т) и скорость подъема груза (в м/с).

В зависимости от грузоподъемности лебедки выполняют одно-, двух- и трехскоростными. Чем тяжелее поднимаемый груз, тем меньше скорость подъема.

Отечественные электроприводные лебедки обозначаются условно ЛЭГр, а паропроводные — ЛГСП с добавлением цифрового индекса. Например, ЛЭГр 5/3 означает, что лебедка — электрическая грузовая, двухскоростная, сможет поднимать груз 5 и 3 т (в системе СИ соответственно 49 и 29,4 кН).

Схема электрической грузовой лебедки большого морозильного траулера показана на рисунок 2.47.

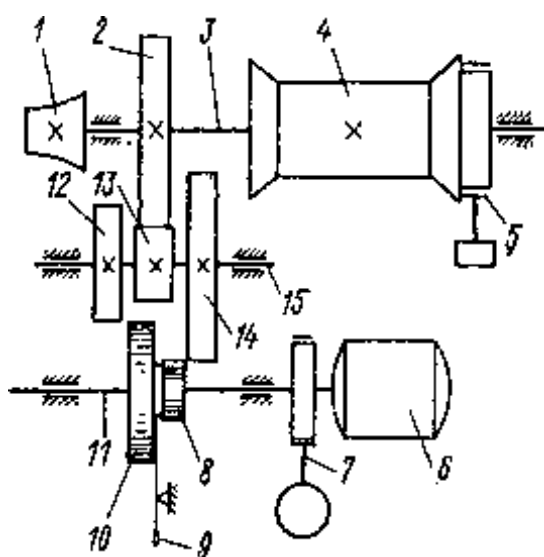


Рисунок 2.47 - Схема электрической грузовой лебедки.

На грузовом валу 3 посажены грузовой барабан 4 с ленточным тормозом 5, оборудованным ножной педалью, приводное зубчатое колесо 2 и турочка 1 для выполнения вспомогательных операций. Электродвигатель 6 через муфту соединен со шлицевым валиком 11, на котором посажен подвижный блок из шестерен 8 и 10. Блок может перемещаться по шлицевому валику при помощи вильчатого рычага и рукоятки 9. Соединительная муфта электродвигателя одновременно служит шкивом для электромагнитного тормоза 7. На промежуточном валу 15 жестко закреплены шестерни 12 и 14 и приводная шестерня 13.

Пуск лебедки в ход производится включением электродвигателя. Одновременно ток поступает на электромагнитный тормоз, растормаживающий вал двигателя.

Лебедка обеспечивает два режима работы. При зацеплении шестерен 8 и 14 будет обеспечиваться меньшая скорость, но большая грузоподъемность, а при зацеплении шестерен 10 и 12 грузоподъемность уменьшится, но скорость подъема груза возрастет. Переключение скоростей можно осуществлять только при остановленной лебедке и отсутствии груза на гаке. Ленточный тормоз 5 служит для

притормаживания грузового барабана во время работы лебедки. Электромагнитный тормоз 7 предотвращает обратное проворачивание лебедки в случае обесточивания электродвигателя.

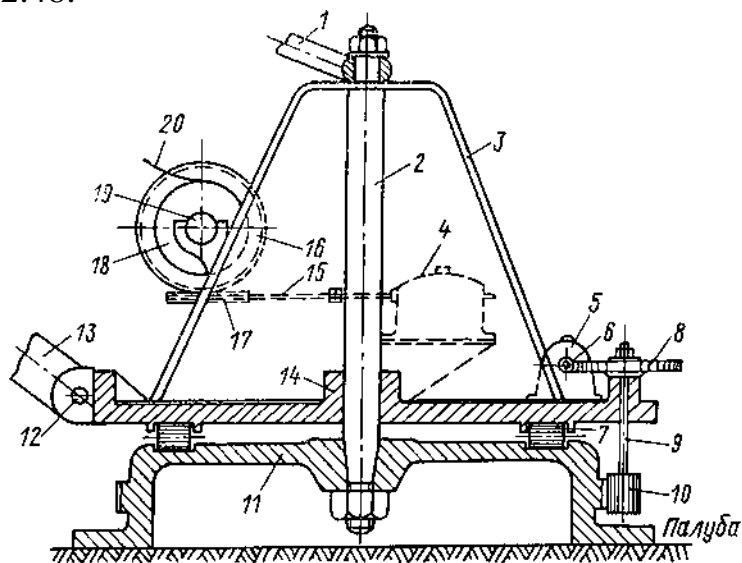


Рисунок 2.48 - Схема механизмов электрического грузового поворотного крана

На литой фундаментной плите 11, крепящейся к набору корпуса, неподвижно установлен баллер 2. Вокруг баллера может вращаться на катках 7 поворотная платформа 14. На поворотной платформе с помощью пальцев 12 шарнирно закреплены стрела 13 с постоянным вылетом, механизм подъема груза, механизм поворота и кабина 3. Так как стрела имеет постоянный вылет, который определяется двумя оттяжками У, механизм изменения вылета отсутствует.

Механизм подъема конструктивно представляет собой обыкновенную односкоростную электрическую лебедку с электродвигателем 4, вращение которого передается через вал 15, червяк 17 и червячную шестерню 16 грузовому валу 19, лежащему в подшипниках кронштейнов. На вал 19 жестко насажен

барабан 18 с намотанным концом грузового шкентеля 20. Второй конец шкентеля через направляющие и грузовые блоки прикреплен к грузовому гаку.

Механизм поворота обслуживается электродвигателем 5, вращение от которого через червяк 6, червячное колесо 8 и вал 9 передается цилиндрической шестерне 10. Шестерня находится в зацеплении с круговым зубчатым венцом фундаментной плиты и при вращении, обкатываясь вокруг него, поворачивает платформу. Механизм поворота снабжен педальным тормозом.

Управление краном осуществляется двумя контроллерами, установленными на посту управления, размещенном в кабине.

Основное назначение шлюпочных лебедок — быстрый и безопасный спуск и подъем шлюпок. Спускаются шлюпки под действием собственного веса на тормозе, подъем производится на приводе.

Для обслуживания шлюпок весом до 5 кН (0,5 т) обычно применяют ручные лебедки, для подъема более тяжелых шлюпок — электроприводные лебедки с запасным ручным приводом.

По конструктивному исполнению шлюпочные лебедки подразделяются на одно- и двух барабанные, одинарные и сдвоенные. Одинарные лебедки обслуживают одну шлюпку, сдвоенные — две. Передачи в лебедках — зубчатые цилиндрические и червячные.

На рисунке 2.49 дана кинематическая схема электрической двух барабанной шлюпочной лебедки.

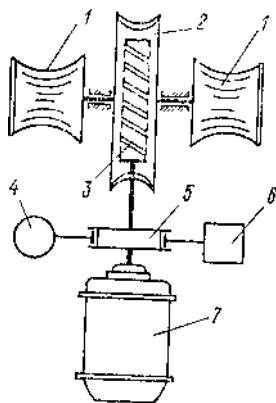


Рисунок 2.49 - Кинематическая схема электрической шлюпочной лебедки.

Вращение от электродвигателя 7 через соединительную муфту передается червяку 3, который вращает червячное колесо 2 и находящиеся на одном валу с ним барабаны 1 с намотанным шкентелем талей шлюпочного устройства. Соединительная муфта одновременно является шкивом ленточного тормоза 5. При подъеме шлюпки, когда электродвигатель работает, соленоид 4 удерживает ленту тормоза 5 в отжатом состоянии. Если по каким-либо причинам цепь обесточится, действие соленоида прекратится, груз 6 опустится и затянет ленту тормоза, барабаны остановятся.

### Контрольные вопросы:

1. Назовите признаки, по которым классифицируют судовые системы.

2. Перечислите признаки, по которым классифицируют судовые насосы. Назовите особенности различных типов насосов, охарактеризуйте области их применения.

3. Основные параметры центробежного насоса.

4. Классификация рулевых машин, их особенности и влияние на надежность эксплуатации судна.

5. Охарактеризуйте конструкцию якорных и якорно-швартовых устройств.

Литература [3, 4, 5, 6, 8, 9]

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овсянников, М. К., Петухов, В. А. Судовые автоматизированные энергетические установки: Учебник для высш. инж. мор. уч-щ. / М.К. Овсянников, В.А. Петухов. — М.: Транспорт, 1989. — 256 с.
2. Прохоренков, А.М. Системы управления судовыми энергетическими процессами: учебник/ А.М. Прохоренков. - М.: МОРКНИГА, 2017. — 443 с.
3. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года (ПДНВ-78) с поправками (консолидированный текст): - СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2016. — 824 с.
4. Сизых, В.А. Судовые энергетические установки: учебник. / В.А. Сизых. - М.: Транслит, 2006. — 352 с.
5. Петриченко, А.Д., Калиниченко, А.Г., Грузберг, Я.Ю. Судовые энергетические установки, вспомогательные и рыбопромысловые механизмы. / А.Д. Петриченко, А.Г. Грузберг, Я.Ю. Грузберг. — Л.: Судостроение, 1971. - 288 с.
6. Лебедев, О. Н., Калашников, С. А. Судовые энергетические установки и их эксплуатация: Учебник для вузов водн. трансп. / О.Н. Лебедев, С.А. Калашников. — М.: Транспорт, 1987. — 336 с.
7. Тейлор, Д. А. Основы судовой техники. Пер. с англ. / Д.А. Тейлор. — М.: Транспорт, 1987. — 320 с.
8. Акимов, П. П. Судовые автоматизированные энергетические установки: Учебник для вузов морск. трансп. / Д.А. Тейлор. — М.: Транспорт, 1980. — 352 с.
9. Голиков, С.П. Судовые энергетические установки и электрооборудование судов: конспект лекций / С.П. Голиков. — Керчь: КГМТУ — 2012. — 211 с

Железняк Александр Александрович

## **Судовые энергетические установки**

Учебное пособие

для курсантов специальности 26.05.07 Эксплуатация судового  
электрооборудования и средств автоматики (специализация: Эксплуатация  
судового электрооборудования и средств автоматики) и направления  
бакалавриата 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (профиль  
«Электрооборудование и автоматика судов»)  
очной и заочной форм обучения

Тираж \_\_\_\_ экз. Подписано к печати \_\_\_\_.

Заказ № \_\_\_\_ . Объем 6,65 п.л.

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический  
университет»

298309 г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82.