

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

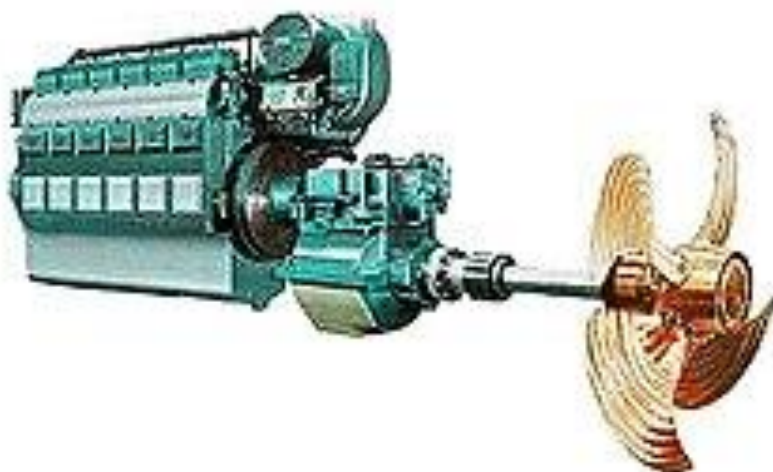
МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

Кафедра "Энергоустановки морских судов и сооружений"

С.Е. Тверская

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Учебно-методическое пособие
по проведению практических занятий



Севастополь
СевГУ
2025

УДК 621.431.74(076.5)

ББК 39.455.5-5*я73

T26

Р е ц е н з е н т:

А.Ю. Гаршин - канд. техн. наук, доцент кафедры ЭМСС

Тверская, С.Е.

T26 Судовые энергетические установки : учебно-методическое пособие по проведению практических занятий для студентов специальности 26.05.07 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» / С.Е. Тверская; Севастопольский государственный университет, Морской институт, кафедра "Энергоустановки морских судов и сооружений". – Севастополь: СевГУ, 2025. – 81 с. – Текст : электронный.

Целью учебно-методического пособия является помощь студентам в выработке навыков применения теоретических знаний для решения конкретных технических задач, связанных с эксплуатацией СЭУ.

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения Севастопольского государственного университета, Морского института, специальности 26.05.07 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики».

УДК 621.431.74(076.5)

ББК 39.455.5-5*я73

Рассмотрено и рекомендовано на заседании кафедры «Энергоустановки морских судов и сооружений» Морского института Севастопольского государственного университета в качестве учебно-методического пособия по проведению практических занятий по дисциплине «Судовые энергетические установки» для студентов специальности 26.05.07 – Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики, протокол № 6 от 5 февраля 2025 г.

© Тверская С.Е., 2025

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Основные показатели СЭУ.....	5
Контрольные вопросы.....	11
2. Конструктивные элементы ПТУ. Конструкция главных паровых котлов.....	12
Контрольные вопросы.....	15
3. Конструктивные элементы ПТУ. Конструкция паровой турбины и конденсационной установки.....	16
Контрольные вопросы.....	21
4. Конструктивные элементы ГТУ. Устройство и принцип действия компрессора, газовой турбины и камеры сгорания..	22
Контрольные вопросы.....	26
5. Способы повышения экономичности ГТУ.....	27
Контрольные вопросы.....	30
6. Принцип действия и устройство ДВС. Конструкция двухтактных, четырехтактных, тронковых и крейцкопфных ДВС.....	31
Контрольные вопросы.....	41
7. Схемы наддува ДВС.....	42
Контрольные вопросы.....	47
8. Вспомогательные механизмы.....	48
Контрольные вопросы.....	56
9. Расчет запасов топлива и смазочного масла.....	57
Контрольные вопросы.....	59
10. Схемы топливных систем СЭУ.....	60
Контрольные вопросы.....	64
11. Схемы масляных систем СЭУ.....	65
Контрольные вопросы.....	68
12. Схемы систем охлаждения СЭУ.....	69
Контрольные вопросы.....	71
13. Схемы систем сжатого воздуха, пуска и газовойпуска.....	72
Контрольные вопросы.....	75
14. Элементы судового валопровода.....	76
Контрольные вопросы.....	80
ЛИТЕРАТУРА	81

ВВЕДЕНИЕ

Целью изучения дисциплины «Судовые энергетические установки» студентами специальности 26.05.07 "Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики" является получение необходимых теоретических знаний и практических навыков в области устройства и основ эксплуатации судовых энергетических установок в рамках профессиональной подготовки судовых инженеров-электромехаников.

Судовой энергетической установкой (СЭУ) называется комплекс технических средств, предназначенный для выработки, преобразования, передачи и использования различных видов энергии для безопасного и эффективного функционирования судна в соответствии с его типом, назначением и нормальными условиями жизнедеятельности экипажа и пассажиров.

СЭУ состоит из главной энергетической установки (ГЭУ), вспомогательной энергетической установки (ВЭУ) и электроэнергетической установки (ЭЭУ). В состав СЭУ входят также обслуживающие ее системы, включающие вспомогательные механизмы и оборудование.

Целью учебно-методического пособия является ознакомление студентов с конструкцией элементов, входящих в состав СЭУ, схемами обслуживающих ее систем и особенностями расчетов запасов топлива и масла за рейс судна.

Именно практическая часть дисциплины в наибольшей степени способствует выработке навыков применения теоретических знаний для решения конкретных технических задач, связанных с эксплуатацией СЭУ.

Каждый раздел пособия содержит краткие теоретические сведения и контрольные вопросы для самопроверки знаний.

1. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СЭУ

Краткие теоретические сведения

Для возможности оценки и сравнения энергетических установок различных типов пользуются рядом показателей, к которым относятся следующие.

Мощностные показатели

Применительно к двигателю мощность представляет собой работу, совершаемую двигателем в единицу времени. В соответствии с Международной системой единиц СИ за единицу мощности принят ватт (Вт).

$$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с.}$$

В энергетических установках в качестве единиц мощности принимают 1 киловатт (кВт) = 1000 Вт и 1 лошадиную силу (л.с.) = 736 Вт.

Различают следующие виды мощностей.

1. *Эффективную мощность главного двигателя* $N_e^{ГД}$, снимаемую на выходном фланце двигателя.

2. *Мощность, передаваемую валопроводу* N_e^V :

$$N_e^V = N_e^{ГД} \eta_{П}.$$

3. *Мощность, подводенную к движителю* N_B^V :

$$N_B^V = N_e^{ГД} \eta_{П} \eta_{ВП}.$$

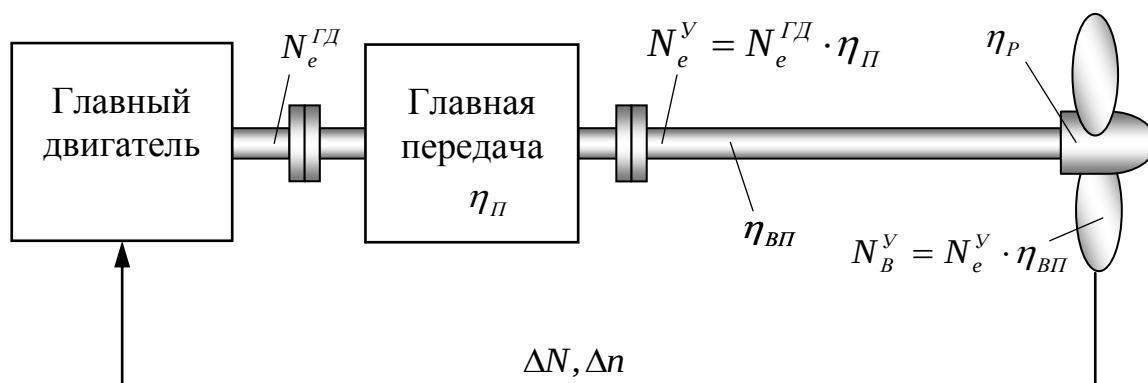


Рисунок 1.1 – Структурная схема передачи мощности от двигателя к движителю:

$\eta_{П}, \eta_{ВП}$ – КПД главной передачи и валопровода; Δn – изменение оборотов движителя; ΔN – изменение мощности двигателя.

Для судна в целом используется такой показатель, как *буксировочная мощность* или *мощность полезной тяги*:

$$N_R = Rv = N_e^{ГД} \eta_{П} \eta_{ВП} \eta_{ГВ} \eta_{К},$$

где R – сила сопротивления движению судна, Н;

v – скорость движения судна, м/с;

$\eta_{ГВ}$ – КПД гребного винта;

η_K – коэффициент влияния корпуса судна на работу винта.

Относительные мощностные показатели

К этим показателям относят следующие.

Энергонасыщенность судна (отношение мощности ГЭУ к водоизмещению судна):

$$\alpha_N = \frac{N_e^y}{D}, [\text{кВт/т}],$$

где D – полное водоизмещение судна, т.

Относительную мощность ЭЭУ (отношение мощности электроэнергетической установки к мощности ГЭУ):

$$\alpha_{\mathcal{E}} = \frac{N_{e\mathcal{E}У}}{N_e^y}.$$

Показатели экономичности

Экономичность характеризует способность СЭУ обеспечить максимальную дальность плавания судна при минимальных затратах топлива.

Различают следующие показатели экономичности:

часовой расход топлива – $B_{\text{ч}}$, [кг/ч];

удельный расход топлива

$$b_e = \frac{B_{\text{ч}}}{N_e^y + N_{\text{ВМ}}^{\text{ГЭУ}} + N_{\text{ОП}}}, [\text{кг/кВт}\cdot\text{ч}];$$

где $N_{\text{ВМ}}^{\text{ГЭУ}}$ и $N_{\text{ОП}}$ – мощности, необходимые для работы вспомогательных механизмов ГЭУ и общесудовых потребителей;

эффективный КПД установки

$$\eta_e = \frac{3600}{Q_{\text{н}} b_e},$$

где $Q_{\text{н}}$ – теплотворная способность топлива, под которой понимают количество тепла, выделяющегося при полном сгорании 1 кг топлива, кДж/кг (среднее значение $Q_{\text{н}} = 42000$ кДж/кг).

На практике часто применяется показатель, который характеризует не только качество СЭУ, но и свойства пропульсивного комплекса «корпус – движитель – двигатель».

Этим показателем является *расход топлива на милю*:

$$B_M = \frac{b_e N_e^y}{v}, [\text{кг/милю}],$$

где v – скорость судна, узел = миля/ч (1 миля = 1,852 км).

Все экономические показатели зависят от мощности СЭУ, развиваемой на данном ходовом режиме. Характер изменений экономических показателей ЭУ в зависимости от относительной мощности СЭУ ($\overline{N_e^y} = N_e^y / N_{eном}^y$) показан на рисунке 1.2. Из графиков зависимостей видно, что максимум КПД установки η_e и минимум удельного расхода топлива b_e , а следовательно, наиболее высокая экономичность, соответствует нагрузкам в пределах 80 - 100 % от номинальной. Расход топлива на милю B_M имеет минимальное значение при значительно меньших нагрузках и соответствует скорости, называемой *экономической* $v_{эк}$. Судно, двигаясь с этой скоростью, пройдет наибольший путь при заданном запасе топлива.

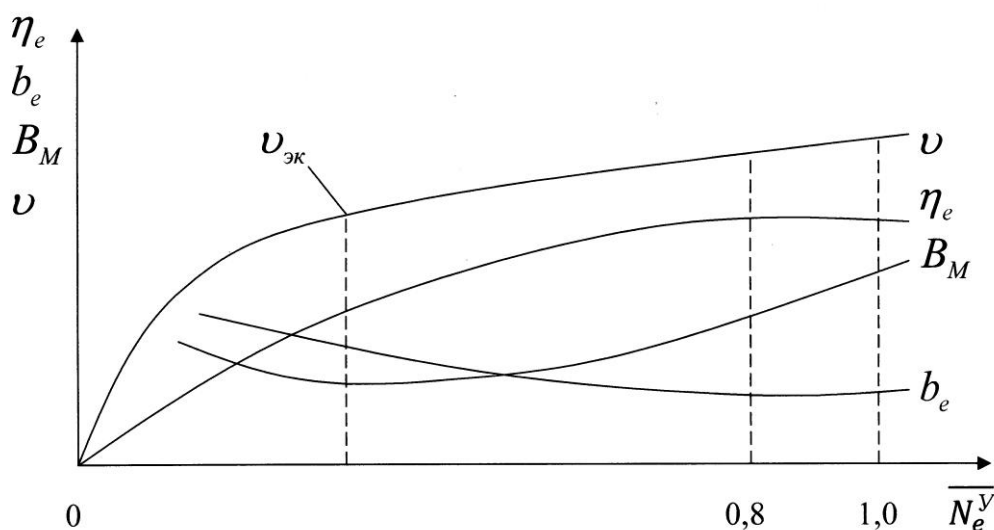


Рисунок 1.2 – Зависимость экономических показателей ЭУ от ее мощности.

Показатели автономности

Под *автономностью* СЭУ понимается суммарная продолжительность ходовых и стояночных режимов работы, обеспечиваемая запасами топлива, масла и технической воды:

Автономность судна может быть представлена в виде:

$$\tau = \sum \tau_x + \sum \tau_{ст}, \text{ суток}$$

где $\sum \tau_x$ – продолжительность ходовых режимов;

$\sum \tau_{ст}$ – продолжительность стояночных режимов.

Продолжительность ходовых режимов определяется из соотношения:

$$\tau_x = \frac{S}{v \cdot 24}, \text{ суток,}$$

где S – дальность плавания в милях;

v – скорость судна в узлах.

Характер и относительная продолжительность режимов работы СЭУ определяют различную автономность при одних и тех же энергетических запасах.

Массогабаритные показатели

Масса и габариты СЭУ оказывают прямое влияние на основные показатели судна – скорость, дальность плавания, грузоподъемность и пр.

Абсолютные показатели массы

К абсолютным показателям массы относятся следующие.

Масса сухой установки: G_c [кг] – это масса всех двигателей, механизмов, устройств, трубопроводов и других элементов установки без рабочих жидкостей. Сухая масса установки определяется путем взвешивания всех перечисленных элементов при их погрузке на судно или, как теоретическая масса, рассчитывается по чертежам.

Масса установки в рабочем состоянии, то есть масса установки, приготовленной к действию (с водой, топливом, маслом во всех элементах установки и трубопроводах):

$$G_p = G_c + G_{pt}, [\text{кг}],$$

где G_{pt} – масса рабочих тел.

Полная масса установки, то есть масса установки со всеми запасами топлива, масла и воды:

$$G_y = G_p + G_z, [\text{кг}],$$

где G_z – масса судовых запасов.

Относительные показатели массы

Отношение массы установки к ее мощности называют *удельной массой установки*:

$$g_y = \frac{G_y}{N_e}, [\text{кг/кВт}].$$

Габаритные показатели

Основными габаритными показателями СЭУ являются: длина помещений, занимаемых установкой (длина машинного отделения) L_{MO} , площадь F_{MO} и объем V_{MO} МО.

Габаритные показатели СЭУ определяются типом установки, ее мощностью, а также видом главной передачи.

При проектировании СЭУ следует по возможности уменьшать ее габаритные показатели, чтобы наибольшую часть вместимости судна использовать полезно (для перевозки грузов и пассажиров). Однако необходимо предусматривать возможность удобного обслуживания механизмов и нормальные условия обитаемости в МО. В связи с этим правилами Российского морского регистра судоходства нормируются некоторые предельные расстояния. Например, проходы между механизмами должны быть не менее 0,7 м, свободные проходы у постов управления двигателями – не менее 1,2 м.

Одним из возможных путей уменьшения габаритов МО является применение таких установок, у которых основная часть вспомогательного оборудования навешена на главные двигатели (имеют от них привод). В этом случае сокращаются магистрали, уменьшаются затраты электроэнергии, габариты и вес установок.

Показатели надежности

Надежностью называется способность СЭУ сохранять эксплуатационные показатели в заданных пределах на всех режимах в течение определенного времени.

К основным показателям надежности относят: безотказность, долговечность и ремонтпригодность.

Безотказностью называется способность СЭУ сохранять работоспособное состояние в течение заданного промежутка времени.

Под работоспособным состоянием понимается такое состояние СЭУ, при котором значения всех параметров соответствуют требованиям нормативно-технической и конструкторской документации. Нарушение работоспособного состояния СЭУ называется отказом.

Отказы делятся на *внезапные* и *постепенные*. Первые характеризуются скачкообразным изменением параметров. Их причинами могут быть поломки отдельных деталей. Нарушение плотности магистралей и др. Постепенные отказы происходят вследствие износа отдельных деталей при трении, под действием коррозии, загрязнения теплопередающих поверхностей и др., то есть определяются постепенным выходом за допустимые пределы нормальных параметров установки.

Долговечностью называют общий срок службы установки, на протяжении которого ее состояние изменяется до предельного уровня.

С понятием долговечности тесно связано понятие *моторесурса*, под которым понимают продолжительность работы установки в часах до капитального ремонта или между капитальными ремонтами. Моторесурс современных СЭУ транспортных судов удается обеспечить в пределах 40 - 100 тыс. часов.

Ремонтопригодностью СЭУ называется ее приспособленность к восстановлению путем предупреждения, обнаружения и устранения неисправностей и отказов.

Ремонтопригодность СЭУ зависит от типа и расположения установки, трассировки трубопроводов и кабелей, трудоемкости обслуживания, наличия ЗИП, уровня подготовки личного состава и др. факторов.

Показатели живучести

Живучестью СЭУ называется ее способность сохранять работоспособность при аварийных ситуациях.

Живучесть обеспечивается водонепроницаемыми переборками между помещениями, в которых располагается установка, конструкцией СЭУ, резервированием наиболее важных механизмов и специальными средствами борьбы за живучесть.

Маневренные показатели

Маневренность (маневренные показатели) СЭУ определяются временем, затрачиваемым на изменение режимов работы. Маневренность зависит от типа главных двигателей, типа передачи и движителя, типа судна и его водоизмещения.

При определении маневренности учитывают следующие факторы.

1. Время, необходимое на подготовку СЭУ к пуску после стоянки (ПТУ – до 2 - 4 ч, ДВС – 1 - 2 ч, ГТУ – 20 - 30 мин).

2. Продолжительность пуска с доведением мощности до полной (прогрев) (ПТУ – до 30 мин, ДВС – 10 - 30 мин, ГТУ – 3 - 5 мин).

3. Продолжительность реверса ГД и возможное число последовательных реверсов. Время реверса измеряют с момента подачи команды по машинному телеграфу и до момента начала вращения винта в обратном направлении. Для ПТУ – 1 - 1,5 мин, причем число реверсов не ограничено. Для ДВС – 10 - 15 с, число реверсов зависит от запаса сжатого воздуха в пусковых баллонах (емкость должна быть достаточной для обеспечения не менее 12 пусков).

4. Продолжительность перехода судна с переднего на задний ход (реверс судна). Под *реверсом судна* понимают изменение направления его движения на противоположное. Время от начала реверса ГД до начала движения судна в противоположном направлении всегда больше реверса двигателя. Поэтому маневренность ГЭУ оценивают также по продолжительности хода судна и пройденному им пути (выбегу) после начала реверса ГД. Принято считать, что судно обладает хорошей маневренностью, если обеспечивается его остановка с полного переднего хода на расстоянии не более 3 - 6 длин корпуса.

5. Мощность установки на заднем ходу и возможная его продолжительность. Для ДВС – до 70 - 80 % от мощности на переднем ходу, для турбинных СЭУ – 40 %.

6. Время перехода с одного режима на другой.
7. Способность ГД к перегрузке (составляет не более 110 % номинальной мощности, на которой допустима работа не более 1 ч).
8. Устойчивое движение на малом ходу (у ДВС минимальное устойчивое число оборотов – 30 % от номинальных, у турбинных – нижнего предела не имеют).

Контрольные вопросы

1. На какие группы делятся мощностные показатели?
2. Какими показателями определяется энергоэффективность использования СЭУ?
3. Как определить КПД пропульсивного комплекса, если известны КПД его элементов?
4. Перечислите элементы пропульсивной установки.
5. Как определить расход топлива главным двигателем, если известны его удельный расход и мощность.

2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПТУ. КОНСТРУКЦИЯ ГЛАВНЫХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

Краткие теоретические сведения

В паротурбинной установке (ПТУ) рабочим телом, за счет которого совершается полезная работа, является водяной пар, а продукты сгорания топлива служат для его образования.

Принципиальная схема простейшей судовой ПТУ представлена на рисунке 2.1.

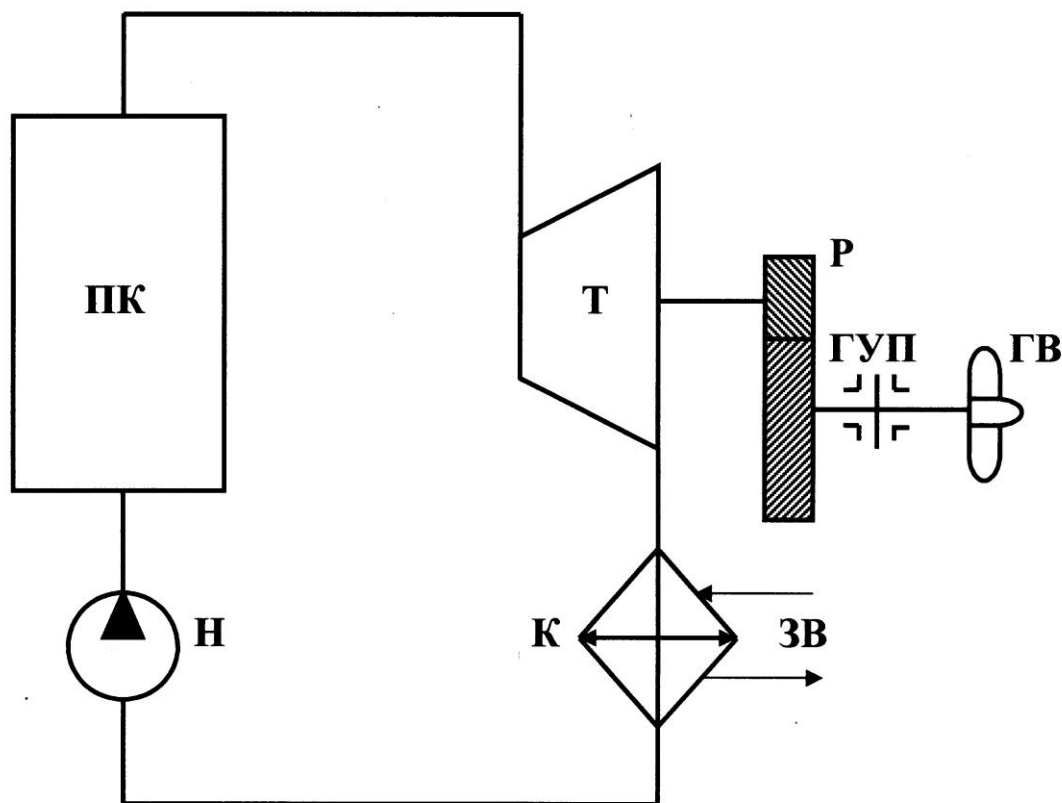


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема ПТУ:

ПК – паровой котел; Т – паровая турбина; К – конденсатор; Н – питательный насос;
Р – редуктор; ГУП – главный упорный подшипник; ГВ – гребной винт;
ЗВ – заборная вода

ПТУ включает в себя паровой котел, паровую турбину, конденсатор и питательный насос.

Паровой котел предназначен для получения водяного пара с заданными температурой и давлением.

На судах с ПТУ в качестве главных котлов используются водотрубные котлы с естественной циркуляцией. Схема такого котла показана на рисунке 2.2.

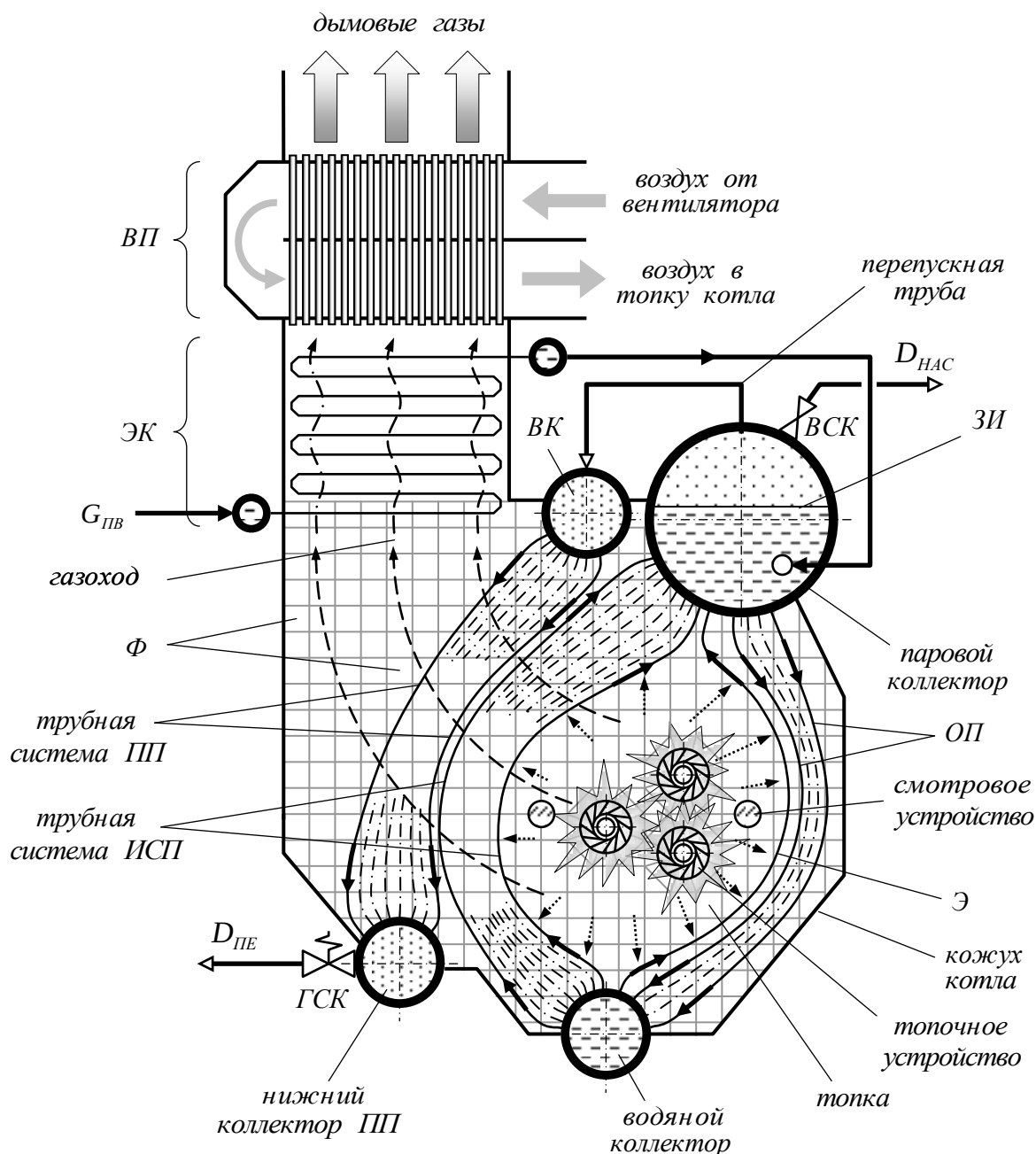


Рисунок 2.2 – Схема и принцип действия водотрубного котла с естественной циркуляцией:

ВП – воздухоподогреватель; *ЭК* – водяной экономайзер; *ПП* – пароперегреватель; *ИСП* – конвективный испарительный (парообразующий) пучок труб; *Э* – экранный пучок труб; *ОП* – опускной пучок труб; *ГСК* – главный стопорный клапан; *ВСК* – вспомогательный стопорный клапан; *ЗИ* – зеркало испарения; *ВК* – верхний коллектор пароперегревателя; *Φ* – футеровка котла (кладка из огнеупорного кирпича); *G_{ПВ}* – подача питательной воды; *D_{ПЕ}* – отбор перегретого пара; *D_{НАС}* – отбор насыщенного пара.

- > движение воды по опускным и подъемным трубам, пароводяной смеси по подъемным трубам, пара по трубам пароперегревателя;
> излучение факела, воспринимаемое радиационными поверхностями нагрева;
 — —> движение газов через поверхности нагрева котла.

Паровой водотрубный котел с естественной циркуляцией состоит из *корпуса*, включающего в себя два *коллектора (паровой и водяной)*, и соединяющие их трубы *испарительной поверхности нагрева*. Водяной коллектор полностью заполнен водой, паровой коллектор – примерно до половины. Уровень воды в паровом коллекторе поддерживается таким, чтобы не происходило оголения труб и срыва циркуляции воды с учетом возможных кренов и дифферентов судна. Пространство котла, заполненное водой, называется *водяным*, заполненное паром – *паровым*. Поверхность воды в паровом коллекторе, разделяющая водяное и паровое пространства, называется *зеркалом испарения*.

Жидкое топливо из расходной цистерны поступает в топку парового котла и распыляется в ней топливными форсунками. Воздух, необходимый для сгорания топлива, подается в топку котельным вентилятором. Теплота в виде высокотемпературного излучения факела (1800 - 2000 °С) воспринимается пучком экранных труб, расположенных на внутренней поверхности стен топки.

Отдав часть теплоты экранам, топочные газы с температурой около 1000 °С омывают пароперегреватель. После пароперегревателя продукты сгорания движутся по газоходу через водяной экономайзер, воздухоподогреватель и покидают котел через газоочиститель.

При омывании поверхностей нагрева газы передают свою теплоту: на нагрев и испарение воды в конвективном испарительном пучке труб; на перегрев пара в пароперегревателе; на подогрев воды в экономайзере; на подогрев воздуха в воздухоподогревателе (конвективный теплообмен). В процессе теплообмена температура газов снижается от 1800 - 2000 °С в топке до 190 - 500 °С на выходе из котла.

Вода, циркулирующая в котле, называется *котловой*. Для пополнения котла служит *питательная* вода. Питательная вода подается питательным насосом, подогревается в водяном экономайзере, забирая теплоту от продуктов сгорания (уходящих газов). В паровом коллекторе питательная вода смешивается с котловой водой парового коллектора, и по *опускным трубам*, располагающимся в необогреваемой зоне за экраным пучком, опускается в водяной коллектор котла. В экранных трубах происходит частичное испарение воды. Образовавшаяся в них пароводяная смесь поднимается в паровой коллектор по подъемным трубам. Пар собирается в верхней части парового коллектора и по перепускной трубе направляется в верхний коллектор пароперегревателя. Из верхнего коллектора по трубам пароперегревателя пар направляется в нижний коллектор. При движении пара по трубам пароперегревателя повышается его температура (происходит перегрев пара). Перегретый пар из котла отбирается на потребители через *главный стопорный клапан*, расположенный на нижнем коллекторе пароперегревателя. Насыщенный пар на потребители отбирается непосредственно из парового коллектора через *вспомогательный стопорный клапан* котла.

Таким образом, при работе котла с ЕЦ вода и пароводяная смесь постоянно движутся по замкнутому контуру: *паровой коллектор – опускные трубы – водяной коллектор – подъемные трубы – паровой коллектор*. Циркуляция воды и пароводяной смеси в контуре происходит за счет разности плотностей воды в опускных трубах и пароводяной смеси в подъемных трубах (естественная циркуляция).

Контрольные вопросы

1. Назовите конструктивные элементы паротурбинной установки.
2. Каково назначение главного судового котла?
3. Какие котлы на судах используются в качестве главных?
4. Какие элементы входят в состав главного котла?
5. Принцип работы судового котла.
6. Назначение экономайзера и пароперегревателя.

3. КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПТУ. КОНСТРУКЦИЯ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ И КОНДЕНСАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

Краткие теоретические сведения

Паровой турбиной называется тепловой двигатель, в котором тепловая энергия рабочего тела (водяного пара) последовательно преобразуется в кинетическую энергию струи, а затем в механическую энергию вращения ротора.

В турбине (рисунок 3.1) рабочее тело поступает в сопло 1, представляющее собой неподвижный суживающийся канал, разгоняется в нем до высокой скорости и направляется на рабочие лопатки 2, имеющие изогнутую форму. Сила давления потока, действующая на лопатки, вращает диск 3 и связанный с ним вал 4. Вал турбины вращается в подшипниках, установленных в замкнутом корпусе. Отработанный пар удаляется через выпускной патрубок 5 и поступает в главный конденсатор. Диск с закрепленными на нем лопатками и валом называется ротором. Сопло и диск с рабочими лопатками составляют ступень. Каналы соплового аппарата и рабочих лопаток составляют проточную часть турбины.

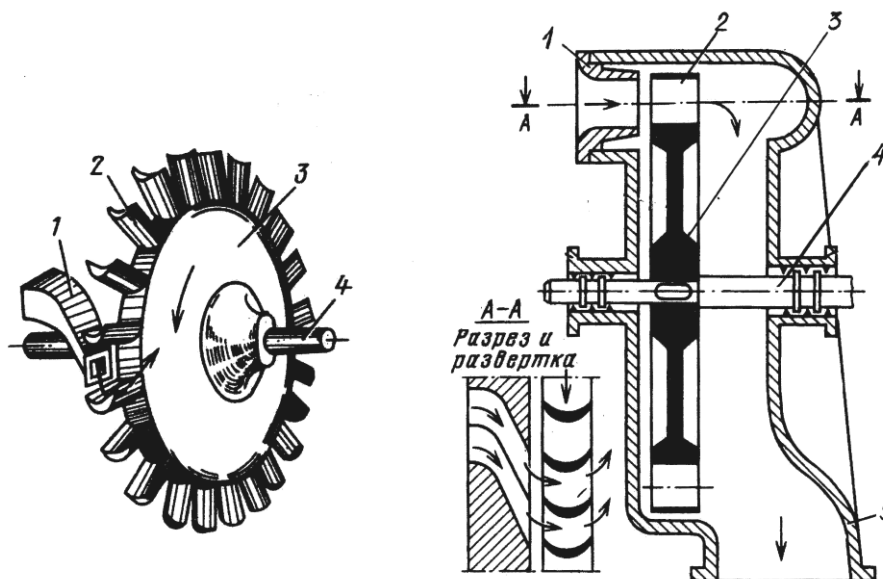


Рисунок 3.1 – Схема одноступенчатой турбины

По характеру рабочего процесса в проточной части различают *активные* и *реактивные* турбины.

В активных турбинах (рисунок 3.2) расширение пара (уменьшение давления) происходит только в сопловом аппарате, а в каналах постоянного сечения между рабочими лопатками имеет место только изменение направления потока (давление пара не меняется). В реактивных турбинах (рисунок 3.3) расширение пара происходит как в сопловом аппарате, так и в каналах рабочих лопаток. Для этого в реактивной турбине рабочие лопатки образуют суживающиеся каналы.

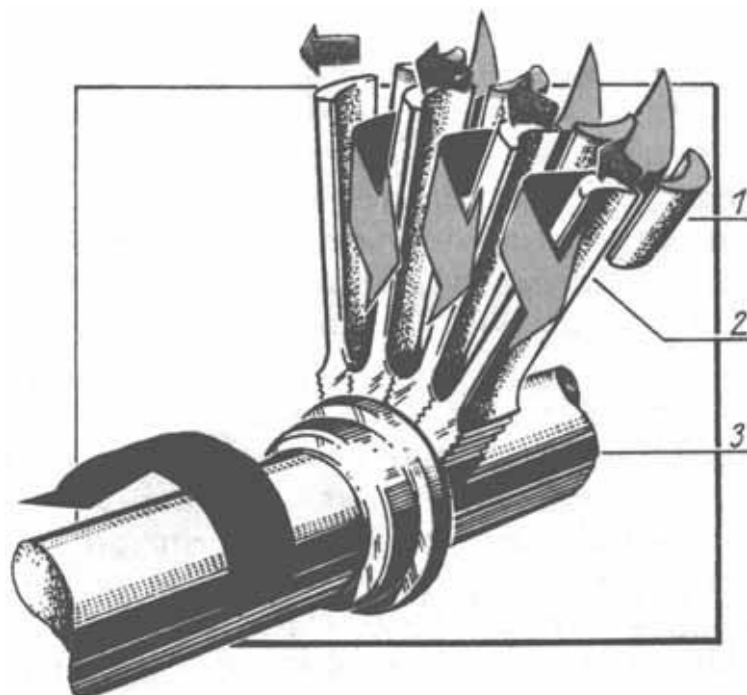
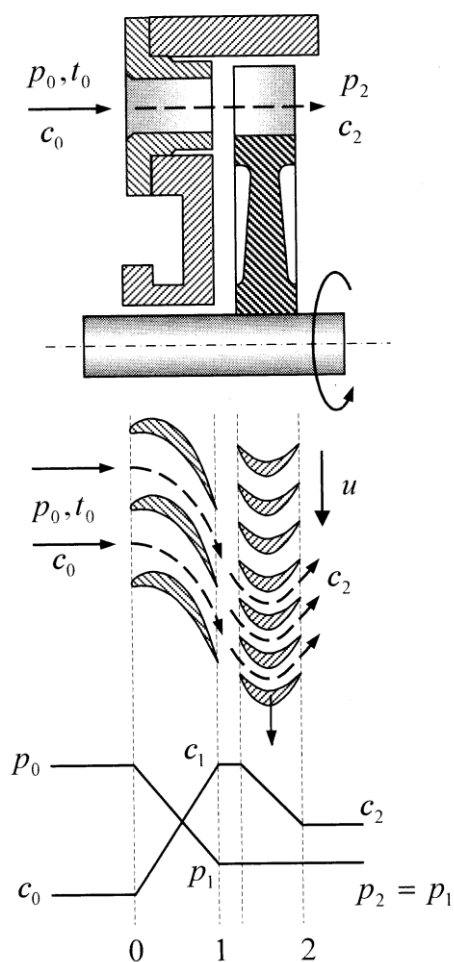


Рисунок 3.2 – Ступень активной паровой турбины:
1 — направляющие лопатки; 2 — рабочие лопатки; 3 — вал ротора

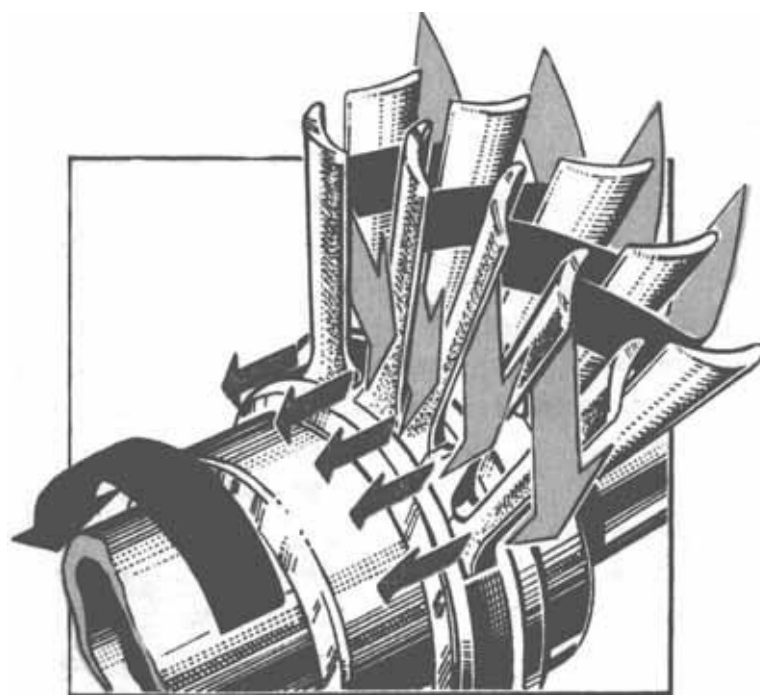
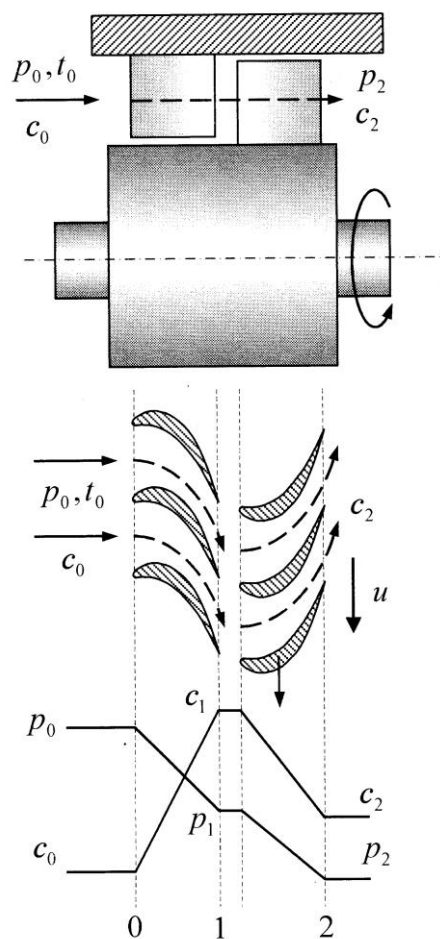


Рисунок 3.3 – Ступень реактивной паровой турбины

В настоящее время в турбостроении чисто активные турбины не применяются ввиду сложности подвода пара к рабочим лопаткам (пар должен поступать перпендикулярно плоскостям лопаток, что увеличивает потери энергии в турбинной ступени). Поэтому современные турбины выполняются с определенной степенью реактивности.

Паровые турбины, состоящие только из одной ступени, способны срабатывать с достаточно высоким КПД относительно небольшие теплоперепады: 30 - 400 кДж/кг. Современные ПТУ работают на высоких начальных параметрах пара (давление пара перед турбиной 2,5 - 9 МПа, температура – 350 - 540 °С). Давление за турбиной, равное давлению пара в конденсаторе, значительно меньше атмосферного и составляет 3 - 7 кПа.

При указанных параметрах значения теплоперепадов, срабатываемых в турбине, достигают величин 1000 - 1700 кДж/кг. Скорость потока пара в проточной части одноступенчатой турбины становится недопустимо большой (около 1500 м/с). Это приводит к увеличению частоты вращения ротора турбины, резкому падению КПД и, самое главное, к недопустимому снижению прочности лопаток.

Избежать перечисленных явлений, снизить скорость вращения турбины и повысить ее КПД можно посредством применения многоступенчатых турбин, в которых весь располагаемый теплоперепад срабатывается частями в отдельных турбинных ступенях, расположенных последовательно одна за другой на одном валу. Ступени отделяются друг от друга диафрагмами, в которые встроены сопла. При этом каждая ступень имеет свой сопловой аппарат и колесо с рабочими лопатками (рисунок 3.4).

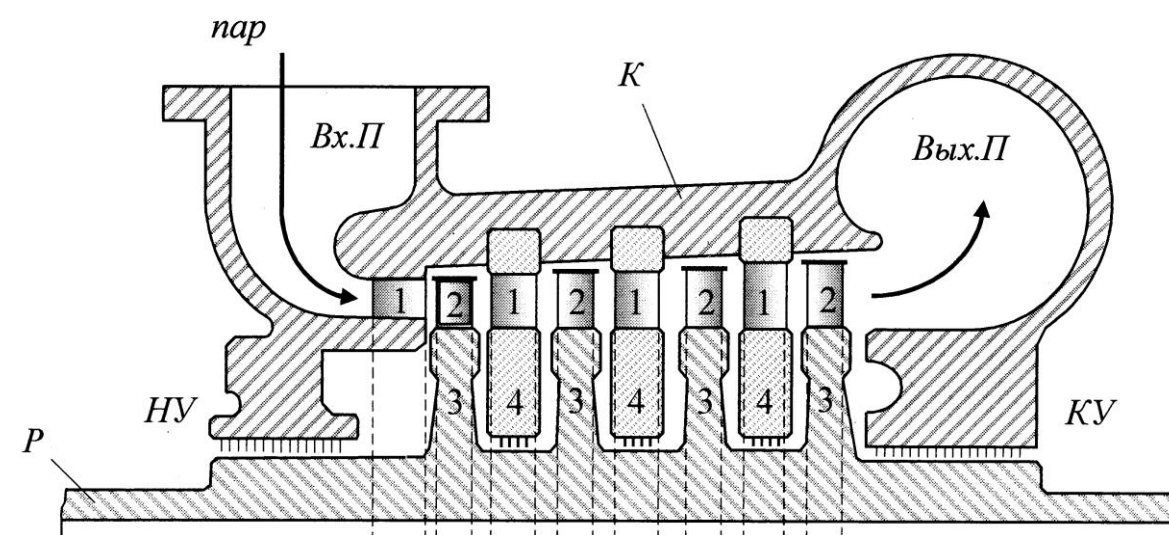


Рисунок 3.4 – Многоступенчатая турбина:

- 1 – сопловые (направляющие) аппараты; 2 – рабочие лопатки; 3 – диски;
 4 – диафрагмы; K – корпус турбины; P – ротор; Вх.П – входной патрубок;
 Вых.П – выхлопной патрубок; НУ – носовые уплотнения;
 KV – кормовые уплотнения

Разделение теплоперепада на несколько ступеней позволяет уменьшить скорость истечения из соплового аппарата до необходимого значения, что приводит к уменьшению окружной скорости турбины, числа ее оборотов и увеличению мощности и КПД.

В современных главных паровых турбинах число ступеней, обеспечивающих полный передний ход, может достигать двух-трех десятков. Кроме ступеней переднего хода имеются еще ступени заднего хода, имеющие возможность изменения направления ротора на противоположное и развивающие мощность не менее 40 % от мощности полного переднего хода. Остановку судна производят путем переключения подачи пара с ТПХ на ТЗХ. Последняя вначале тормозит вращение гребного вала на передний ход, а после его остановки начинает вращать его в обратном направлении.

Все указанные ступени затруднительно размещать в одном корпусе. Поэтому их обычно размещают в двух и даже в трех корпусах. Трехкорпусный агрегат состоит из турбины высокого давления (ТВД), турбины среднего давления (ТСД) и турбины низкого давления (ТНД). Пар из одного корпуса в другой перепускается по трубам (ресиверам). Ступени турбины заднего хода (ТЗХ) обычно размещают в корпусе ТНД.

В настоящее время все главные паровые турбины выполняют многоступенчатыми, реверсивными и осевыми, в проточной части которых поток пара движется вдоль оси ротора.

Конденсационная установка

Конденсационная установка предназначена для конденсации отработавшего в турбине пара и поддержания вакуума за турбиной. Понижение давления в конденсаторе до 3 - 7 кПа позволяет увеличить степень расширения пара в турбине, в результате чего повышается теплоперепад и КПД установки.

В состав конденсационной установки входят следующие элементы (рисунок 3.5): *конденсатор; циркуляционный насос; конденсатный насос и пароструйный эжектор.*

Конденсатор представляет собой теплообменный аппарат, предназначенный для конденсации отработавшего в турбине пара. Он состоит из корпуса цилиндрической формы, закрытого с боковых сторон трубными досками, в которых закреплены трубки, и двух крышек, образующих водяные камеры.

Заборная вода циркуляционным насосом, который чаще всего имеет турбопривод, подается во входную водяную камеру, распределяется по трубкам и охлаждает их поверхность. Пар, поступающий в конденсатор от турбины через верхнюю горловину, соприкасается с холодными стенками труб и конденсируется. Конденсат стекает в нижнюю часть конденсатора – *конденсатосборник*. Из конденсатосборника образовавшаяся вода забирается конденсатным насосом и направляется в питательную систему паро-

вого котла. После прокачки трубок охлаждающая вода собирается в выходной водяной камере и сливается за борт.

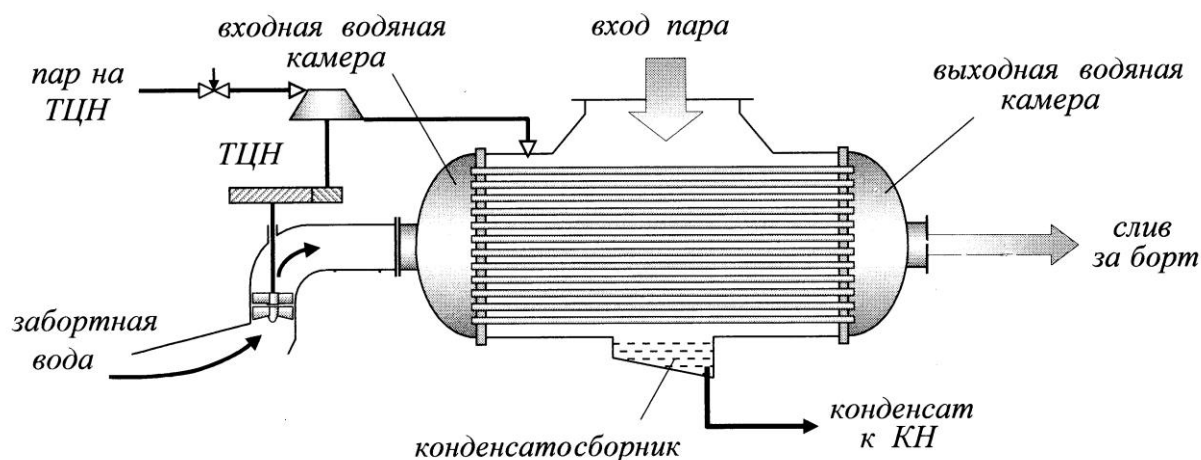


Рисунок 3.5 – Схема конденсационной установки:
ТЦН – турбоциркуляционный насос; КН – конденсатный насос

Разряжение в конденсаторе поддерживается благодаря непрерывному удалению (отсасыванию) воздуха с помощью пароструйного эжектора (рисунок 3.6).

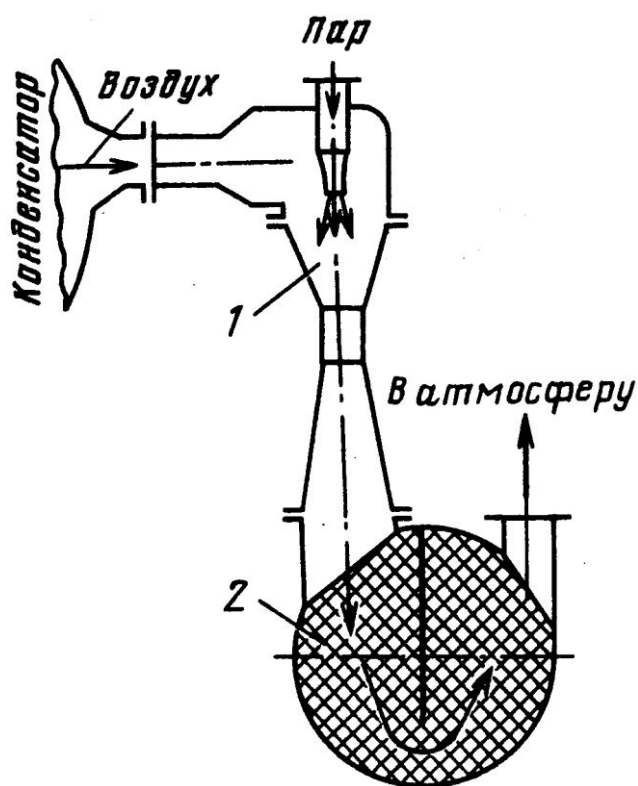


Рисунок 3.6 – Пароструйный эжектор:
1 – эжектор; 2 - холодильник

В сопло пароструйного эжектора поступает пар, разгоняется до большой скорости и, проходя через камеру эжектора, создает в ней разрежение. За счет созданного разрежения в камеру осуществляется подсос паровоздушной смеси из полости главного конденсатора. Паровоздушная смесь поступает в холодильник эжектора, и охлаждается при соприкосновении с трубками холодильника, прокачиваемыми охлаждающей водой. При этом пар конденсируется на поверхности трубок, конденсат стекает вниз и скапливается в нижней части эжектора, а воздух выбрасывается в машинное отделение. Конденсат, образовавшийся в холодильнике эжектора, дренируется в главный конденсатор через специальные устройства – конденсатоотводчики.

Контрольные вопросы

1. Из каких элементов состоит паровая турбина?
2. Какой принцип действия паровой турбины?
3. В чем отличие активной и реактивной турбины?
4. Каково назначение конденсационной установки?
5. Какой принцип работы конденсационной установки?
6. Как работает пароструйный эжектор?

4. КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ГТУ. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ КОМПРЕССОРА, ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ И КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

Краткие теоретические сведения

Газотурбинной энергетической установкой (ГТУ) называется комплекс технических средств, предназначенный для преобразования тепловой и кинетической энергии продуктов сгорания топлива (газов) в механическую энергию вращения ротора газовой турбины, за счет которой совершается полезная работа.

В состав газотурбинной установки (ГТУ) входят газотурбинный двигатель (ГТД), состоящий из воздушного компрессора, камеры сгорания, газовой турбины, и вспомогательного оборудования различного назначения.

Принципиальная схема ГТУ приведена на рисунке 4.1.

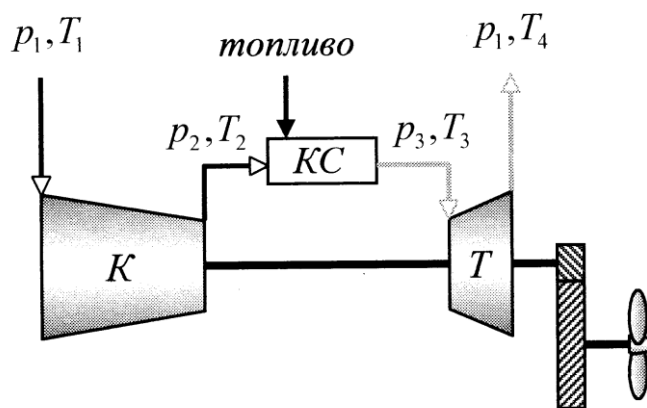


Рисунок 4.1 – Схема газотурбинной установки

Воздух поступает в компрессор K , где он сжимается от давления p_1 до p_2 . Затем он поступает в камеру сгорания $КС$, куда через форсунку подается топливо. Топливо в камере сгорания перемешивается с воздухом и сгорает при практически постоянном давлении ($p_3 = p_2$). В результате образуются горячие газы, которые поступают в газовую турбину T , в которой расширяются до атмосферного давления $p_4 = p_1$. Приобретенная при расширении газа кинетическая энергия преобразуется на лопатках в механическую энергию вращения ротора. Продукты сгорания, отдав часть своей энергии в турбинах, направляются в газовыхлопное устройство. Для привода турбины и компрессора используется пусковой электродвигатель (в частности, электродвигатель).

Газовые турбины ГТД

Газовая турбина представляет собой двигатель, использующий кинетическую энергию рабочего тела (продуктов сгорания топлива) для вращения ротора.

Основными элементами газовых турбин, также как и паровых, являются: *ротор* (вращающаяся часть турбины) с *рабочими лопатками*, *статор* (неподвижная часть турбины) с *направляющими (сопловыми) лопатками*, *корпус*, *уплотнения* и *подшипники*.

Рабочие лопатки (рисунок 4.2) состоят из двух частей: замка 1 и пера 2. Замковая часть рабочей лопатки выполняется обычно елочного типа.

Сопловые лопатки и корпус ГТ образуют составную конструкцию в виде цилиндра или усеченного конуса.

Уплотнения в ГТ служат для уменьшения протекания газа через зазоры направляющих и рабочих лопаток.

Подшипники ГТ работают в очень тяжелых условиях при температуре до 250 °С, что требует подвода значительного количества масла для их охлаждения.

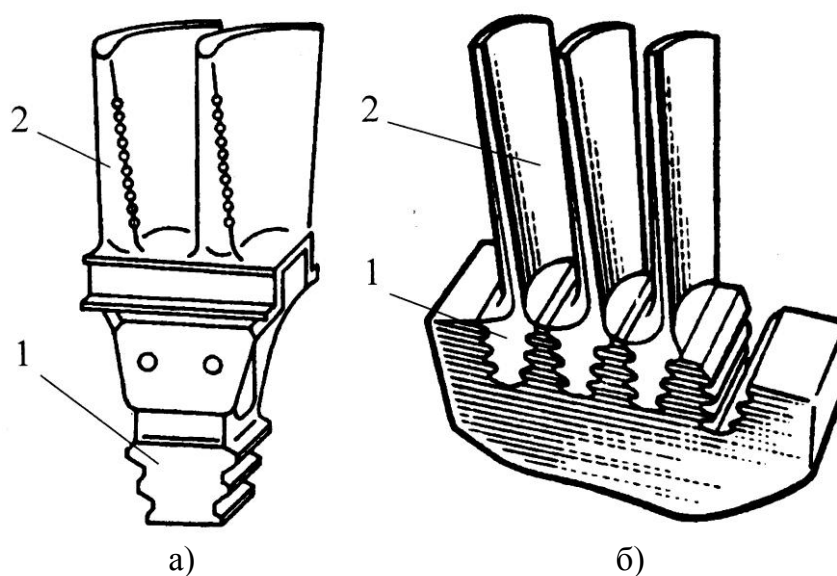


Рисунок 4.2 – Рабочие лопатки газовых турбин:
а – рабочие лопатки; б – крепление рабочих лопаток в диске газовой турбины;
1 – замок лопатки; 2 – перо

Принцип работы газовой турбины аналогичен принципу работы паровой турбины. В то же время их условия работы имеют отличия, поэтому различно и конструктивное выполнение газовых и паровых турбин.

1. В газовой турбине расширение продуктов сгорания происходит до атмосферного давления, а в паровой – расширение пара до давления, значительно меньшего атмосферного (3 - 7 кПа). Следовательно, в газовой турбине значительно меньший перепад тепла, чем в паровой (в 3 - 5 раз). Это дает возможность конструировать проточную часть газовой турбины с меньшим числом ступеней (от одной до трех), чем у паровой (до двух десятков и более).

2. В связи с более высокой температурой газов, которая может достигать 1100 °С (начальная температура пара не превышает 540 °С), газовые

турбины подвергаются более высоким температурным напряжениям, чем паровые. Поэтому детали проточной части газовых турбин (сопла, рабочие лопатки, диски, валы) изготавливают из легированных высококачественных сталей. Для надежной работы у большинства газовых турбин предусмотрено интенсивное охлаждение наиболее нагруженных деталей корпуса (пресной водой) и ротора (воздухом).

В настоящее время в главных ГТУ применяют исключительно осевые турбины с одной – тремя ступенями давления, внутренний КПД которых находится в пределах 85 - 92 %.

Компрессоры ГТД

Компрессор предназначен для сжатия воздуха до давления, обеспечивающего заданную полезную мощность установки.

В главных ГТУ преимущественно используются многоступенчатые осевые компрессоры с КПД (87 - 89 %). В каждой из ступеней происходит частичное сжатие воздуха.

По конструкции осевой компрессор сходен с осевой турбиной, то есть состоит из чередующихся подвижных лопаток, закреплённых на валу и называемых рабочим колесом (РК), и неподвижных лопаток, закреплённых в корпусе компрессора и называемых направляющим аппаратом (НА).

Отличие заключается в том, что в компрессоре межлопаточные каналы как в рабочем колесе, так и в направляющем аппарате диффузорные, то есть расширяющиеся.

В результате рабочий процесс, происходящий в проточной части компрессора, протекает в обратном направлении по сравнению с турбиной. Сначала в рабочих лопатках компрессора механическая энергия вращения ротора преобразуется в кинетическую энергию движения воздуха, а затем кинетическая энергия воздуха в направляющих лопатках (при торможении потока) преобразуется в потенциальную энергию давления.

Таким образом, в турбине работа расширения газа является положительной, а в компрессоре работа сжатия – отрицательной.

Устройство осевого компрессора показано на рисунке 4.3.

Входное устройство, включающее *воздухозаборник*, *передний обтекатель*, *силовые стойки* и *входной направляющий аппарат*, предназначено для формирования потока воздуха с целью оптимального входа его на рабочие лопатки первой ступени.

В *проточной части* компрессора происходит рабочий процесс преобразования механической энергии ротора в потенциальную энергию сжатого воздуха.

Выходное устройство, включающее *спрямляющий аппарат*, *силовые стойки* и *выходной кольцевой диффузор*, обеспечивает придание потоку воздуха требуемого направления движения и повышение давления воздуха за счет его торможения.

Компрессор и приводящую его турбину называют *турбокомпрессорным агрегатом (ТКА)*.

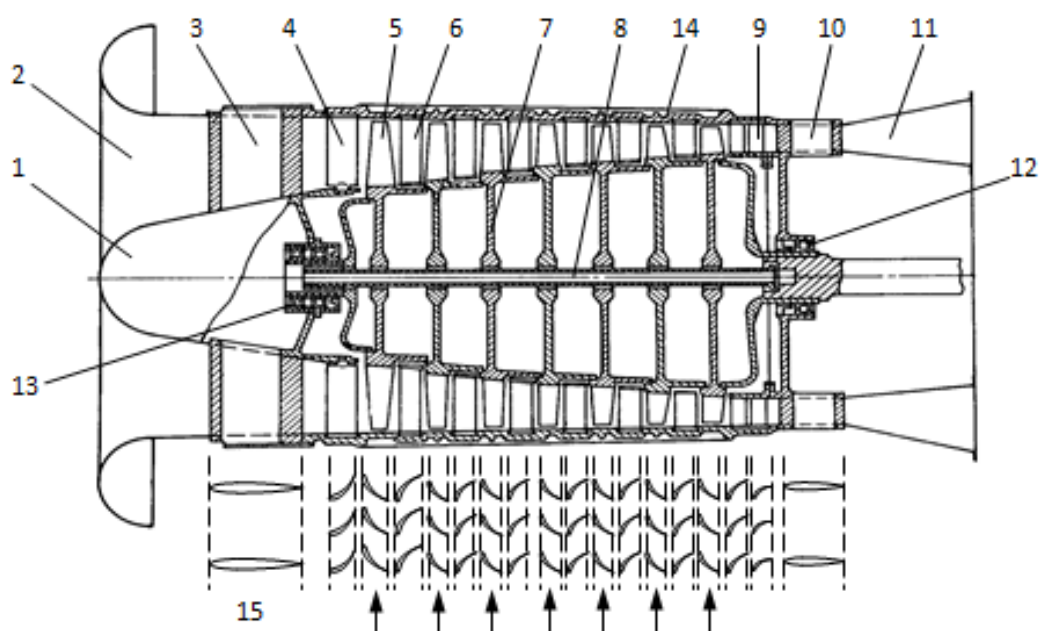


Рисунок 4.3 – Устройство осевого компрессора:

1 – обтекатель; 2 – воздухозаборник; 3 – передняя силовая стойка; 4 – входной направляющий аппарат; 5 – рабочая лопатка 1-й ступени; 6 – направляющая лопатка 1-й ступени; 7 – секция ротора; 8 – стяжной болт; 9 – выходной спрямляющий аппарат; 10 – задняя силовая стойка; 11 – диффузор; 12 – опорный подшипник; 13 – опорно-упорный подшипник; 14 – корпус; 15 – сечение проточной части осевого компрессора (стрелками показано направление движения рабочих лопаток).

Камера сгорания

Камера сгорания предназначена для создания газового потока заданной температуры за счет сжигания топлива в среде сжатого воздуха, подаваемого компрессором.

Схематично камера сгорания (рисунок 4.4) представляет собой емкость, куда непрерывно поступают топливо и воздух, и из которой непрерывно отводятся продукты сгорания.

В состав камеры сгорания входят следующие элементы: *корпус, лопаточный завихритель с размещенной в центре форсункой, жаровая труба, запальное устройство.*

Камера сгорания делится на зону горения, где происходит сгорания топлива и образование газов с температурой порядка 2000 °С, и зону смешения, где к продуктам сгорания подмешивается воздух для снижения их температуры до 1100 °С, приемлемой для работы материалов проточной части турбины.

Воздух, поступающий в камеру сгорания, делится на первичный, направляемый через лопаточный завихритель непосредственно в зону горе-

ния (20 - 25 %), и вторичный, обтекающий жаровую трубу снаружи и подмешиваемый к продуктам сгорания (75 - 80 %).

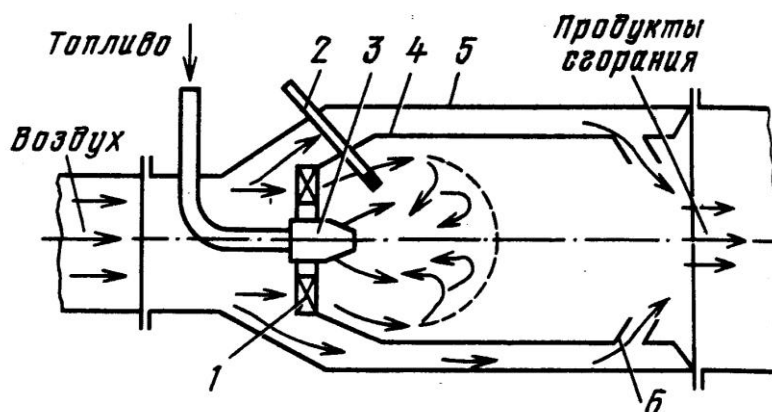


Рисунок 4.4 – Схема камеры сгорания ГТУ:

1 – завихритель; 2 – запальное устройство; 3 – форсунка; 4 – жаровая труба;
5 – корпус; 6 – смеситель

Завихритель предназначен для подачи в зону горения жаровой трубы первичного воздуха и закручиванию потока, что способствует его турбулизации и лучшему перемешиванию с топливом.

Форсунка предназначена для непрерывной дозированной подачи распыленного топлива в жаровую трубу КС.

Запальное устройство предназначено для зажигания топлива в КС в момент пуска ГТД.

Контрольные вопросы

1. Назовите конструктивные элементы газотурбинной установки.
2. Назовите основные элементы газовой турбины.
3. Какой принцип действия газовой турбины?
4. Каково назначение компрессора ГТД?
5. Из каких элементов состоит компрессор ГТД?
6. Для чего предназначена камера сгорания?

5. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ ГТУ

Краткие теоретические сведения

КПД ГТУ находится в прямой зависимости от начальной температуры газа перед турбиной: чем она выше, тем выше КПД.

Одной из основных характеристик цикла ГТУ является *степень повышения давления* в компрессоре, равная отношению давления воздуха после компрессора к давлению перед ним:

$$\pi_k = p_2/p_1.$$

КПД цикла непрерывно возрастает с увеличением π_k . Это связано с увеличением температуры воздуха в конце процесса сжатия и соответственно температуры газов перед турбиной.

Однако верхний предел этой температуры ограничивается жаропрочностью материала, из которого изготавливают ее элементы и который определяет срок их службы. Это приводит к необходимости разбавления газов после камеры сгорания воздухом до приемлемой температуры, при которой могут работать лопатки, что понижает КПД ГТУ.

В настоящее время ГТУ имеют относительно низкий КПД, не превышающий 35 %. Поэтому мероприятия по повышению КПД ГТУ на сегодняшний день идет по двум направлениям: использование жаростойких материалов для изготовления лопаток и интенсивное охлаждение наиболее нагруженных деталей ротора.

Помимо этого существуют и другие способы повышения экономичности ГТУ, которые направлены на увеличение работы расширения в турбине или уменьшения работы сжатия в компрессоре.

Основными из них являются следующие.

1. Применение регенерации теплоты отработавших в турбине газов для подогрева воздуха, нагнетаемого компрессором в камеру сгорания.

В ГТУ выпускные газы имеют достаточно высокую температуру и уносят с собой в атмосферу большое количество неиспользованной теплоты. Эти потери можно значительно уменьшить, если в цикл ввести регенерацию, то есть теплоту выпускных газов турбины использовать для подогрева сжатого воздуха после компрессора. Для этой цели в состав установки перед камерой сгорания включают теплообменник-регенератор.

Схема и термодинамический цикл простейшей ГТУ с регенерацией теплоты изображены на рисунке 5.1.

Атмосферный воздух с параметрами p_1, T_1 поступает в компрессор, где происходит его сжатие до состояния p_2, T_2 . После сжатия в компрессоре воздух направляется в регенератор – *Reg*, где ему передается часть теплоты уходящих из двигателя газов; при этом температура воздуха повышается до значения T_{2R} , а давление остается прежним – p_2 . Подогретый в регенераторе воздух поступает в камеру сгорания двигателя. На выходе

из камеры сгорания горячие газы имеют состояние, характеризующееся параметрами p_2, T_3 . В газовой турбине происходит расширение газа, в ходе которого совершается полезная работа, при этом параметры газа снижаются до значений p_1, T_R . Отрабатывшие в газовой турбине газы направляются в регенератор, где отдают часть теплоты нагреваемому воздуху, и затем выбрасываются в атмосферу с параметрами p_1, T_4 .

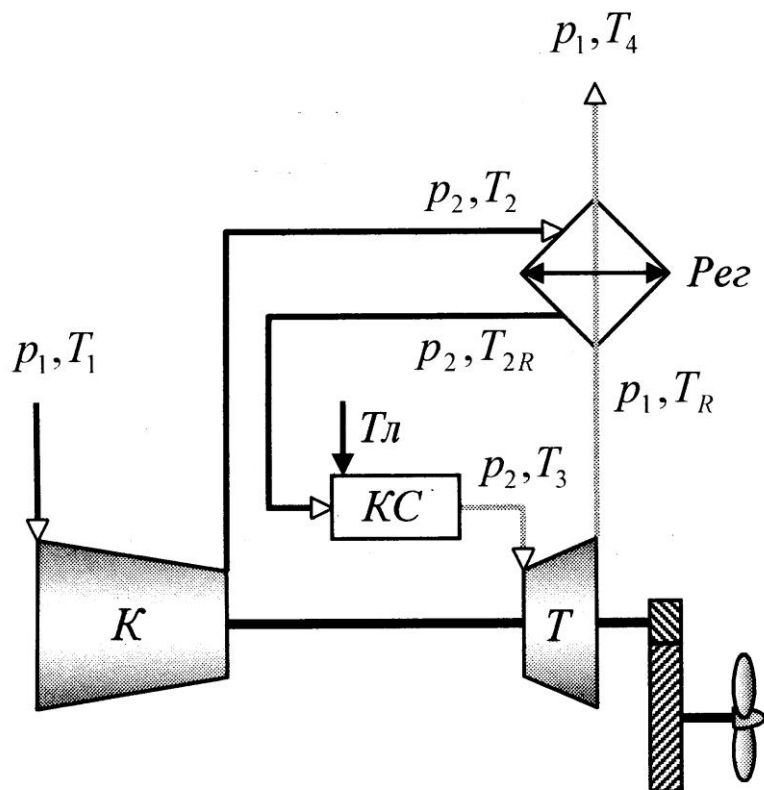


Рисунок 5.1 – Схема ГТУ с регенерацией теплоты

Применение регенерации позволяет уменьшить потери тепла с отрабатывшими газами турбины. Благодаря нагреву воздуха в регенераторе расход топлива снижается (до 25 - 30 %) и, следовательно, повышается экономичность ГТУ.

2. Применение ступенчатого сжатия воздуха в компрессоре с промежуточным его охлаждением.

Схема ГТУ с трехступенчатым сжатием и двухступенчатым промежуточным охлаждением воздуха (схема ПОВ) изображена на рисунке 5.2.

Атмосферный воздух с параметрами p_1, T_1 последовательно проходит следующие преобразования: сжатие в *КНД*, промежуточное охлаждение в воздухоохладителе *ВО1*, сжатие в *КСД*, промежуточное охлаждение в воздухоохладителе *ВО2* и окончательное сжатие в *КВД*. Турбина в данной схеме является приводной для всех трех компрессоров и передает мощность на движитель судна.

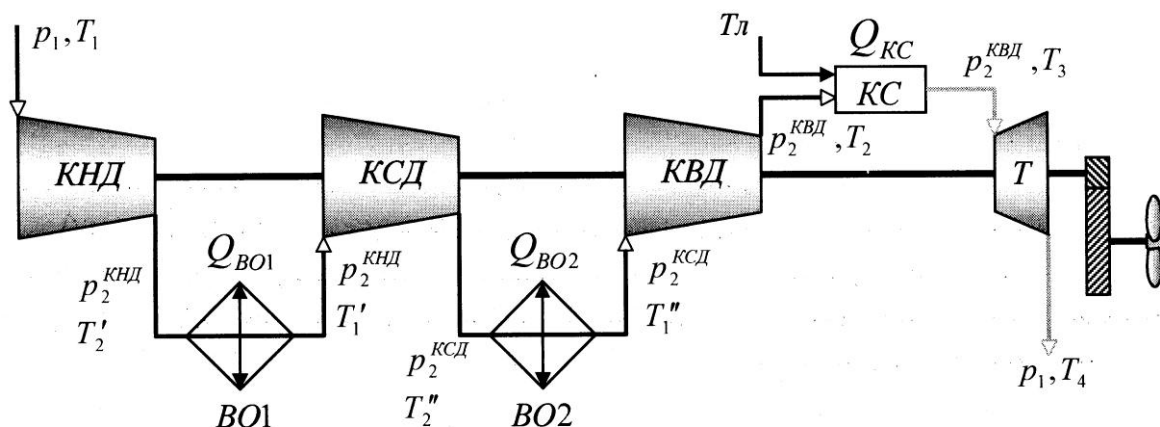


Рисунок 5.2 – Схема ГТУ с трехступенчатым сжатием и двухступенчатым промежуточным охлаждением в компрессоре.

В результате применения ступенчатого сжатия работа, затрачиваемая на привод компрессора, уменьшается, однако приводит к увеличению затрат теплоты на подогрев воздуха в камере сгорания.

В связи с этим в настоящее время ГТУ, выполненные по схеме ПОВ, используются только в совокупности с регенерацией тепла в цикле. Наличие регенерации значительно увеличивает эффективность ступенчатого сжатия и промежуточного охлаждения и является необходимым условием повышения КПД установки.

Схема установки с одновременным использованием регенерации тепла и ступенчатого сжатия воздуха с промежуточным охлаждением показана на рисунке 5.3.

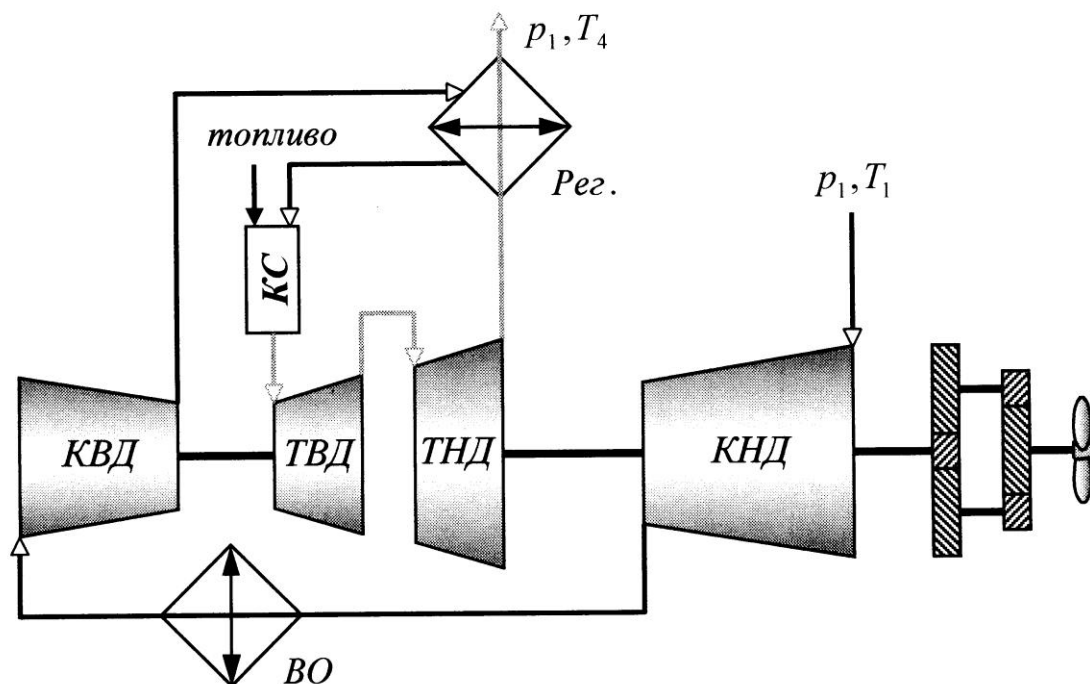


Рисунок 5.3 – Схема ГТУ с одновременным использованием регенерации тепла и ступенчатого сжатия воздуха с промежуточным охлаждением

В этой установке сжатие атмосферного воздуха до расчетного давления осуществляется последовательно сначала в компрессоре низкого давления (КНД), а затем в компрессоре высокого давления (КВД) с его промежуточным охлаждением в воздухоохладителе. Перед поступлением в камеру сгорания воздух подогревается в регенераторе.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные способы повышения экономичности ГТУ.
2. Что такое регенерация теплоты?
3. Изобразите схему ГТУ с регенерацией теплоты.
4. Как работает ГТУ со ступенчатым сжатием воздуха и промежуточным его охлаждением?

6. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО ДВС. КОНСТРУКЦИЯ ДВУХТАКТНЫХ, ЧЕТЫРЕХТАКТНЫХ, ТРОНКОВЫХ И КРЕЙЦКОПФНЫХ ДВС

Краткие теоретические сведения

Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) относится к тепловому двигателю, в котором химическая энергия топлива при сгорании преобразуется в тепловую непосредственно внутри рабочего цилиндра. В результате окисления топлива кислородом воздуха, подаваемого в цилиндр, образуются газообразные продукты сгорания с высоким давлением и температурой, которые и являются рабочим телом в двигателе.

Подготовка смеси топлива с воздухом в необходимых пропорциях, обеспечивающих наиболее эффективное горение, называется *смесеобразованием*.

По способу смесеобразования различают следующие ДВС.

1. *Двигатели с внешним смесеобразованием* (карбюраторные и некоторые газовые двигатели), в которых горючая смесь, состоящая из бензина с воздухом или из газа с воздухом, образуется вне рабочего цилиндра (в карбюраторе или смесителе). Они имеют внешний источник воспламенения – электрическую искру, поэтому представляют собой *ДВС с принудительным зажиганием*. Такие двигатели на судах (кроме моторных лодок) практически не используются и поэтому здесь не рассматриваются.

2. *Двигатели с внутренним смесеобразованием* (дизели), в которых рабочая смесь образуется внутри рабочего цилиндра.

Принципиальная схема дизеля представлена на рисунке 6.1.

Основными его элементами являются: цилиндр (или блок цилиндров) 3 с поршнем 2, соединенным посредством кривошипно-шатунного механизма (шатун 4 и кривошип 6) с коленчатым валом 7. Цилиндры дизеля установлены на станине 5, которая вместе с ними и фундаментной рамой 8 образует остов двигателя. Внутреннее закрытое пространство остова называется картером. В него стекает масло после смазки трущихся частей. Фундаментная рама крепится к судовому фундаменту. Блок цилиндров сверху закрыт крышкой, в которой установлены форсунки 1.

Топливо под высоким давлением подается насосом в цилиндры двигателя через форсунки, посредством которых оно мелко распыливается. Подача топлива производится в конце сжатия воздуха. В связи с тем, что после сжатия воздух имеет достаточно высокую температуру, топливо самовоспламеняется и сгорает с образованием газов. В связи с этим дизели являются *ДВС с воспламенением от сжатия*.

Преобразование тепловой энергии в механическую, за счет которой совершается работа, происходит в результате расширения газов и их давления на поршень. Поршень совершает прямолинейное возвратно-поступательное движение в цилиндре, заставляя через кривошипно-

лие на коленчатый вал передается через шток, крейцкопфный механизм и шатун.

Принцип действия и устройство ДВС

Четырехтактный двигатель.

На рисунке 6.2 представлена принципиальная схема четырехтактного дизеля.

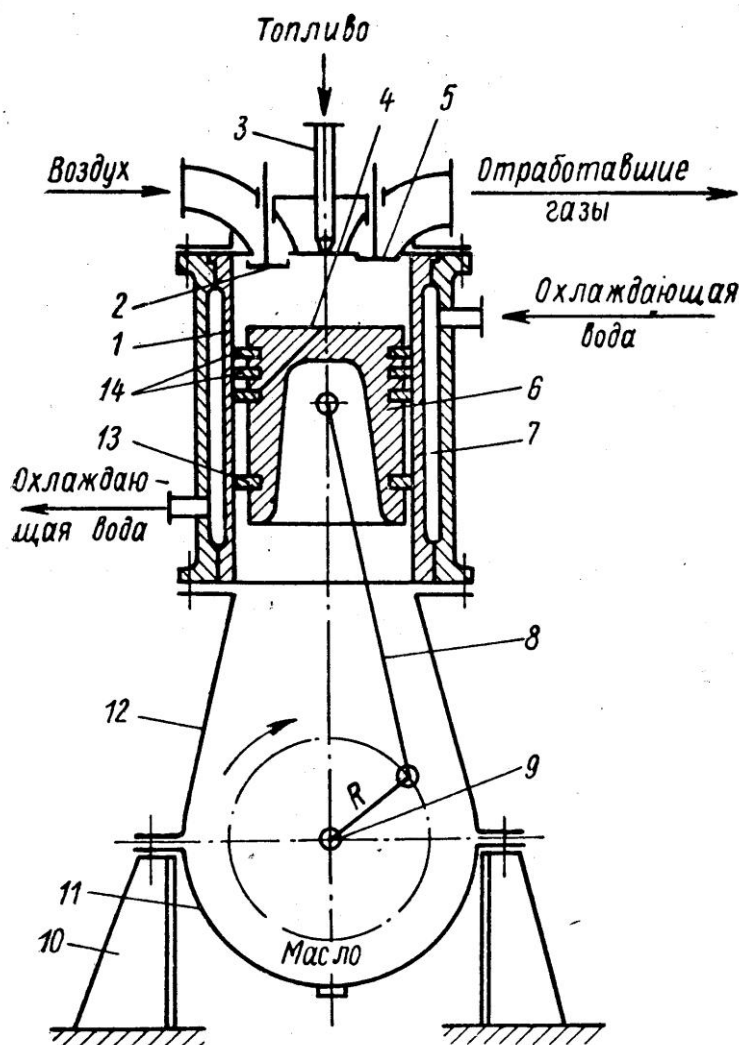


Рисунок 6.2 – Принципиальная схема четырехтактного дизеля

Цилиндр, состоящий из рубашки и втулки 1, закрыт крышкой, в которой располагаются впускные 2 и выпускные 5 клапаны и форсунка 3. Открытие и закрытие клапанов осуществляется газораспределительным механизмом. Число оборотов распределительного вала у четырехтактного двигателя в два раза меньше, чем у коленчатого вала.

Дизель является тронковым, так как поршень 4 для своего направления в цилиндре имеет удлиненную нижнюю часть – тронк 6. В таких двигателях поршень соединяется непосредственно с кривошипом коленчатого вала 9 посредством шатуна 8 (рисунок 6.3).

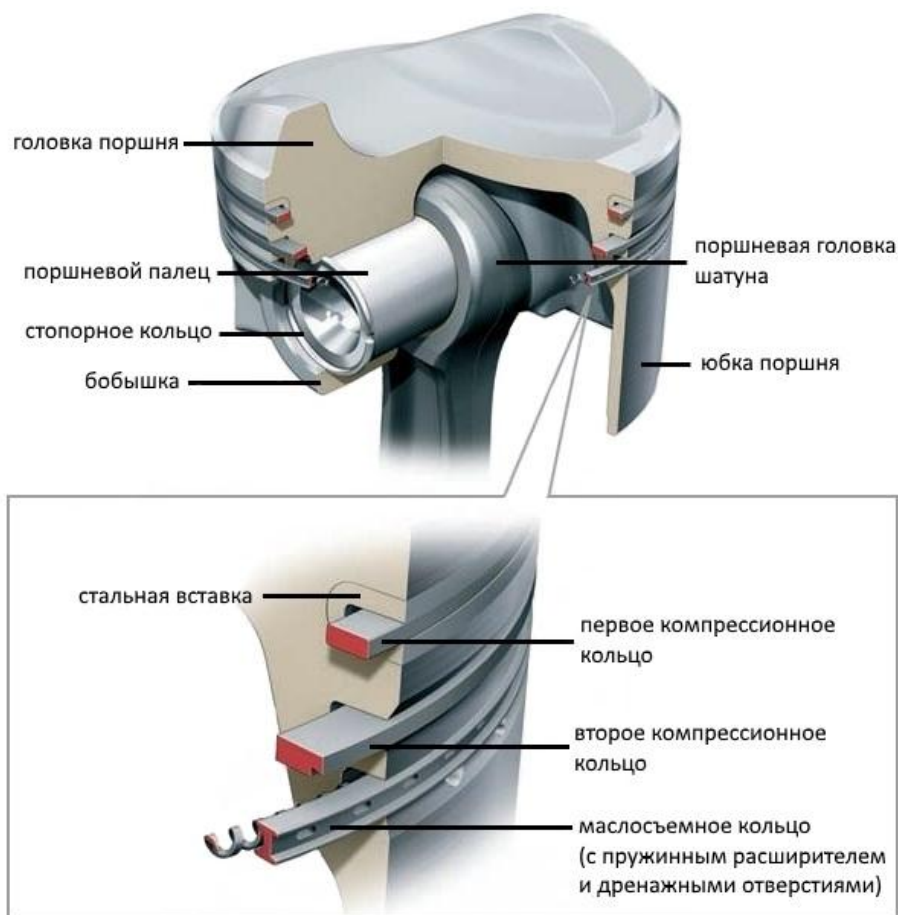


Рисунок 6.3 – Соединение поршня и шатуна тронкового дизеля

На поршне имеются уплотнительные компрессионные кольца 14, препятствующие прорыву газов из цилиндра в картер, и маслосъемные кольца 13, сбрасывающие излишки масла, подаваемого для смазки стенок цилиндра. Цилиндры установлены на станине 12, которая вместе с ними и фундаментной рамой 11 образует остов двигателя. Фундаментная рама крепится к судовому фундаменту 10.

Коленчатый вал (рисунок 6.4) изготавливается из стали или высокопрочного чугуна. Он состоит из шатунных (мотылевых) и рамовых (коренных) шеек, щек и противовесов (для уменьшения сил инерции). Рамовые шейки уложены в рамовые подшипники, на шатунные шейки навешены нижние головки шатунов. Задняя (кормовая) часть вала выполнена в виде фланца для отбора мощности к потребителю. На носовом конце вала крепится шестерня для привода распределительного вала и навешенных механизмов.

Кривошипно-шатунный механизм в разобранном виде представлен на рисунке 6.5.

Вследствие высоких температур газа цилиндр двигателя приходится интенсивно охлаждать пресной водой, циркулирующей в зарубашечном пространстве 7 между цилиндром и втулкой цилиндра.

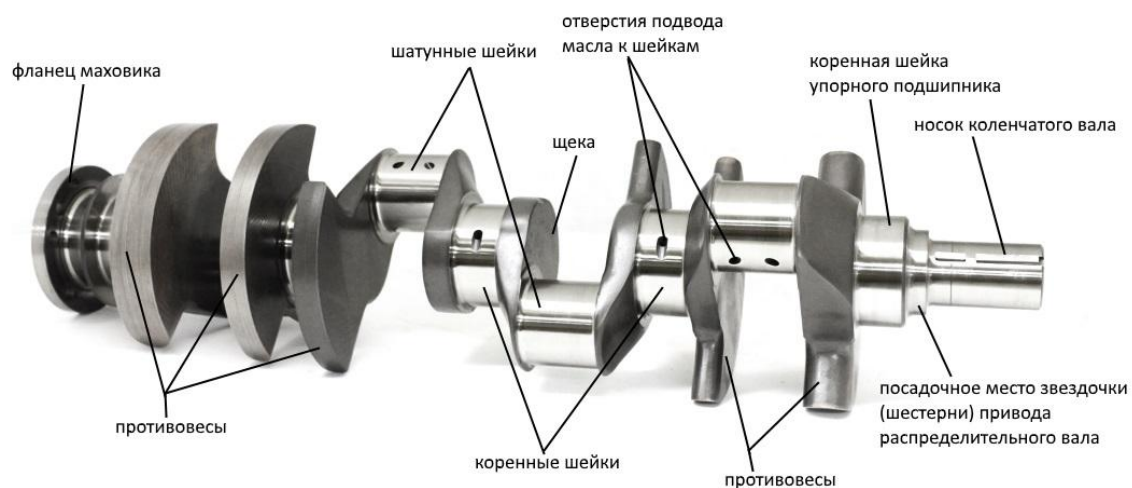


Рисунок 6.4 – Конструкция коленчатого вала

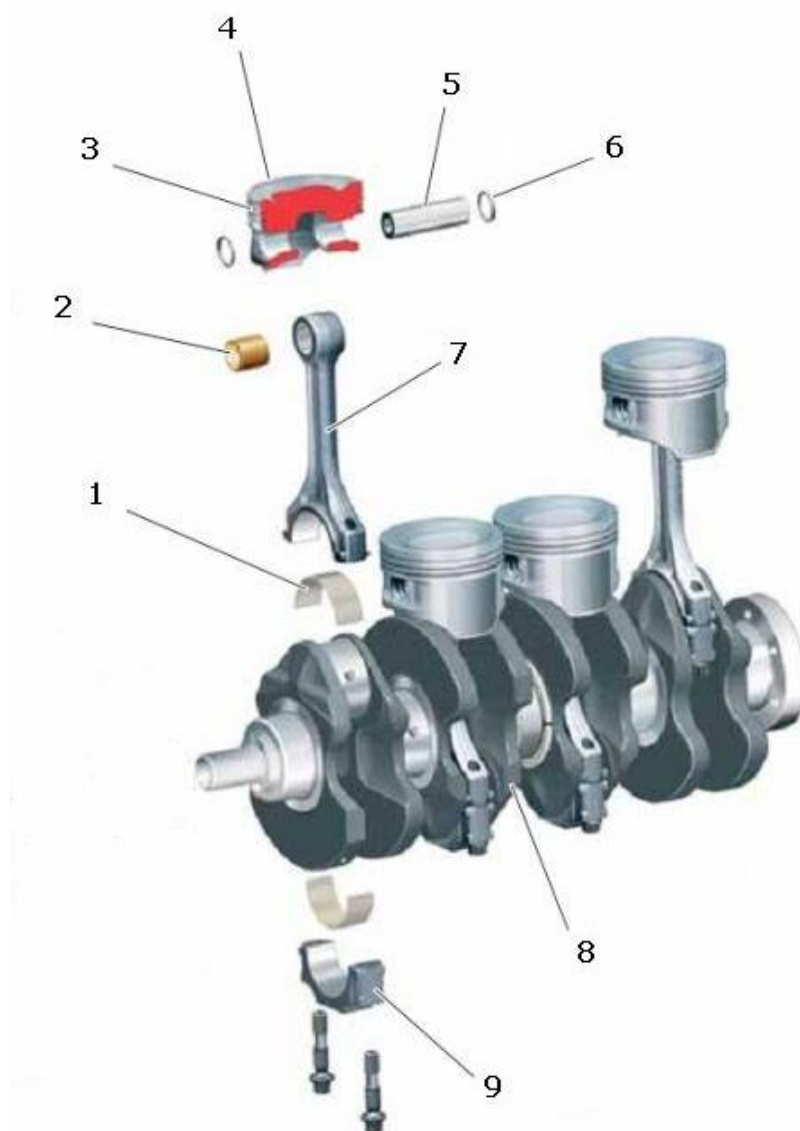


Рисунок 6.5 – Кривошипно-шатунный механизм:

1 – вкладыш; 2 – втулка головная; 3 – поршень; 4 – головка поршня; 5 – поршневой палец; 6 – стопорное кольцо; 7 – стержень шатуна; 8 – коленчатый вал; 9 – крышка шатуна

Кроме основных деталей, двигатель имеет ряд вспомогательных механизмов для подачи топлива (топливные насосы, смесительные устройства, фильтры, топливные баки, регулятор частоты вращения), смазочного масла (масляные насосы, фильтры, масляные баки), охлаждающей воды (водяные насосы, водяные баки, радиаторы) и другие устройства, необходимые для его обслуживания. Вспомогательные механизмы приводятся в движение от коленчатого вала.

На рисунке 6.6 представлены рабочие процессы и индикаторная диаграмма четырехтактного дизеля без наддува.

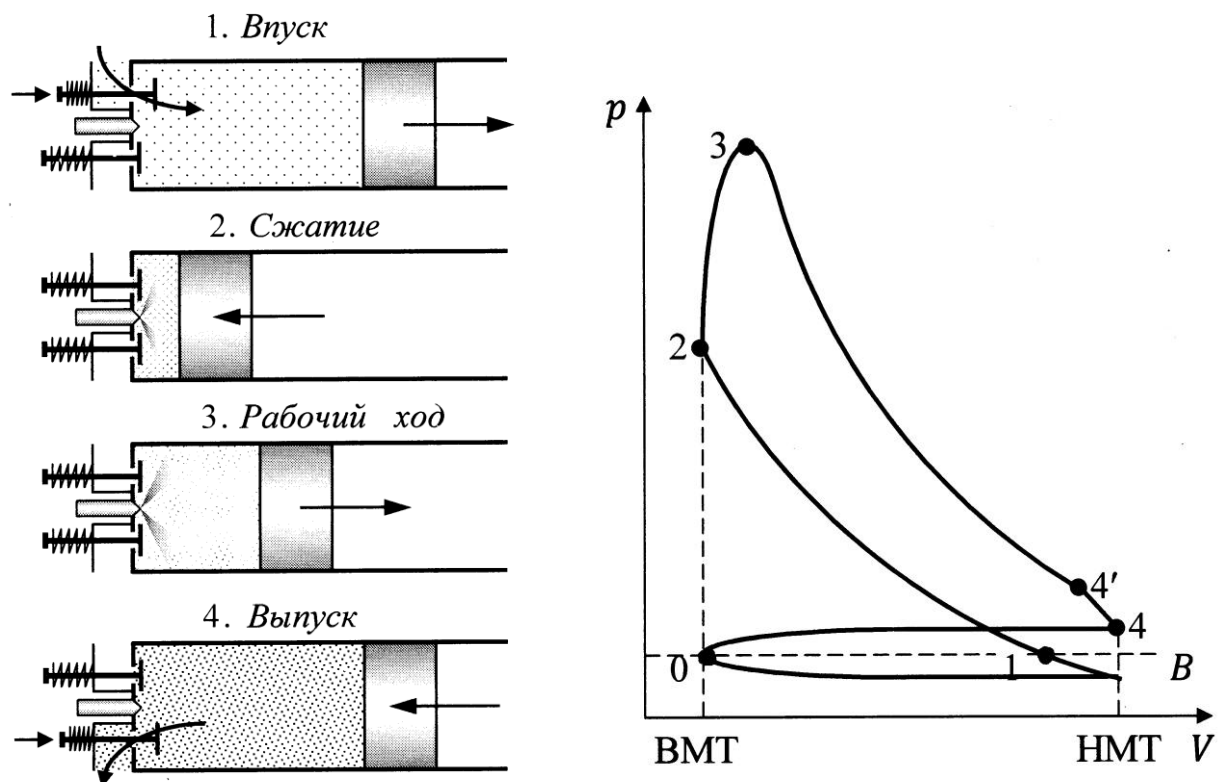


Рисунок 6.6 – Рабочие процессы и индикаторная диаграмма четырехтактного дизеля

1-й такт – *впуск или наполнение* (процесс 0-1). Поршень движется от ВМТ к НМТ, впускной клапан открыт, выпускной закрыт. При этом через впускной трубопровод и впускной клапан в цилиндр засасывается воздух из окружающей среды, так как давление в цилиндре из-за увеличения его объема становится несколько ниже атмосферного (0,09 - 0,095 МПа).

Так как в момент прихода поршня в НМТ давление в цилиндре еще ниже атмосферного, впускной клапан закрывается после НМТ (в точке 1).

2-й такт – *сжатие* (процесс 1-2). Процесс сжатия воздуха происходит при движении поршня от НМТ к ВМТ, начиная с момента закрытия впускного клапана. В результате повышается его давление и температура. Такт характеризуется параметром, называемым *давлением в конце сжатия* P_c ,

которое лежит в пределах 3,8 - 5 МПа. В конце сжатия температура воздуха достигает 600 - 800 °С, что превышает температуру самовоспламенения топлива.

3-й такт – *сгорание и расширение (рабочий ход)* (процессы 2-3 и 3-4). В точке 2 в цилиндр топливным насосом высокого давления (ТНВД) через форсунку подается жидкое топливо, мелко распыливается, самовоспламеняется и сгорает. В результате образуются газы, температура и давление которых резко повышаются. Такт характеризуется *максимальным давлением сгорания* P_z (5,5 - 8,5 МПа), имеющим место в точке 3. При этом температура газов может достигать 2000 °С. После этого начинается процесс расширения продуктов сгорания. Газы, действуя на поршень во время рабочего хода, совершают полезную работу. При этом поршень перемещается от ВМТ к НМТ. Чтобы не делать цилиндр двигателя очень длинным, а ход поршня слишком большим, расширение продуктов сгорания осуществляют до давления, превышающее атмосферное (0,25 - 0,45 МПа) (точка 4'), затем с некоторым опережением открывают выпускной клапан. Давление при этом резко понижается почти до атмосферного (точка 4).

4-й такт – *выпуск отработавших газов* (процесс 4 - 0). Поршень движется от НМТ к ВМТ, выталкивая отработавшие газы из цилиндра, которые через выпускной клапан и выпускной трубопровод поступают в выпускной коллектор. Вследствие некоторого сопротивления, возникающего в выпускном клапане, выпуск происходит при давлении, несколько большем атмосферного.

Таким образом, в четырехтактном дизеле только 3-й такт является рабочим, используемым для совершения полезной работы. В течение остальных трех тактов в цилиндре осуществляются вспомогательные процессы, требующие подвод энергии. Во время 1-го и 4-го такта двигатель работает как насос, соответственно засасывающий воздух и выталкивающий отработавшие газы. Эти такты называются «насосными» ходами. Во время 2-го такта двигатель работает в качестве компрессора, сжимающего воздух. Эти процессы осуществляются за счет запаса кинетической энергии вращающегося коленчатого вала (в одноцилиндровом дизеле) или за счет рабочих ходов других цилиндров (в многоцилиндровом дизеле).

Двухтактный двигатель

В двухтактном двигателе рабочий цикл осуществляется за два хода поршня или за один оборот коленчатого вала. Это достигается благодаря тому, что 1-й и 4-й такты 4-тактного двигателя (впуск воздуха и выпуск отработавших газов) заменяются так называемым процессом продувки, включающем очистку рабочего цилиндра от продуктов сгорания и наполнение его свежим зарядом. Продувка происходит только в тот период, когда поршень находится в районе НМТ и осуществляется не поршнем, а предварительно сжатым в компрессоре зарядом воздуха.

Различают две основные схемы продувки: прямоточную (рисунок 6.7,а), когда выпуск газов из цилиндра происходит через выпускной клапан 1 (количество клапанов может быть от 1 до 4), и контурную (рисунок 6.7,б), когда выпуск газов из цилиндра происходит через выпускные окна 4 в выпускной коллектор 5. В обоих случаях наполнение цилиндра свежим зарядом воздуха осуществляется только через продувочные окна 2 из продувочного ресивера 3. Выпускные и продувочные окна размещены в нижней части втулки рабочего цилиндра. При этом они могут располагаться с разных сторон цилиндра, а могут – с одной: верхний ряд – выпускные, нижний ряд – продувочные. Выпускные клапаны располагаются в крышке цилиндра.

Контурные схемы характеризуются тем, что поток продувочного воздуха, поднимаясь сначала снизу вверх по контуру рабочего цилиндра, делает у рабочей крышки поворот на 180° и затем движется в обратном направлении (сверху вниз).

В прямоточных схемах поток продувочного воздуха движется только в одном направлении, его путь меньше, чем в контурных схемах, а следовательно, прямоточные схемы имеют меньшее гидравлическое сопротивление и потерю заряда и лучшую очистку цилиндра от продуктов сгорания.

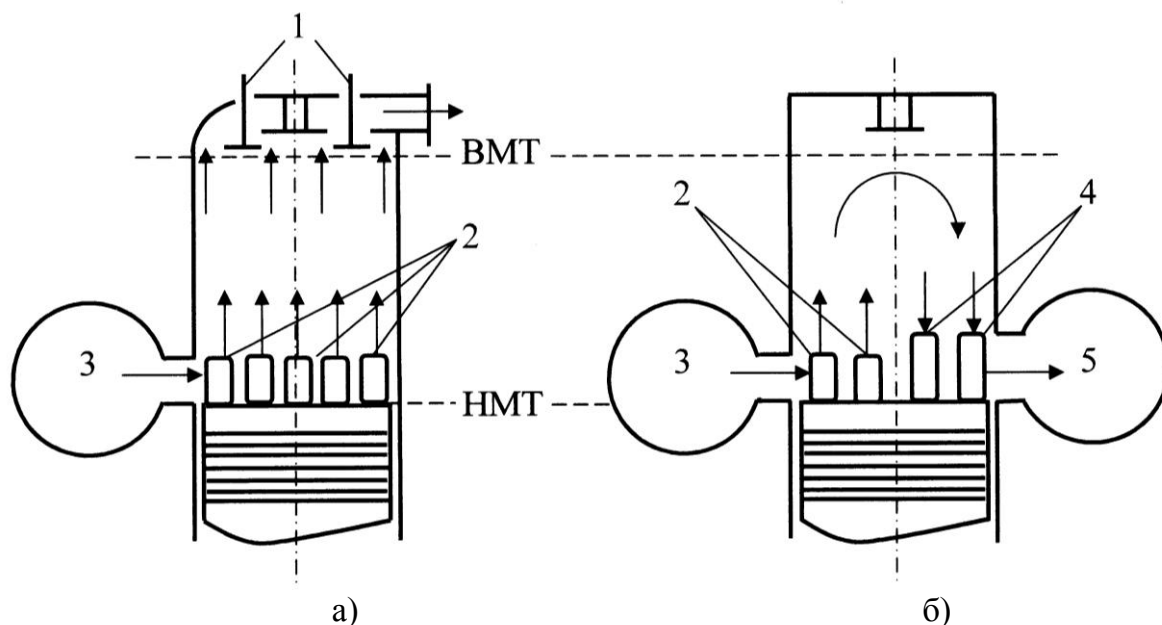


Рисунок 6.7 – Схемы работы двухтактного ДВС с прямоточной (а) и контурной (б) продувками:

1 – выпускные клапаны; 2 – продувочные окна; 3 – продувочный ресивер;
4 – выпускные окна; 5 – выпускной коллектор

Принципиальная схема двухтактного двигателя крейцкопфного типа с контурной продувкой показана на рисунке 6.8.

В отличие от двигателя тронкового типа в крейцкопфном двигателе поршень 7 закреплен на штоке 14, который соединен с поперечиной 13. Поперечина имеет ползун 9, скользящим по параллелям 8, которые обеспечивают возвратно-поступательное движение поршня. Посредством ша-

туна 12 поперечина соединена с кривошипом 10 коленчатого вала. Узел, состоящий из поперечины, штока и ползуна, называется *крейцкопфом*, в связи с чем двигатель такого типа и называется крейцкопфным.

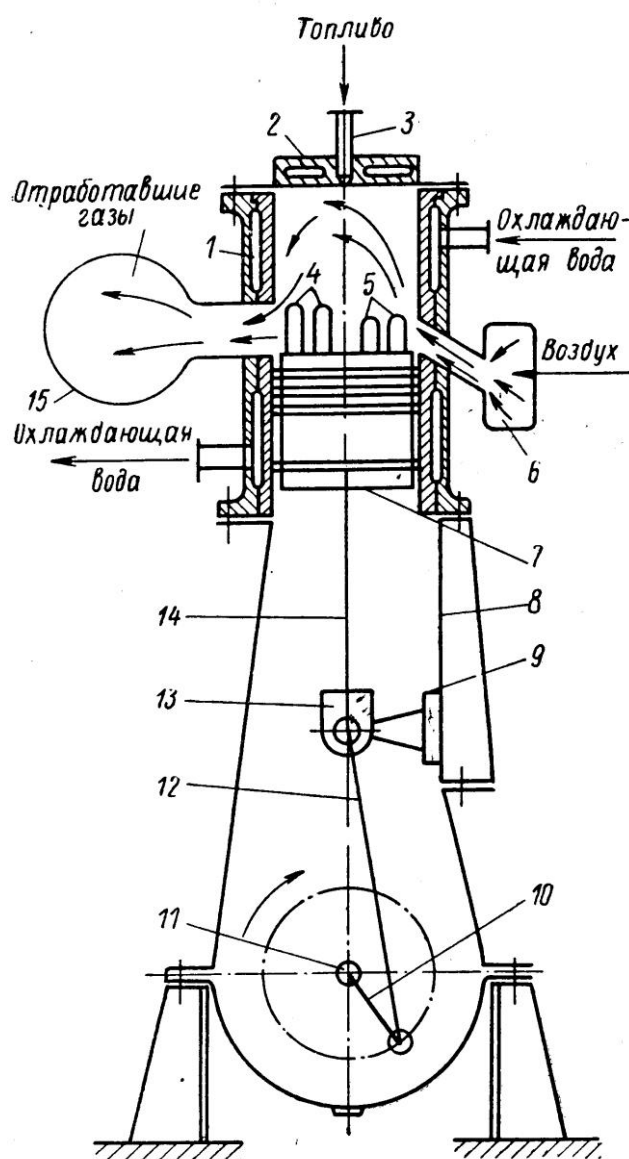


Рисунок 6.8 – Принципиальная схема двухтактного
крейцкопфного дизеля с контурной продувкой

На рисунке 6.9 представлены рабочие процессы и индикаторная диаграмма двухтактного двигателя.

Рабочий цикл такого двигателя состоит из двух тактов.

1-й такт – *сжатие* (процесс 0-1 и 0-2). При восходящем движении поршня от НМТ к поршень сначала перекрывает продувочные окна (точка 1', прекращая тем самым поступление свежего заряда в рабочий цилиндр, а затем и выпускные окна (точка 1), после чего начинается процесс сжатия заряда в цилиндре, который заканчивается, когда поршень придет в ВМТ (точка 2).

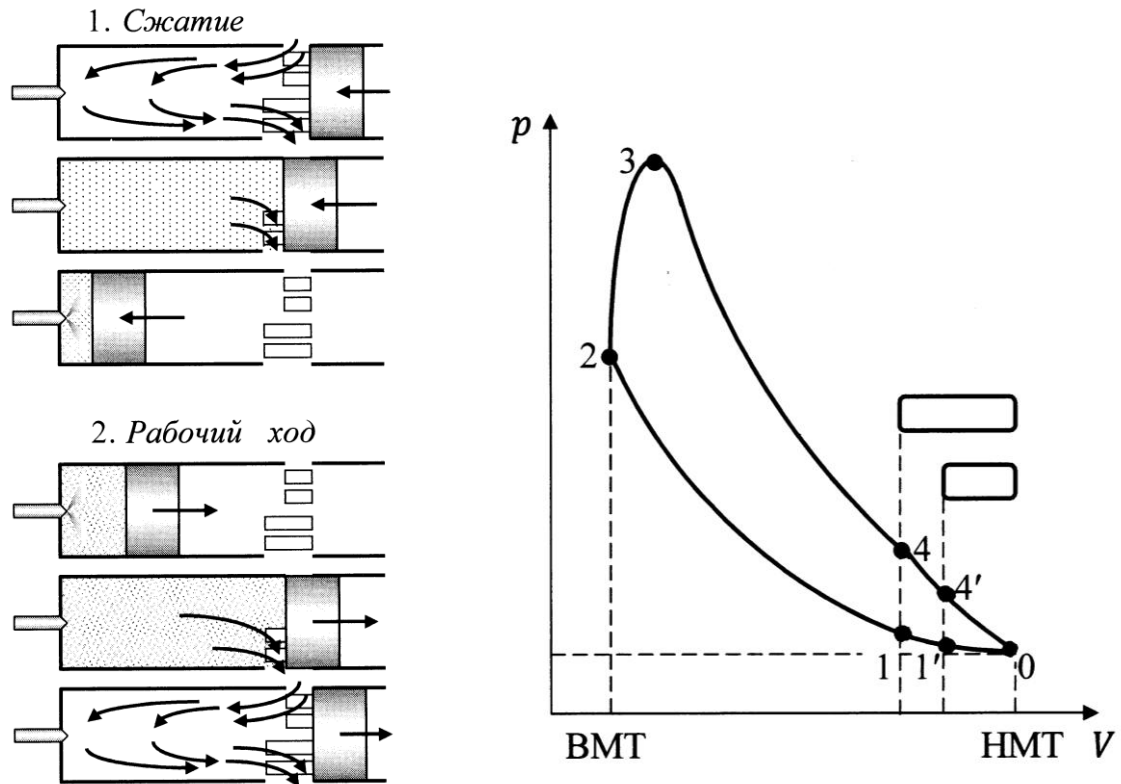


Рисунок 6.9 – Рабочие процессы и индикаторная диаграмма двухтактного дизеля

2-й такт – *сгорание и расширение* (процессы 2-3 и 3-4). Процесс сгорания происходит так же, как и в четырехтактном двигателе. После сгорания поршень перемещается от ВМТ до НМТ. Процесс расширения газов заканчивается в момент начала открытия поршнем выпускных окон (точка 4), после чего начинается выпуск отработавших газов из цилиндра в выпускной коллектор. Затем поршень открывает продувочные окна (точка 4'), и происходит продувка и наполнение цилиндра свежим зарядом, продолжающаяся и за НМТ.

В отличие от дизелей с контурной продувкой в дизелях прямоточно-клапанной продувкой в 1-м такте при восходящем движении поршня одновременно закрываются продувочные окна и выпускные клапаны, после чего начинается процесс сжатия в цилиндре.

Во 2-м такте происходит процесс сгорания и расширения газов, которое заканчивается с момента открытия продувочных окон и выпускных клапанов, приводимых в движение от распределительного вала, имеющего то же число оборотов, что и коленчатый вал двигателя. После открытия продувочных окон происходит продувка и наполнение цилиндра свежим зарядом.

Таким образом, в двухтактном двигателе рабочий ход, обеспечивающий полезную работу, осуществляется во 2-м такте.

Контрольные вопросы

1. Какой двигатель относится к двигателю внутреннего сгорания?
2. Назовите классификацию ДВС по способу смесеобразования, осуществления рабочего цикла и конструктивному исполнению.
3. Что входит в состав четырехтактного дизеля?
4. Назовите такты четырехтактного дизеля.
5. Каково назначение поршня, шатуна и коленчатого вала?
6. Назовите такты двухтактного дизеля.
7. Каково назначение штока в дизеле?
8. Какие виды продувки Вы знаете?

7. СХЕМЫ НАДДУВА ДВС

Краткие теоретические сведения

Наддувом называется увеличение массы воздуха, поступающего в цилиндры двигателя, за счет повышения его давления (сжатия) и охлаждения (увеличения плотности). Это позволяет в том же объеме цилиндра сжечь большую цикловую подачу топлива, что приводит к увеличению мощности двигателя.

Масса воздуха, поступающего в цилиндры двигателя, определяется из формулы

$$m_{\text{в}} = V_s \rho_{\text{в}},$$

в которой плотность воздуха определяется из уравнения состояния:

$$\rho_{\text{в}} = \frac{p_s}{RT_s},$$

где p_s – давление продувочного воздуха, кПа;

T_s – температура продувочного воздуха, К;

R – газовая постоянная, кДж/кг·К.

Из формулы видно, что для увеличения массы воздуха необходимо увеличить его давление и понизить температуру. Осуществляется это путем установки на двигателе специальных надувочных агрегатов и воздухоохладителей.

Увеличение мощности двигателя за счет наддува примерно пропорционально степени наддува, которая определяется отношением среднего эффективного давления при наддуве к среднему эффективному давлению без наддува:

$$\lambda_{\text{н}} = \frac{p_{\text{ен}}}{p_{\text{е}}}.$$

В зависимости от $\lambda_{\text{н}}$ наддув разделяют на пониженный ($\lambda_{\text{н}} < 1,4$), повышенный ($\lambda_{\text{н}} = 1,4 \div 2,0$) и высокий ($\lambda_{\text{н}} > 2,0$).

В судовых двигателях применяют три способа наддува:

1) *Механический*, при котором нагнетатель (поршневой, центробежный или ротативный) имеет привод от коленчатого вала двигателя. Недостатком способа является то, что на привод нагнетателя затрачивается часть мощности двигателя (от 7 до 10%), что приводит к снижению механического КПД и повышению удельного расхода топлива. Этот способ применяют при пониженном наддуве во вспомогательных двигателях небольшой мощности.

2) *Газотурбинный* наддув, при котором нагнетатель (воздушный компрессор) имеет привод от газовой турбины, работающей на отработавших газах двигателя. Таким образом, нагнетатель имеет с двигателем только газовую связь (со свободным турбокомпрессором). При таком типе наддува механический КПД двигателя достаточно высок при сравнительно низком удельном расходе топлива.

3) *Комбинированный* наддув, при котором одновременно используется нагнетатель, работающий от газовой турбины, и нагнетатель с механическим приводом от коленчатого вала или электродвигателя.

Современные дизельные установки работают в основном с газотурбинным и комбинированным наддувом.

Принципиальная схема такого наддува для четырехтактного двигателя показана на рисунке 7.1.

Отработавшие газы из цилиндра двигателя поступают через выпускные клапаны в газовую турбину Т, которая приводит во вращение колесо воздушного компрессора К. Атмосферный воздух поступает в компрессор через воздушный фильтр (на рис не показан). Сжатый в компрессоре воздух перед поступлением в цилиндр проходит через охладитель О, прокачиваемый заборной водой. Газовые турбины и компрессоры в большинстве случаев выполняют одноступенчатыми, турбины – осевого типа, компрессоры – центробежного типа.

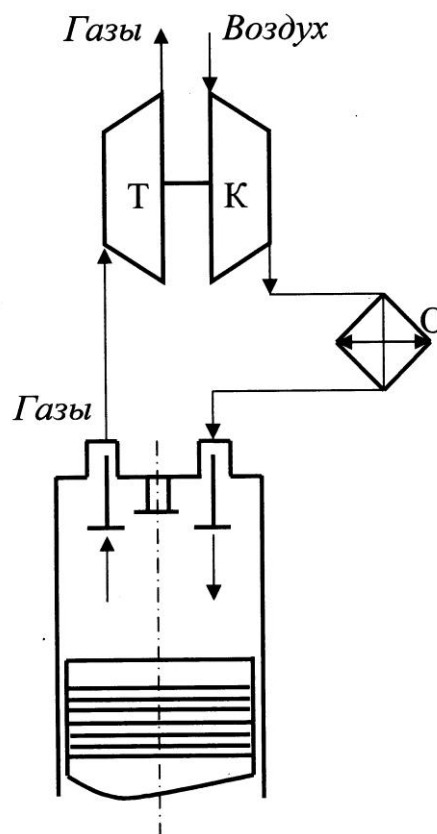


Рисунок 7.1 – Принципиальная схема газотурбинного наддува

По способу использования энергии выпускных газов различают наддув при работе турбины на газах постоянного давления (*изобарный наддув*) и наддув при работе турбины на газах переменного давления (*импульсный наддув*).

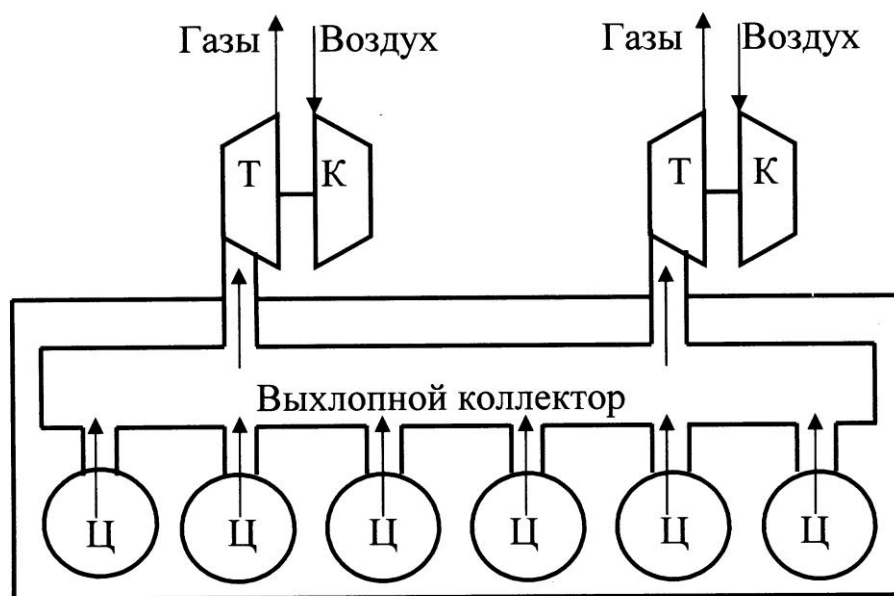
При изобарном наддуве (рисунок 7.2,а) газы из всех цилиндров двигателя направляются в общий выхлопной коллектор, объем которого определяется из соотношения $V_k = 3 \sum V_s$, где $\sum V_s$ – сумма рабочих объемов всех цилиндров.

Благодаря значительному объему выхлопного коллектора в нем устанавливается практически постоянное давление. Из общего выхлопного коллектора газы могут поступать на несколько турбин. Газовая турбина приводит во вращение компрессор, находящемуся с ней на одном валу и осуществляющему сжатие воздуха.

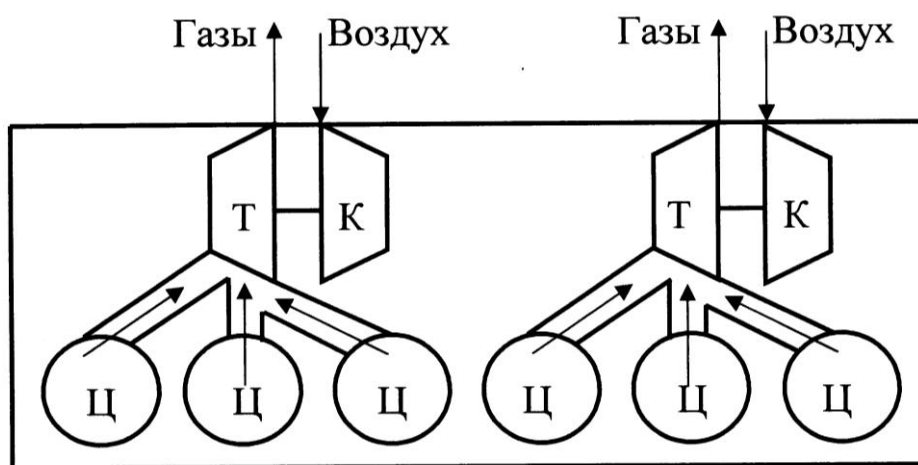
Преимуществами системы являются простота конструкции газовой выхлопной системы, возможность наиболее удобного места расположения турбокомпрессора и сравнительно высокий КПД турбины (порядка 80 %).

К недостаткам относится то, что внезапное расширение газов в выхлопном коллекторе приводит к потере кинетической энергии, которая

превращается в тепловую. Поэтому при пуске и на малых нагрузках турбина не развивает достаточной мощности для обеспечения двигателя воздухом, а также не обладает необходимой приемистостью (быстрым реагированием на изменение режима работы).



а)



б)

Рисунок 7.2 – Системы наддува:

а) изобарный наддув; б) импульсный наддув

При импульсном наддуве (рисунок 7.2,б) выпускные патрубки из цилиндров выполняются короткими, малого сечения. Выхлопную систему разделяют на несколько отдельных трубопроводов (ветвей), которые подводят к одной или нескольким турбинам. В результате отработавшие газы практически без потерь поступают в газовую турбину. В результате по сравнению с изобарным наддувом используется дополнительная кинетическая энергия газов в виде импульсов (изменения давления) в периоды свободного выпуска.

Преимуществами системы являются хорошая приемистость турбины и более полное использование энергии выпускных газов, что позволяет получить в турбинах большую мощность. К недостаткам относятся усложнение конструкции газовыпускного тракта и меньший КПД турбины, что объясняется ее работой на переменном давлении газов.

На подавляющем числе четырехтактных двигателей осуществляется импульсный газотурбинный наддув со свободным турбокомпрессором. Это объясняется достаточно высокой температурой выпускных газов (порядка 500°C), а следовательно значительной их энергией, наличием насосных ходов поршня (впуска и выпуска), что дает возможность широко варьировать давлением газов перед турбиной, а следовательно ее мощностью. При пуске и на малых нагрузках смена заряда происходит независимо от работы турбокомпрессора, так как двигатель сам засасывает необходимое количество воздуха и вытесняет продукты сгорания. Это обеспечивает хорошую приемистость двигателя.

Из-за отсутствия в двухтактном двигателе насосных ходов для обеспечения хорошего газообмена требуется большее количество воздуха, а следовательно большая производительность компрессора. Особенностью процесса газообмена двухтактного двигателя является смешивание продувочного воздуха с продуктами сгорания, что понижает их температуру и, следовательно, энергию. В результате энергии выпускных газов недостаточно для обеспечения необходимой мощности турбины, а следовательно, необходимой производительности компрессора. К особым трудностям относится обеспечение продувочным воздухом двигателя при пуске и работе на малых нагрузках.

Поэтому применение газотурбинного наддува со свободным турбокомпрессором возможен только в двухтактных двигателях, имеющих наиболее совершенную прямоточно-клапанную продувку (рисунок 7.3). Отработавшие газы поступают через выпускные клапаны на лопатки турбины. После сжатия в компрессоре и охлаждения в охладителе воздух попадает в продувочный ресивер ПР. При пуске двигателя турбокомпрессор раскручивается сжатым пусковым воздухом из баллонов. После набора оборотов он начинает обеспечивать необходимую производительность.

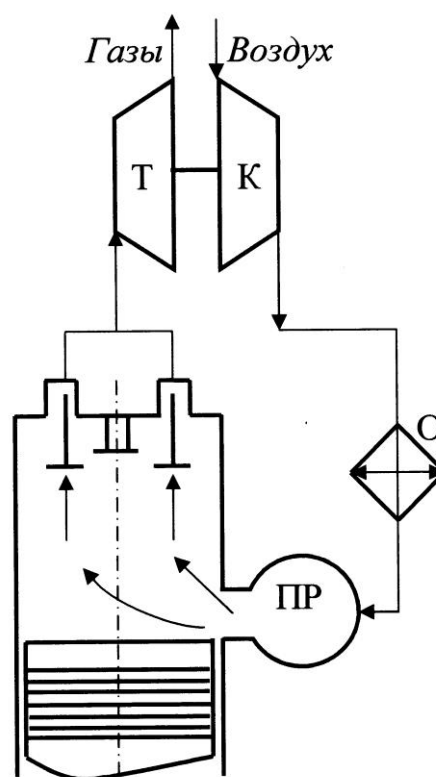


Рисунок 7.3 – Принципиальная схема газотурбинного наддува двухтактного двигателя с прямоточно-клапанной продувкой

У двухтактных двигателей с контурной продувкой для обеспечения работы на всех эксплуатационных режимах необходимо иметь, кроме свободных ГТН, дополнительный подвод воздуха от приводного нагнетателя. Поэтому в подобных двигателях применяются комбинированные системы наддува, которые отличаются способом подключения механических нагнетателей, в качестве которых используются поршневые насосы или подпоршневые полости (ППП) цилиндров двигателя (рисунок 7.4).

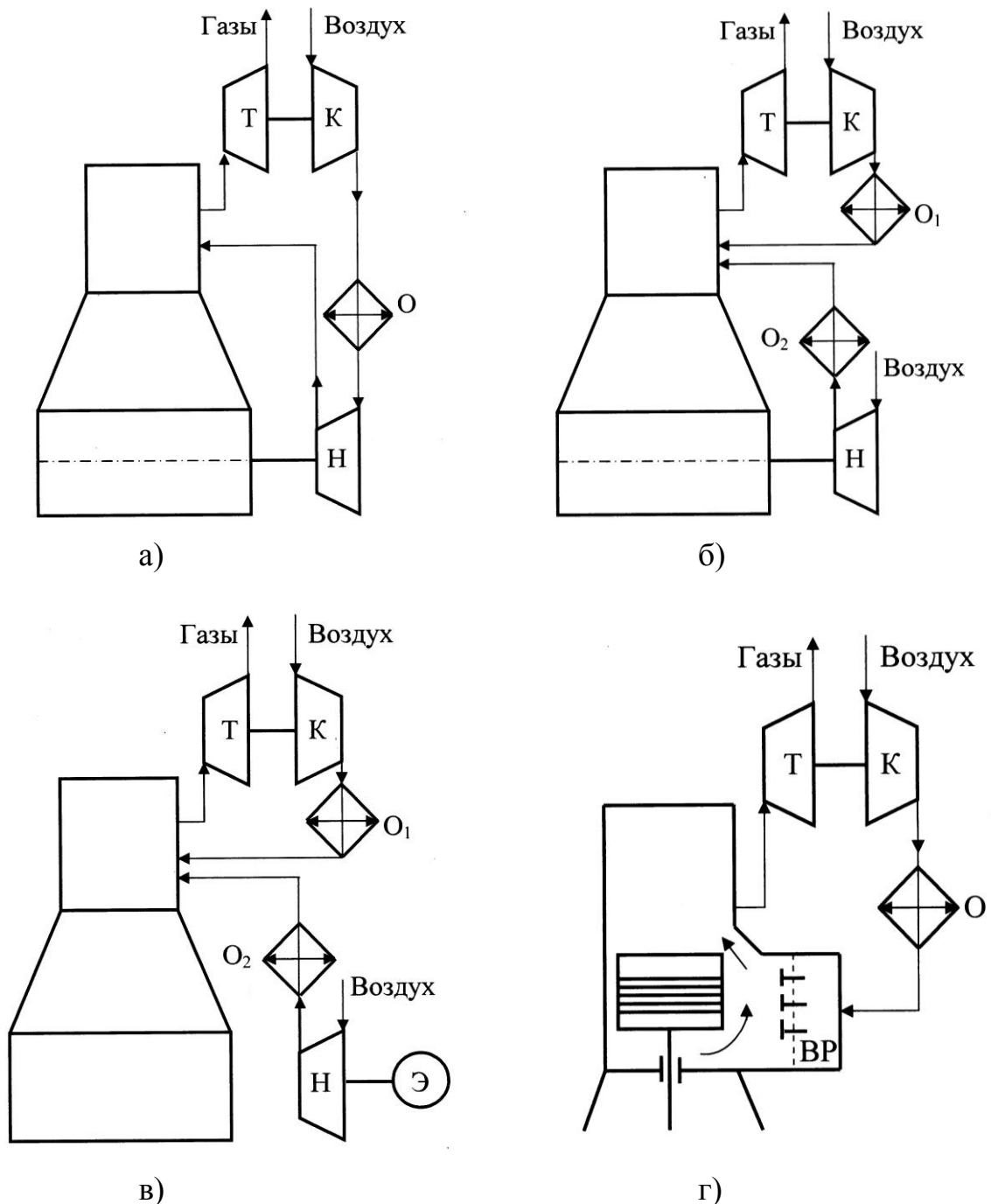


Рисунок 7.4 – Комбинированные системы наддува:

а) последовательная; б) параллельная с приводом механического нагнетателя от коленчатого вала двигателя; в) параллельная с приводом механического нагнетателя от электродвигателя; г) наддув с использованием подпоршневых полостей цилиндров двигателя

В *последовательной* 2-ступенчатой системе (рисунок 7.4,а) в качестве первой ступени используется свободный турбокомпрессор, а в качестве второй ступени – приводной от двигателя механический нагнетатель. С этой системой наддува судовой двигатель может работать на всех режимах, включая пуск и маневрирование.

В *параллельной* системе (рисунок 7.4,б) воздух в ресивер двигателя одновременно поступает от турбокомпрессора и приводного от двигателя механического нагнетателя. В этом случае каждый из нагнетателей доставляет часть потребного для двигателя воздуха.

Недостатком первых двух систем является снижение механического КПД двигателя за счет затраты мощности на привод механического нагнетателя.

Видоизменением параллельной системы является привод добавочного нагнетателя не от двигателя, а от электродвигателя (рисунок 7.4,в).

Для уменьшения снижения механического КПД применяется наддув, в котором в качестве механического нагнетателя используются подпоршневые полости (ППП) цилиндров двигателя (рисунок 7.4,г). В этом случае воздух, сжатый в турбокомпрессоре, через охладитель поступает в общий для всех цилиндров воздушный ресивер (ВР), откуда периодически (при ходе поршня вверх) подается через невозвратные клапаны в индивидуальные для каждого цилиндра подпоршневые полости. При движении поршня вниз воздух дополнительно сжимается и в момент открытия продувочных окон поступает в цилиндры, куда одновременно подается воздух непосредственно от турбокомпрессора.

Сжатие воздуха в ППП предназначено для обеспечения кратковременного импульса в начальной стадии продувки, что обеспечивает хорошую продувку и предохраняет заброс газов в подпоршневые полости. Эта система получила название последовательной системы наддува с байпасированием.

Мощность двигателя, затрачиваемая на сжатие воздуха в ППП, незначительна (около 3 %).

В двухтактных двигателях применяется как импульсный, так и изобарный наддув.

Контрольные вопросы

1. Дайте понятие наддува.
2. Какие способы наддува Вы знаете?
3. Что такое изобарный и импульсный наддув?
4. Какой наддув называется комбинированным?
5. Какие виды комбинированного наддува Вы знаете?

8. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Краткие теоретические сведения

К вспомогательным механизмам на судне относятся: насосы, вентиляторы, компрессоры, теплообменные аппараты, сепараторы.

Общие сведения о насосах и их классификация

Насосом называется механизм для перемещения жидкости за счет сообщения ей дополнительной энергии первичного двигателя (либо теплового, либо электродвигателя).

Основными параметрами, характеризующими работу насоса, являются производительность, напор, потребляемая мощность и коэффициент полезного действия (КПД).

Производительность насоса – количество жидкости, подаваемое насосом в единицу времени, выражается в кубических метрах в час или в секунду и обозначается Q ($\text{м}^3/\text{ч}$, $\text{м}^3/\text{с}$).

Напор насоса – это удельная (отнесенная к единице веса жидкости) энергия, сообщаемая перекачиваемой жидкости в насосе. Обозначается H и измеряется в метрах (м).

Полезная мощность насоса $N_{\text{п}}$ – энергия, сообщаемая жидкости в насосе в единицу времени. Определяется из выражения

$$N_{\text{п}} = \rho g Q H, \text{ Вт.}$$

Мощность, потребляемая насосом, вычисляется по формуле

$$N = M \omega, \text{ Вт,}$$

где M – крутящий момент на валу насоса, Н·м,

ω – угловая скорость вращения вала, 1/с.

Мощность насоса N больше полезной мощности $N_{\text{п}}$ вследствие неизбежных потерь энергии в насосе, а именно, на преодоление гидравлических сопротивлений, в результате утечек и преодоления механического трения в насосе (в подшипниках, сальниках и пр.).

КПД насоса – это отношение полезной мощности к мощности насоса:

$$\eta = \frac{N_{\text{п}}}{N}.$$

По принципу действия насосы делятся на две группы: *объемные* и *динамические*.

В *объемных насосах* передача энергии жидкости происходит в процессе ее вытеснения из рабочей камеры рабочим органом.

В *динамических насосах* передача энергии жидкости происходит в результате силового воздействия на нее рабочего органа в рабочей камере.

Из насосов первой группы на судах в основном используются роторные насосы (шестеренные (рисунок 8.1) и винтовые (рисунок 8.2)), применяемые на судах для перекачки жидкостей с вязкостью большей, чем вязкость воды (топлива, смазочного масла).

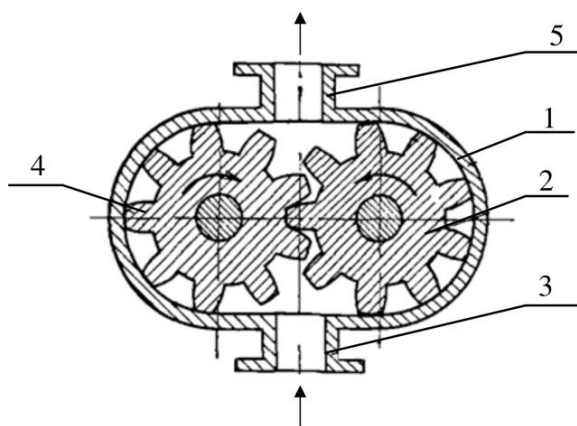


Рисунок 8.1 – Шестеренный насос:
1 – корпус, 2,4 – шестерни; 3 – всасывающий
патрубок; 5 – нагнетательный патрубок

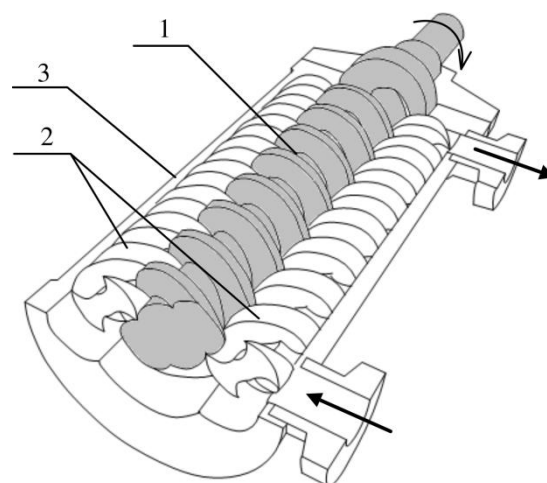


Рисунок 8.2 – Винтовой насос
1 – ведущий винт; 3 – ведомые винты
2 – корпус

В роторных насосах жидкость перемещается в результате равномерного вращения роторов различной формы (шестерен или винтов, находящихся в зацеплении). При вращении ротора жидкость перемещается из приемной полости в напорную, из которой она вытесняется в напорный трубопровод.

Роторные насосы надежны в работе, могут быть непосредственно соединены с быстроходными двигателями, просты по конструкции и имеют небольшие габариты и вес. Основным недостатком шестеренных насосов является высокая чувствительность к загрязнению перекачиваемой жидкостью механическими примесями, а также увеличение зазоров в процессе эксплуатации из-за износа шестерен. Основным недостатком винтовых насосов является сложный профиль нарезки винтов, что удорожает их изготовление.

Из насосов второй группы на судах используются центробежные и струйные насосы.

Простейшим судовым центробежным насосом является насос с консольным расположением рабочего колеса и односторонним входом жидкости (рисунок 8.3).

Насос состоит из корпуса, в котором вращается закрепленное на валу 6 рабочее колесо 2, представляющее собой два диска, между которыми находятся лопасти 4, изогнутые в сторону, противоположную вращению. Корпус насоса имеет входной патрубок 1, спиральный отвод 8 и напорный патрубок 3. В месте прохождения вала через корпус находится сальник 5, препятствующий вытеканию жидкости из насоса по зазору между корпусом и втулкой колеса. Подшипники вала 7 расположены с одной стороны колеса.

Жидкость подводится к внутренней центральной части корпуса, захватывается лопастями рабочего колеса и благодаря возникающей при вращении центробежной силе отбрасывается от центра к периферии в спи-

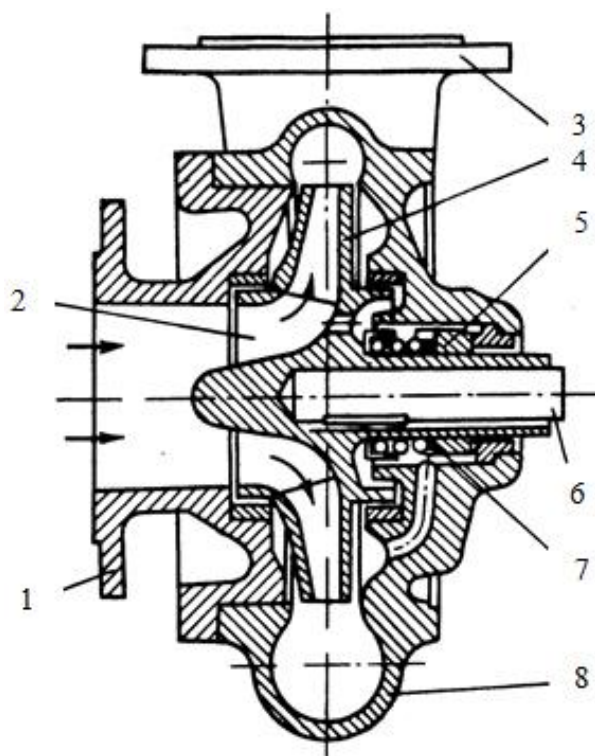


Рисунок 8.3 – Центробежный насос

ральный отвод. При этом энергия от электродвигателя передается жидкости посредством силового воздействия на нее лопастей рабочего колеса. Спиральный отвод имеет улиткообразную форму и предназначен для улавливания выходящей из колеса жидкости перед выходом ее в напорный трубопровод.

Центробежные насосы широко используются на судах как в системах ЭУ в качестве питательных, конденсатных, циркуляционных насосов систем охлаждения, так и в общесудовых системах в качестве пожарных, балластных, санитарных и пр.

Они просты по конструкции, обладают малыми массой и габаритами, надежны в работе даже при перекачке загрязненных жидкостей. Однако они не могут всасывать жидкость, когда в приемном трубопроводе находится воздух. Поэтому перед запуском подводящий трубопровод и сам насос необходимо заполнить перекачиваемой жидкостью. В отдельных случаях центробежные насосы снабжаются специальными самовсасывающими устройствами (вакуум-насосом).

В струйном насосе жидкость перемещается благодаря смешению ее с той же или иной жидкостью, обладающей большей кинетической энергией.

Примером струйного насоса служит водо-водяной эжектор для откачки воды из затопленного отсека (рисунок 8.4).

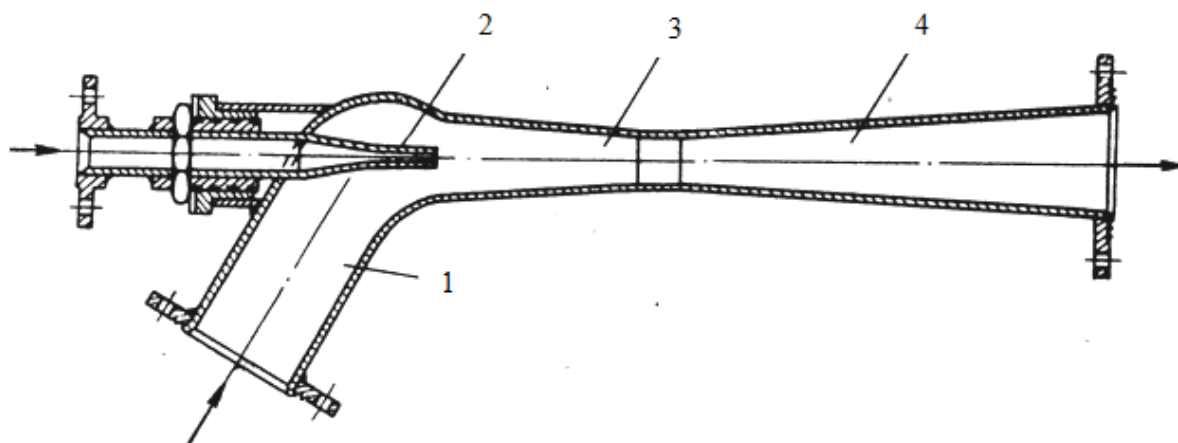


Рисунок 8.4 – Водо-водяной эжектор

Рабочая вода подается к соплу 2 из пожарной магистрали, из которого выходит с большой скоростью (40 - 50 м/с), благодаря чему в камере смешения 3 создается разрежение, обеспечивающее засасывание откачиваемой воды через патрубок 1. В процессе смешения скорость рабочей струи уменьшается, а скорость откачиваемой воды увеличивается. В диффузоре скорость воды снижается до 2 - 5 м/с, а давление возрастает.

Эжекторы просты по конструкции, так как не имеют движущихся частей, надежно работают с загрязненными и агрессивными жидкостями. Обладают хорошим всасыванием. Однако они имеют низкий КПД (менее 30 %).

Судовые насосы в большинстве случаев имеют привод от электродвигателей. Однако в случае двигателей (ГД, ВД) большой мощности могут иметь привод от их валов (так называемые навешенные насосы).

Судовые вентиляторы

Вентиляторы предназначены для принудительного перемещения воздуха.

На судах применяются центробежные и осевые вентиляторы.

Конструкция центробежного вентилятора (рисунок 8.5), который также часто называют радиальным, включает в себя два основных элемента – электродвигатель и крыльчатку, имеющую ряд лопастей. Визуально он похож на колесо, а при исполнении в спиральном корпусе центробежный вентилятор выглядит как улитка.

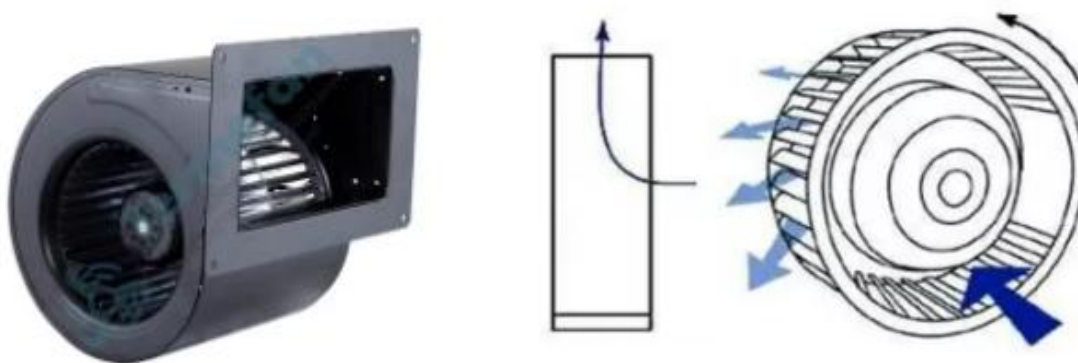


Рисунок 8.5 – Центробежный вентилятор

Осевые вентиляторы (рисунок 8.6) еще называют аксиальными, поскольку они перемещают воздух параллельно оси рабочего колеса, в отличие от центробежных, которые перемещают воздух перпендикулярно оси. Устройство представляет собой двигатель с крыльчаткой, лопасти которой напоминают пропеллер.

По назначению вентиляторы делятся на котельные, предназначенные для подачи воздуха для сжигания топлива в парогенераторах, вентиляторы машинных отделений и общесудовой вентиляции.

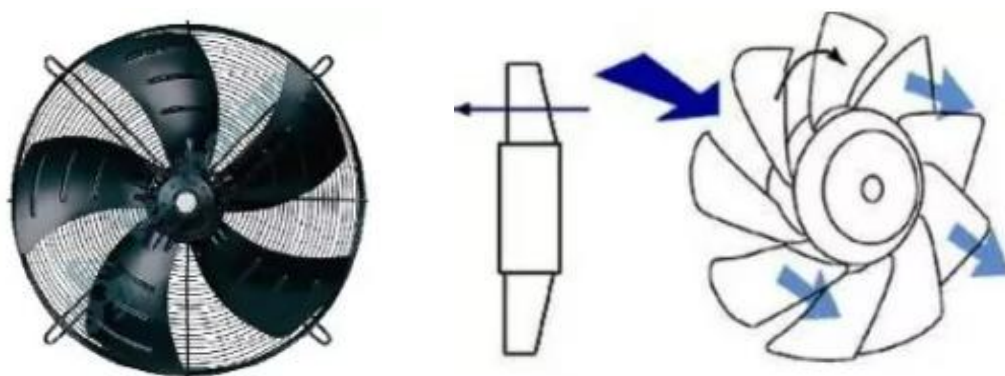


Рисунок 8.6 – Осевой вентилятор

Судовые компрессоры

Компрессорами называются механизмы, предназначенные для сжатия воздуха и обеспечения им потребителей СЭУ и в целом судна. Характеризуются производительностью и давлением нагнетания.

На судах применяются поршневые, центробежные и осевые компрессоры, которые могут иметь привод как от электродвигателя, так и от теплового двигателя.

Поршневой компрессор (рисунок 8.7) состоит цилиндра, внутри которого находится поршень, совершающий возвратно-поступательное движение в помощь коленчатого вала и шатуна. Крайние положения поршня называются мертвыми точками, а расстояние между ними – ходом поршня. Во время движения поршня вниз происходит всасывание воздуха при открытом всасывающем клапане и заполнение им цилиндра. При обратном движении поршня всасывающий клапан закрывается, воздух сжимается до требуемого давления и выталкивается через нагнетательный клапан.

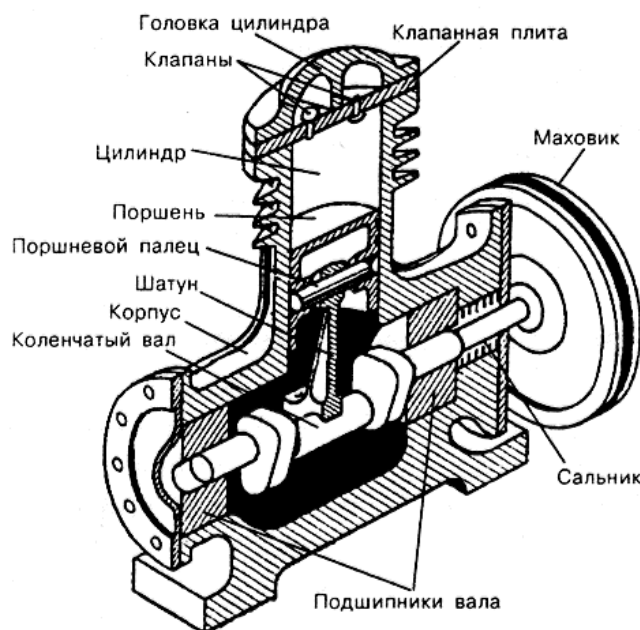


Рисунок 8.7 – Схема поршневого компрессора

Наибольшее распространение получили электроприводные поршневые одно- и многоступенчатые компрессоры с охлаждением воздуха после каждой ступени, которые используют для пуска главных, вспомогательных и аварийных двигателей, для работы систем автоматики, заполнения баллонов пеногенераторов, зарядки аквалангов и других хозяйств.

Необходимость применения многоступенчатых компрессоров вызвана тем, что степень сжатия воздуха в одной ступени не должна превышать 8, то есть воздух в первой ступени можно сжимать до давления 0,8 МПа. При этом температура воздуха достигает 170 - 220 °С. В связи с тем, что температура вспышки компрессорных смазочных масел составляет 250 - 280 °С, дальнейшее повышение давления может привести к взрыву и разрушению компрессора. Поэтому воздух после первой ступени охлаждается в специальном воздухоохладителе примерно до первоначальной температуры. Необходимость охлаждения воздуха после последней ступени объясняется тем, что по требованию Правил Регистра температура воздуха, поступающего в пусковые баллоны, не должна превышать 40 °С.

Поршневые компрессоры обеспечивают высокое давление нагнетания при небольшой производительности.

Большую производительность при относительно низком давлении имеют центробежные и осевые компрессоры.

Центробежные компрессоры применяют на судах для наддува ДВС. Под наддувом понимают увеличение массы воздуха, поступающего в цилиндры двигателя, за счет повышения его давления и охлаждения. Это позволяет в том же объеме цилиндра сжечь большую порцию топлива, а следовательно, повысить мощность двигателя.

Такой компрессор имеет привод от турбины выхлопных газов ГД. Компрессор и приводящую его турбину называют *турбокомпрессором* (ТК).

Центробежный компрессор (рисунок 8.8) состоит из корпуса 1, в котором вращается диск 2, снабженный изогнутыми рабочими лопатками в виде каналов 4. Воздух поступает через входной направляющий аппарат 3 в межлопаточные каналы, отбрасывается центробежными силами к периферии с повышенной скоростью. Далее воздух поступает в неподвижную расширяющуюся часть – диффузор 5 и направляющие лопатки 6, в которых происходит преобразование кинетической энергии воздуха в потенциальную энергию давления. В улиточном диффузоре 7 поток воздуха окончательно формируется и приобретает дополнительную потенциальную энергию за счет торможения. Полученный таким образом сжатый воздух через выходной патрубок поступает на нагнетание.

Центробежные компрессоры могут быть одноступенчатыми и многоступенчатыми с односторонним и двухсторонним подводом воздуха. Они просты по конструкции, надежны в эксплуатации, имеют небольшие вес и длину. Их недостатком является относительно низкий КПД (70 - 80 %) и большие радиальные размеры.

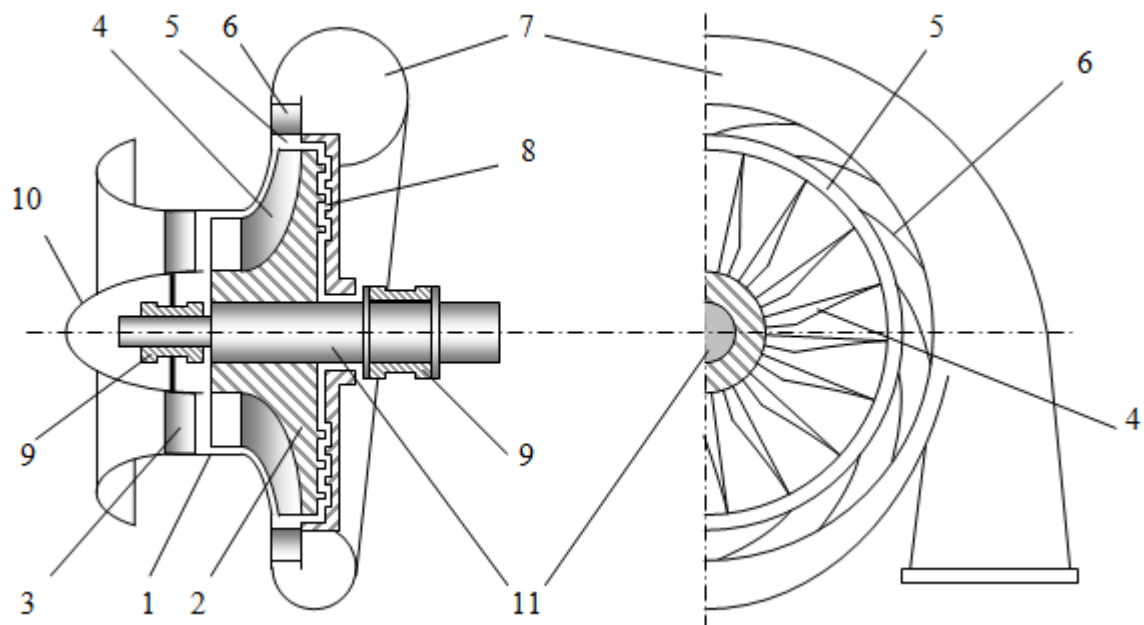


Рисунок 8.8 – Схема центробежного компрессора:

- 1 – корпус; 2 – рабочее колесо; 3 – входной направляющий аппарат;
 4 – рабочие лопатки; 5 – безлопаточный диффузор; 6 – направляющие лопатки;
 7 – улитка с концевым диффузором; 8 – уплотнения; 9 – подшипники;
 10 – обтекатель; 11 – вал компрессора

Осевые компрессоры применяют в газотурбинных установках (см. раздел 4). Они обладают высоким КПД (85 - 88 %), имеют небольшие радиальные размеры, могут обеспечить большую производительность. К их недостаткам относятся значительные размеры по длине и сложность конструкции.

Теплообменные аппараты

Теплообменный аппарат или *теплообменник* – это устройство, предназначенное для нагревания, охлаждения или для изменения агрегатного состояния теплоносителя. Чаще всего в теплообменных аппаратах осуществляется передача теплоты от одного теплоносителя к другому, то есть нагревание одного теплоносителя происходит за счет охлаждения другого.

На судах теплообменные аппараты используются в качестве подогревателей тяжелого топлива (паром), охладителей воздуха, масла и пресной воды (заборной водой), конденсаторов, испарителей.

Рабочие поверхности теплообменников выполняют из гладких или оребренных труб (трубные теплообменники) или из пластин (пластинчатые теплообменники). Наиболее распространены трубные теплообменники.

На рисунке 8.9 изображена схема простейшего трубного теплообменника для передачи теплоты от одного теплоносителя к другому. Он состоит из пучка теплопередающих труб 2, жестко закрепленных в трубных ре-

шетках (досках) 1, которые снаружи закрываются крышками 4. Трубы расположены внутри общего кожуха 3. Один из теплоносителей I движется в трубах, а другой II – в пространстве между трубами и кожухом (межтрубном пространстве). Трубы размещают в регулярном порядке по коридорной или шахматной схеме.

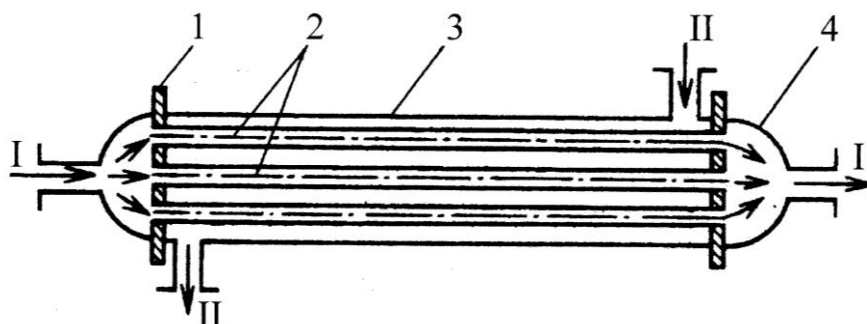


Рисунок 8.9 – Схема трубного теплообменника

Сепараторы

Сепаратор предназначен для разделения жидкостей на компоненты, которые до этого находились в механической смеси, а также для отделения твердых примесей.

На судах сепарированию перед использованием в двигателях подвергают топливо и смазочное масло. Удаление примесей и воды из топлива необходимо для обеспечения его хорошего сгорания. Благодаря удалению загрязняющих примесей из смазочного масла удастся уменьшить изнашивание деталей двигателя и предотвратить возможные неполадки и поломки.

Для этих целей используются сепараторы центробежного типа. При этом различают два режима работы сепаратора: пурификация (отделение как твердых примесей, так и воды) и кларификация (отделение только твердых примесей). Режим пурификации используется для сепарирования обводненных сортов топлива, кларификации – для очистки топлива, которое мало содержит или совсем не содержит воду.

Центробежный сепаратор (рисунок 8.10) состоит из электродвигателя, который приводит во вращение вертикальный вал. В верхней части сепаратора смонтирован барабан, внутри которого установлен пакет конических дисков (тарелок) с отверстиями. Тарелки отделены друг от друга небольшим зазором. На корпусе сепаратора расположены входные и выпускные трубопроводы.

Работа пурификатора осуществляется следующим образом. Неочищенное топливо подается в барабан по центральному патрубку, поступает в межтарельчатое пространство и поднимается вверх по пакету тарелок.

Вода и шлам как более тяжелые компоненты под действием центробежных сил перемещаются к периферии барабана, а чистое топливо – к его

оси вращения. Чистое топливо и отсепарированная вода выходят из барабана в верхней его части по отдельным трубопроводам.

В отличие от пурификатора барабан кларификатор имеет только одно выпускное отверстие.

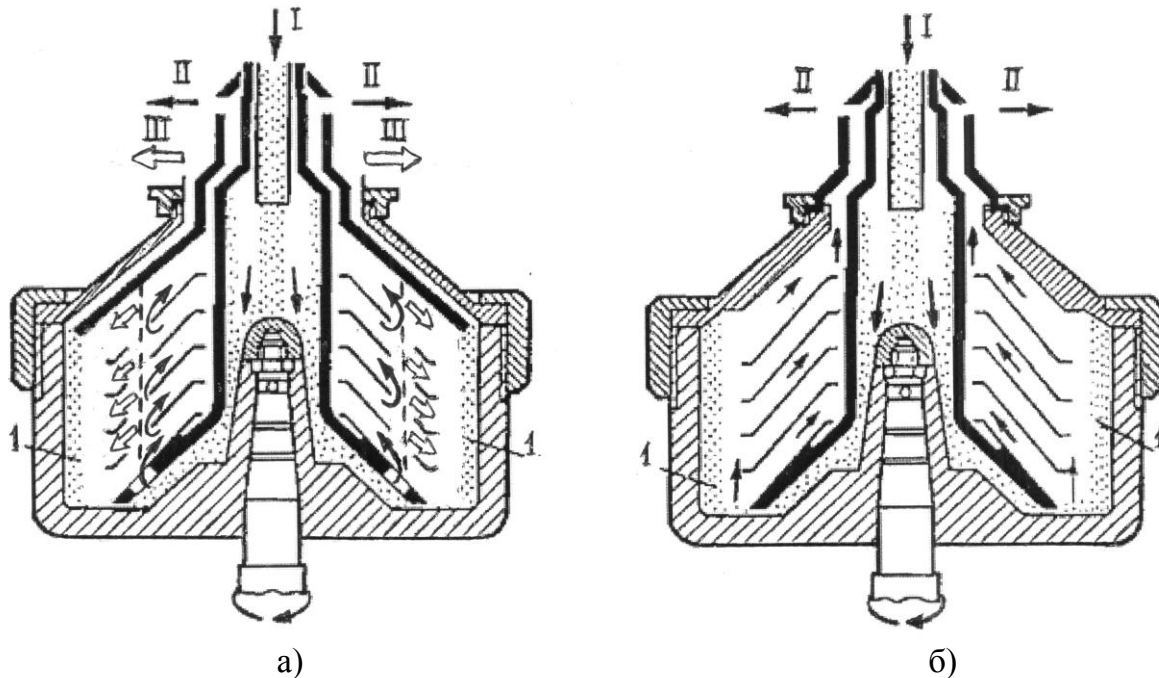


Рисунок 8.10 – Устройство и принцип работы центробежного сепаратора:
а) пурификатор; б) кларификатор; 1 – слой шлама; I – подача в барабан неочищенного топлива; II – отвод из барабана очищенного топлива; III – отвод из барабана отсепарированной воды

Контрольные вопросы

1. С какой целью на судах применяются насосы?
 2. Какие параметры характеризуют работу насоса?
 3. Назовите классификацию насосов по принципу действия.
 4. Какой принцип действия роторных насосов? С какой целью они применяются на судах?
 5. Какой принцип действия центробежных насосов? С какой целью они применяются на судах?
 6. Какой механизм называется эжектором?
 7. Назовите разновидности судовых вентиляторов.
 8. Какой механизм называется компрессором?
 9. С какой целью в СЭУ применяются поршневые компрессоры?
 10. Каково назначение турбокомпрессора? Что входит в его состав?
 11. Какой механизм называется теплообменным аппаратом?
 12. Какие теплообменные аппараты используются в СЭУ?
- Что такое сепаратор? С какой целью применяются сепараторы на судах?

9. РАСЧЕТ ЗАПАСОВ ТОПЛИВА И СМАЗОЧНОГО МАСЛА

Краткие теоретические сведения

Автономность плавания судна или длительность выполнения судном своих функций в значительной мере зависит от величины судовых энергетических запасов (СЭЗ), то есть от запасов топлива, смазочного масла и пресной воды на нужды судовой энергетической установки.

Запасы топлива, принимаемого на судно за период автономности, зависят от удельных расходов, мощности главной и вспомогательной энергетической установки, автономности судна и его режимов работы.

Различают следующие *режимы работы* на судах транспортного флота: ходовой с полным грузом; ходовой в балласте; стоянка с грузовыми операциями; стоянка без грузовых операций; швартовный (маневровый); аварийный. Для других типов судов (пассажирских, промысловых, буксиров и пр.) могут быть дополнительные специальные режимы: стоянка с пассажирами и без пассажиров, траления, буксировки, спасания и др.

Автономность судна может быть представлена в виде

$$\tau = \sum \tau_x + \sum \tau_{ст},$$

где $\sum \tau_x$ – продолжительность ходовых режимов;

$\sum \tau_{ст}$ – продолжительность стояночных режимов.

Продолжительность ходовых режимов определяется из соотношения:

$$\tau_x = \frac{S}{v \cdot 24},$$

где S – дальность плавания в милях;

v – скорость судна в узлах.

Продолжительность стояночных режимов с проведением грузовых операций зависит от характера судна (например, размеров судовых люков, производительности погрузочно-разгрузочных устройств и пр.), а также от технического и организационного оснащения порта. Непроизводительные простои судна связаны с потерями времени в ожидании причала, бункеровки СЭЗ, погрузки провианта и пр. Продолжительность стоянок за рейс $\tau_{ст}$ колеблется от 1 до 10 суток.

На переходах работают главный двигатель (ГД) обычно с 90 % нагрузкой и один из вспомогательных дизель-генераторов (ВД) с 50 % нагрузкой для обеспечения электроэнергией потребителей на ходовом режиме. Однако, если в состав СЭУ входит валогенератор, то он обеспечивает все потребности в электроэнергии на ходовом режиме. На ходу все потребности в паре и горячей воде обеспечивает утилизационный котел, поэтому стояночный котел не работает.

На стоянке под разгрузкой в порту одновременно работают один или два вспомогательный дизель-генератор с 90 % нагрузкой и котел (ВПК) с 85 % нагрузкой.

Исходными данными для расчета являются следующие.

1. Мощность ГД: $Ne^{ГД}$.
2. Удельный расход топлива ГД: $be^{ГД}$.
3. Мощность ВД: $Ne^{ВД}$.
4. Удельный расход топлива ВД: $be^{ВД} = 0,195$ кг/кВт.
5. Производительность пара ВПК: $D = 18$ т/ч.

Обычно для работы СЭУ используются два вида топлива - тяжелое (основное) и легкое топливо.

Запасы тяжелого топлива составляют:

$$G_T = k_M \cdot (G_X + G_{CT}),$$

где $k_M = 1,1 \div 1,2$ – коэффициент морского запаса, учитывающий возможное увеличение расхода топлива в условиях морской эксплуатации (штормовая погода, обрастание и обледенение корпуса судна, морские течения и пр.);

G_X – запасы топлива на время плавания судна за период его автономности;

G_{CT} – запасы топлива на время стоянок.

$$G_X = (be^{ГД} \cdot Ne^{ГД} \cdot t_3 + n be^{ВД} \cdot Ne^{ВД} \cdot t_3) \cdot \tau_X \cdot 24 \cdot 10^{-3}, \text{ т,}$$

где n – количество работающих двигателей;

t_3 – коэффициент загрузки двигателя по мощности.

$$G_{CT} = (n be^{ВД} \cdot Ne^{ВД} \cdot t_3 + B^{ВПК} \cdot t_{3ВПК}) \cdot \tau_{CT} \cdot 24 \cdot 10^{-3}, \text{ т,}$$

где $B^{ВПК}$ – часовой расход топлива вспомогательного парового котла, кг/ч

$$B^{ВПК} = \frac{D \cdot (i_p - i_{пв})}{\eta_k \cdot Q_H^P},$$

где D – производительность пара, кг/ч;

$i_p, i_{пв}$ – энтальпия пара и питательной воды, кДж/кг;

η_k – КПД вспомогательного парового котла;

Q_H^P – низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг.

$t_{3ВПК}$ – коэффициент загрузки ВПК по производительности.

Основной запас легкого топлива $G_{ЛТ осн}$ на ввод ГД в действие, его вывод, маневрирование, розжига ВПК и работы инсинератора составляет 5 - 20 % от запаса тяжелого топлива.

Аварийный запас легкого топлива $G_{ЛТ ав}$ составляет 20 % от основного.

Объем цистерн запаса топлива определяется из выражения:

$$V_{ц} = k_3 \cdot \frac{G}{\rho}, \text{ м}^3,$$

где k_3 – коэффициент, учитывающий расширение топлива и наличие не удаленных остатков (мертвый запас) (принимается $k_3 = 1,1$),

ρ – плотность топлива, т/м³.

Различают циркуляционные масла, применяемые для всех дизелей (как тронковых, так и крейцкопфных) (непрерывная подача масла к трущимся поверхностям деталей в двигателях осуществляется путём циркуляции масла под давлением в циркуляционной масляной системе) и цилиндровые масла, используемые только для смазки ЦПГ крейцкопфных МОД (точечная смазка втулок и некоторых навешенных механизмов у мощных МОД осуществляется насосами – лубрикаторами).

Расчет запасов циркуляционного масла должен учитывать потери масла в системе смазки двигателя (на угар) и смену масла в системе за период автономности (на слив).

Таким образом, общий расход двигателем циркуляционного масла G_m складывается из расходов масла на угар G_y и слив $G_{сл}$:

$$G_m = G_y + G_{сл}.$$

Расход масла на угар складывается из необратимых потерь при забросе масла в камеру сгорания, попадания на нагретые поверхности цилиндрических втулок и испарения из картера, и определяется удельным расходом масла на угар $g_{е уг}$ с учетом коэффициента морского запаса k_m . (1,02 - 1,15).

$$G_y = k_m \cdot g_{е уг} \cdot N_e \cdot \tau \cdot 24 \cdot 10^{-6}, \text{ т},$$

где τ – время работы двигателя за период автономности, сут.

Расход масла на слив определяется из выражения:

$$G_{сл} = g_{сл} \cdot N_e \cdot \rho_m \cdot 10^{-6}, \text{ т},$$

где $g_{сл}$ – удельное количество масла в системе смазки, л/кВт;

ρ_m – плотность масла, кг/м³.

Количество цилиндрического масла для определяется из выражения:

$$G_{цил} = k_m \cdot g_{е цили} \cdot N_e \cdot \tau \cdot 24 \cdot 10^{-6}, \text{ т},$$

где $g_{е цили}$ - удельный расход цилиндрического масла, г/кВт·ч.

Объем цистерн запаса масла определяется с учетом коэффициента «загроможденности» и «мертвого» запаса k_z (принимается $k_z = 1,02 \div 1,05$):

$$V_{ц} = k_z \cdot \frac{G_m}{\rho_m}, \text{ м}^3,$$

Контрольные вопросы

1. От чего зависит необходимый запас топлива за рейс судна?
2. Как рассчитать запас топлива за рейс судна?
3. От чего зависит необходимый запас смазочного масла за рейс судна?
4. Как рассчитать запас масла за рейс судна?

10. СХЕМЫ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ СЭУ

Краткие теоретические сведения

Назначение топливной системы: прием (бункеровка) и хранение топлива на судне; предварительная обработка топлива (подогрев, отстаивание, сепарирование, гомогенизация и фильтрация); подача топлива к двигателям и котлам. В некоторых установках, преимущественно с МОД, топливо используется для охлаждения форсунок.

В связи с обширностью выполняемых функций топливная система условно делится на три подсистемы: приемотрекачивающую, топливоподготовки и топливоподачи к двигателям и котлам. Кроме того, часто в СЭУ используют несколько сортов топлива. В этом случае предусматривают самостоятельные трубопроводы для каждого из видов топлива, например дизельного, тяжелого, котельного.

Приемотрекачивающая система

Приемотрекачивающая система выполняет следующие функции: прием топлива с берега или другого судна (бункеровщика), перекачивание топлива между цистернами, выравнивание крена и дифферента судна при выполнении грузовых операций и в аварийных ситуациях.

Прием топлива на судно осуществляется с помощью внесудовых средств с береговых или плавучих бункеровочных баз. Для этого на главной палубе в средней части судна по обоим бортам предусматривают специальные приемные станции, отделенные от других помещений. Станции приема топлива оборудуют фильтром предварительной очистки (или грязевой коробкой), измерительным устройством (нефтемером), термометрами и манометрами.

Топливо подают на судно с помощью насосов по шлангу с плотно соединенными патрубками, служащими для присоединения к системам судна и бункеровщика. При использовании нескольких сортов топлива для каждого из них могут предусматриваться автономные приемные и перекачивающие трубопроводы.

Запасы топлива, принимаемого на судно за период автономности, зависят от удельных расходов, мощности главной и вспомогательной энергетической установки, автономности судна и его режимов работы.

В состав системы входят цистерны (танки) основного запаса, цистерны аварийного запаса и переливные цистерны.

Цистерны основного запаса обычно располагают в бортовых отсеках и в междудонном пространстве в виде нескольких цистерн с симметричным расположением относительно диаметральной плоскости судна.

Цистерны аварийного запаса, не требующего подогрева, размещают вне двойного дна. Их вместимость должна быть не менее суточного запаса

топлива на энергетическую установку (обычно принимают 20 % от запасов основного топлива).

Переливные цистерны служат для приема в них топлива в случае переполнения цистерн. Они располагаются на судне как можно ниже: в двойном дне или под настилом пола МО.

Все топливные цистерны оборудуют воздушными трубами, выведенные на верхнюю открытую палубу с учетом противопожарных требований и снабженные огневыми предохранителями, мерительными трубами, лазами для осмотра и очистки, а цистерны тяжелого топлива – змеевиками-подогревателями, расположенными над днищем, с целью предотвращения его застывания. Температура подогрева должна превышать как минимум на 10 °С температуру его застывания и составлять 40 - 45 °С. Это обеспечивает вязкость мазута менее 1000 сСт, достаточную для его перекачки.

Переливные цистерны оборудуют световой и звуковой предупредительной сигнализацией по верхнему уровню топлива.

При использовании высоковязкого топлива, его подогревают и в трубопроводах при помощи параллельно расположенных паровых труб-спутников.

Система топливоподготовки

Топливо, находящееся в цистернах основного запаса может загрязняться и обводняться. Поэтому перед использованием топлива в двигателях оно проходит топливоподготовку. Для этого на судне предусмотрена специальная система, включающая отстойные цистерны, подогреватели, фильтры и сепараторы.

Очистку от механических примесей и воды осуществляют на первом этапе посредством отстаивания в отстойных цистернах (как тяжелого, так и легкого топлива), в которых из-за разности плотностей происходит частичное отделение от топлива воды и твердых примесей. Для эффективности отстаивания тяжелое топливо в цистернах подогревают до температуры 70 - 75 °С.

Принципиальная схема системы топливоподготовки представлена на рисунке 10.1. Из танков запаса через клапанную коробку и фильтр грубой очистки топливо подается одним из топливоперекачивающих насосов (второй насос резервный) в отстойные цистерны. Из отстойных цистерн (после выпуска из них воды и шлама) насосами сепараторов топливо подается в сепараторы, где происходит его очистка под действием центробежных сил (второй этап). Перед сепарацией тяжелое топливо подогревают с целью снижения его вязкости до температуры 95 - 98 °С, при котором очистка более эффективная. Подогрев осуществляется в подогревателях. Сепаратор дизельного топлива подогревателем не оборудуется. Обычно предусматриваются два сепаратора тяжелого и один – легкого топлива.

Выделенные в сепараторе вода и твердые примеси направляются в цистерну грязного топлива. В этой цистерне собираются также все примеси, выделенные в результате фильтрации и отстоя в цистернах. Грязное топливо сжигают в мусоросжигательных печах (инсинераторах) или сдают в портах захода судна.

Отсепарированное топливо подается в расходные цистерны.

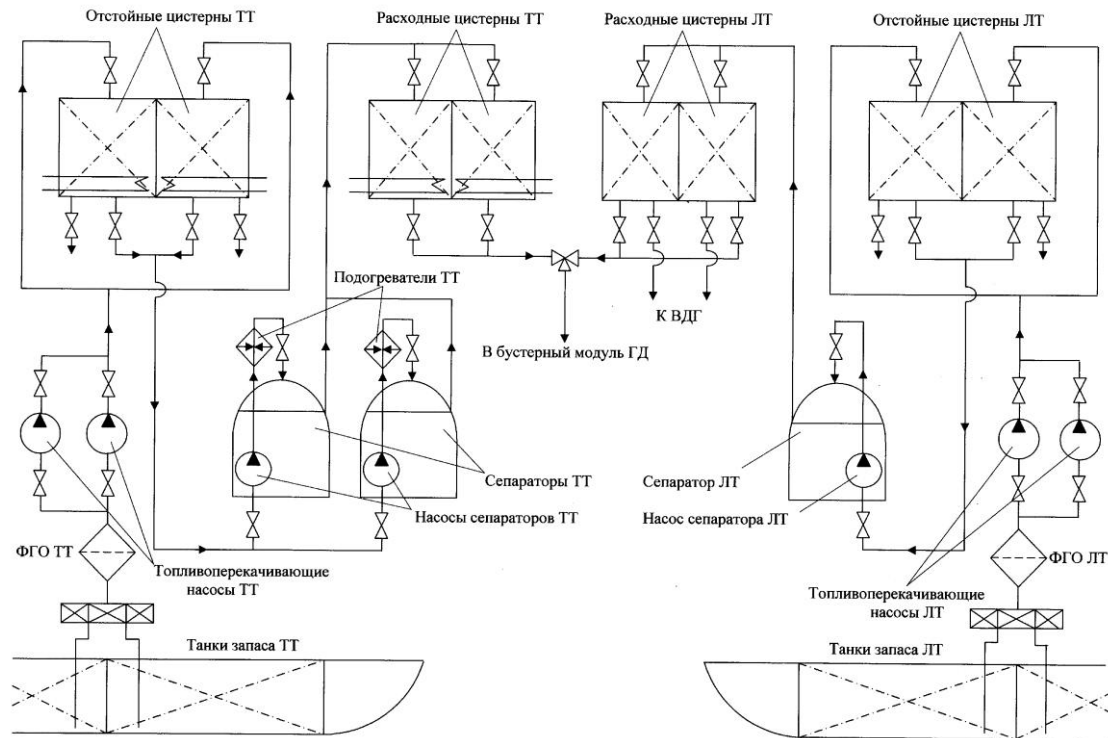


Рисунок 10.1 – Система топливоподготовки ГД

Система топливоподачи

Система топливоподачи служит для подвода топлива из расходных цистерн к топливным насосам высокого давления (ТНВД) двигателей и котлов.

Расходные цистерны выполняются сдвоенными, причем в одной из них осуществляется вторичный отстой топлива, а из другой топливо поступает к двигателю. Для создания подпора для топливоподкачивающего насоса и обеспечения бесперебойной подачи топлива к двигателю (например, при качке судна), расходные цистерны располагают по высоте над двигателями. По правилам Морского регистра Судоходства вместимость каждой из расходных цистерн должна обеспечивать работу двигателей на номинальной мощности не менее 20 часов. Расходные цистерны оборудуются воздушными и измерительными трубами и быстрозапорными клапанами для прекращения подачи топлива в трубопровод, управление которыми осуществляется как на местах, так и с главной палубы. Расходные цистерны тяжелого топлива также снабжаются паровыми змеевиками для поддержания температуры не ниже 80 - 85°C.

На многих судах используют два вида топлива: высоковязкое – для ГД и котлов и маловязкое – для дизель-генераторов. Однако некоторые ДГ в настоящее время приспособлены для работы на тяжелом топливе. Однако при пуске двигателя, его работы на маневрах и перед длительной остановках его работа переводится на легкое топливо с целью предотвращения износа деталей ЦПГ и застывания тяжелого топлива в системе.

Перевод работы двигателя с тяжелого на легкое топливо осуществляется с целью его длительной остановки для ремонта или технического обслуживания. Также возможны различные ситуации (например, маневрирование), требующие переключения сортов топлива.

С этой целью параллельно с расходными цистернами тяжелого топлива в систему включена сдвоенная расходная цистерна дизельного топлива.

Принципиальная схема системы топливоподачи в ГД представлена на рисунке 10.2. Из расходных цистерн мазут, подогретый до $80 - 85^{\circ}\text{C}$, топливоподкачивающим насосом (второй находится в резерве) через автоматический фильтр и расходомер поступает в смесительную цистерну, в верхней части которой подведен сжатый воздух. Давление в цистерне поддерживается $0,4\text{ МПа}$. Далее топливо поступает к одному из циркуляционных насосов (второй резервный), подающий топливо к подогревателям. На судне тяжелое топливо подогревают до температуры $70 - 150^{\circ}\text{C}$, при которой его вязкость должна составлять $9 - 15\text{ сСт}$. Для контроля заданной вязкости и управления подогревателем в систему топливоподачи встроен автоматический регулятор вязкости – вискозиметр. После вискозиметра топливо поступает в ТНВД двигателя.

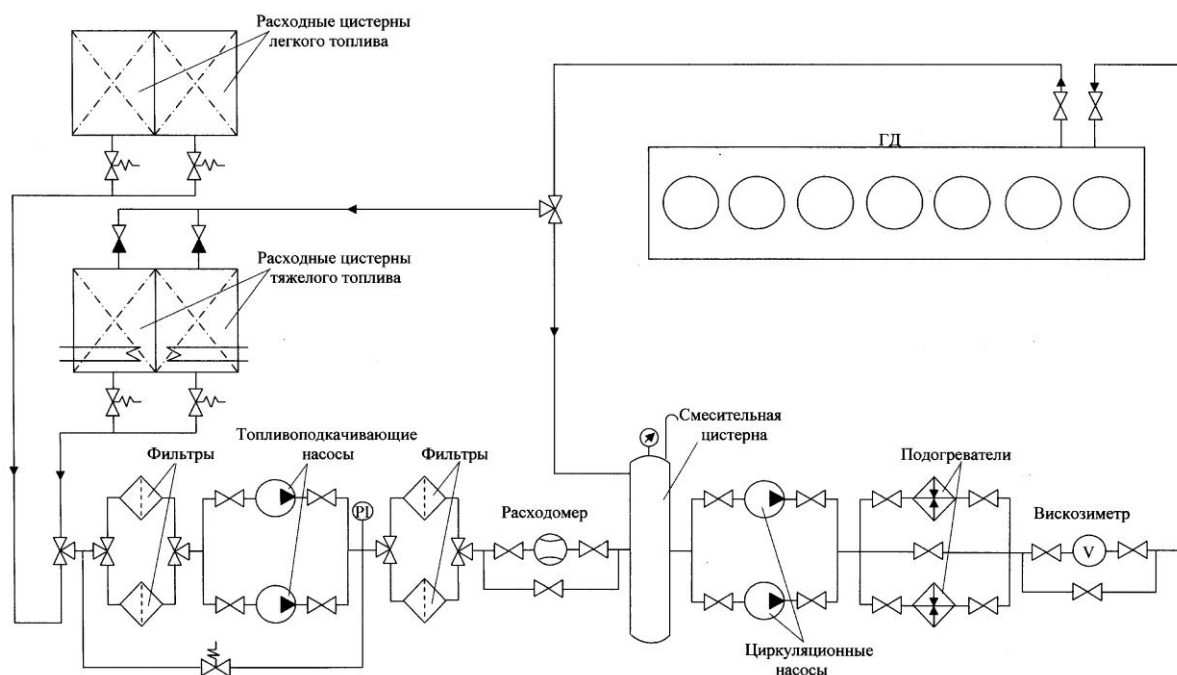


Рисунок 10.2 – Система топливоподачи в ГД

Непосредственное переключение сортов топлив может привести к тому, что вязкость легкого топлива, подаваемого в систему, нагретую до высокой температуры, станет ниже 2 сСт, что приведет к заклиниванию плунжеров ТНВД. Поэтому переход с тяжелого на легкое топливо (и наоборот) осуществляется постепенным их смешением и рециркуляции через смесительную цистерну. Это обеспечивает плавное изменение температуры топлива и доведение его вязкости до требуемого значения.

При работе двигателя на легком топливе в системе предусмотрен обход подогревателей топлива и вискозиметра.

Избыточное количество топлива из ТНВД перепускается в смесительную цистерну.

Контрольные вопросы

1. Из каких основных элементов состоит топливная система СЭУ?
2. Какие типы топливоперекачивающих насосов применяются в топливных системах?
3. Каково назначение отстойных и расходных цистерн?
4. Чем вызвана необходимость подогрева тяжелого топлива?
5. Как контролируется вязкость топлива перед ТНВД?
6. Какова предельная температура подогрева тяжелого топлива?

11. СХЕМЫ МАСЛЯНЫХ СИСТЕМ СЭУ

Краткие теоретические сведения

Масляные системы предназначены для приема, хранения, перекачивания, очистки и подачи масла под давлением к местам охлаждения и смазки трущихся узлов механизмов.

Прием на судно масла, также как и топлива, осуществляется по приемоперекачивающему трубопроводу с использованием шлангов. Для различных сортов масел используются для хранения отдельные цистерны запаса.

Очистка масла осуществляется отстаиванием, фильтрацией и сепарацией.

Различают следующие виды масляных систем.

1. Система напорной циркуляционной смазки, которая применяется для всех типов ДВС (как тронковых, так и крейцкопфных). Система циркуляционной смазки предназначена для обеспечения маслом всех трущихся узлов ДВС, а также для охлаждения поршней. Масло в системе циркулирует под давлением, создаваемым главным масляным насосом, по замкнутому контуру.

2. Система цилиндровой смазки, которая применяется для смазки цилиндров крейцкопфных ДВС и поршневых компрессоров.

На рисунке 11.1 представлена объединенная система циркуляционной и цилиндровой смазки МОД.

Под двигателем расположена сточно-циркуляционная цистерна, из которой масло через фильтр грубой очистки подается циркуляционным насосом (один в работе, другой – в резерве) в магистраль смазочного мала. Далее масло проходит через фильтр тонкой очистки. После фильтра масло направляется при помощи терморегулирующего клапана в масляные охладители или (при низкой температуре) в обход их. Основная часть масла через телескопическую трубу направляется на охлаждение поршней и смазку подшипников. Пройдя узлы смазки и охладив поршни, масло уходит в картер двигателя, откуда сливается в сточно-циркуляционную цистерну.

Такая система циркуляции масла носит название системы с «сухим» картером, так как все масло из картера стекает в сточную цистерну. В тронковых двигателях небольшой мощности применяют системы с так называемым «мокрым» картером, в которых отсутствует сточная цистерна, и отработавшее масло собирается в картере двигателя, откуда оно забирается циркуляционным насосом. Система сухого картера обеспечивает более длительный срок службы масла.

Параллельно основному контуру циркуляции в систему включен контур очистки масла. В блок очистки масла входит сепаратор с насосом подачи масла из сточно-циркуляционного танка и подогревателем. После сепаратора

очищенное от механических примесей и воды масло возвращается в сточно-циркуляционный танк, а грязь уходит в шламовую цистерну. Сепаратор включается периодически по мере загрязнения масла и необходимости его очистки.

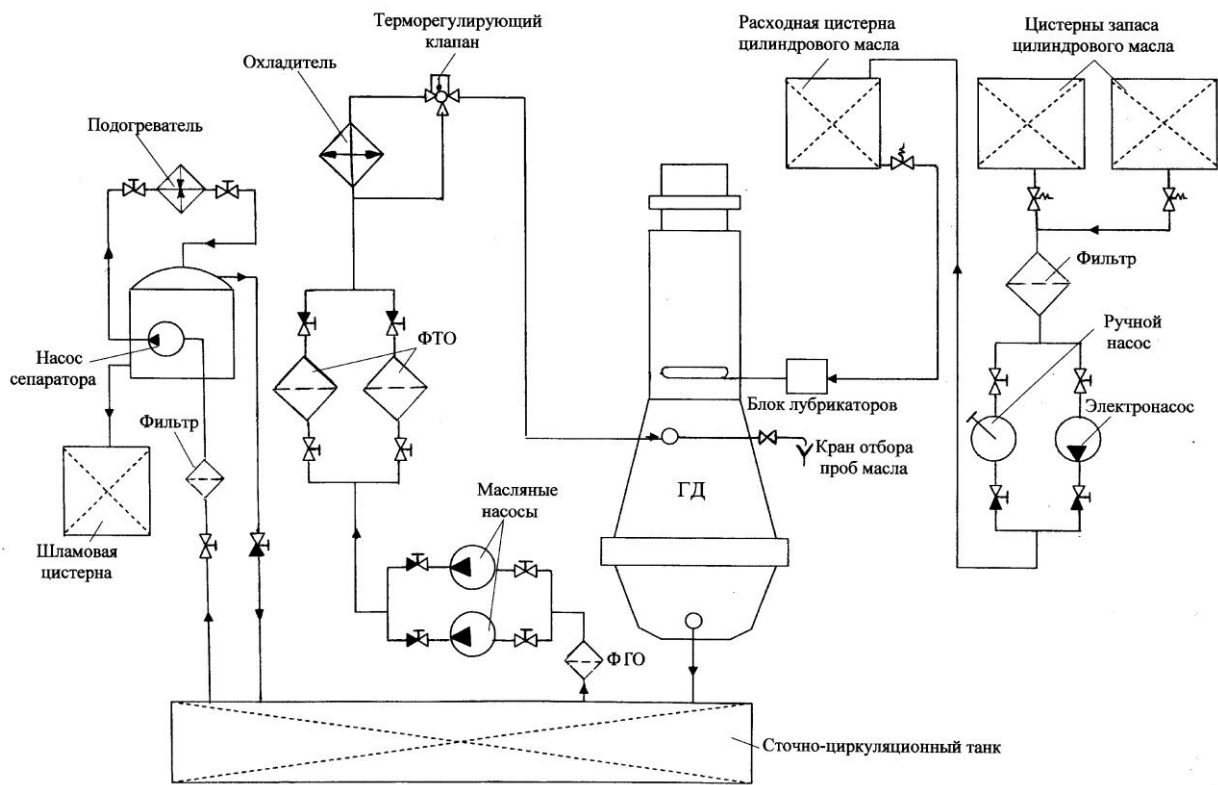


Рисунок 11.1 – Схема масляной системы МОД

Заполнение сточной цистерны осуществляется из расходной цистерны, расположенной на некоторой высоте от второго дна, самотеком.

Система цилиндрической смазки обеспечивает подачу масла непосредственно в цилиндрическую втулку. Система включает две цистерны запаса масла, расходную цистерну, трубопроводы подвода смазки, плунжерные насосы (лубрикаторы), приводимые в действие от двигателя.

Цилиндрическое масло из расходной цистерны самотеком поступает к блоку лубрикаторов, обеспечивающих подачу масла под давлением 5 - 8 МПа к точкам подвода смазки. На каждом цилиндре имеется от четырех до восьми точек смазки. Масло в цилиндры подается дозированными порциями – по несколько капель в каждую точку на ход поршня. Осуществив смазку цилиндров и поршневых колец масло частично сгорает в цилиндре вместе с топливом и в цикл не возвращается.

Заполнение расходной цистерны из цистерны запаса производится с помощью перекачивающего насоса либо с электрическим, либо с ручным приводом через фильтр.

В двигателях тронкового типа смазка цилиндров осуществляется путем разбрызгивания масла, находящегося в картере.

3. Система гравитационной циркуляционной смазки (рисунок 11.2). Такие системы применяют для роторных механизмов (ГТД, паровых турбин, ГТН ДВС). Гравитационная система отличается от напорной тем, что маслоциркуляционные насосы подают масло не к местам смазки, а в гравитационную цистерну, расположенную в верхней части МО, откуда оно поступает на смазку под действием гравитации. Гравитационная цистерна, емкость которой рассчитана на подачу масла к объекту в течение 5 минут, представляет собой элемент защиты на случай остановки циркуляционного насоса. Этого времени достаточно для того, чтобы включить в работу резервный насос или остановить работающий агрегат, например, при обесточивании общесудовой сети.

Из сточно-циркуляционной цистерны 1 ГТН 9 масло через ФГО 2 забирается одним из циркуляционных насосов 3, которые подают масло через маслоохладитель 4 в гравитационную цистерну 6. Откуда самотеком через смотровой фонарь 8 оно попадает к подшипникам нагнетателя 10. Параллельно к контуру циркуляции подключен ФТО 5, через который проходит 10 % циркулирующего в системе масла. Система снабжена переливным трубопроводом 7.

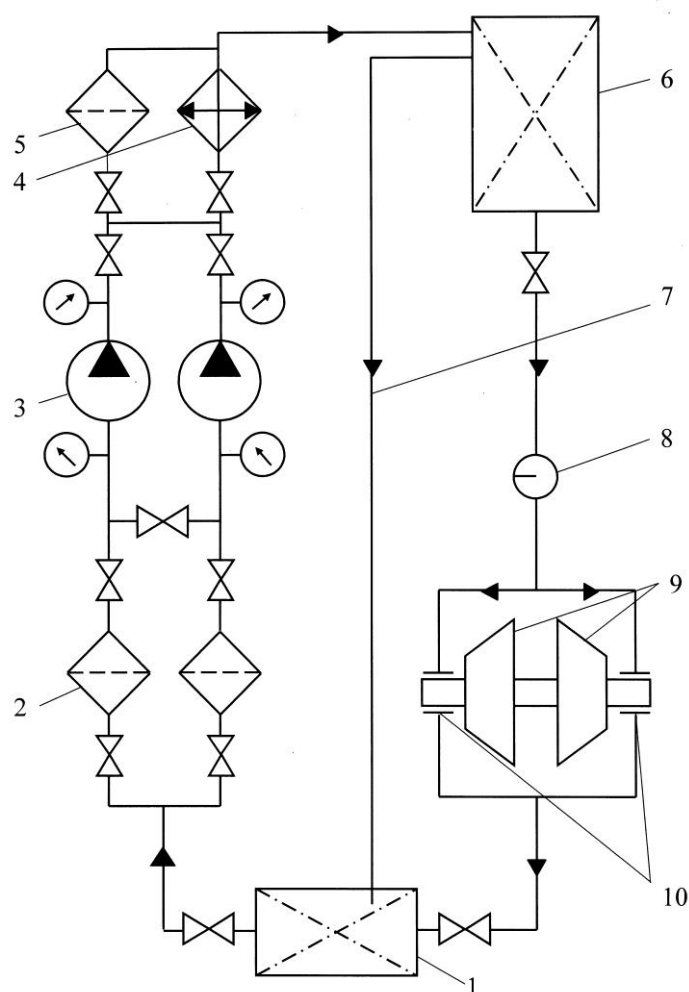


Рисунок 11.2 – Система гравитационной циркуляционной смазки ГТН

Контрольные вопросы

1. Для каких целей служат масляные системы ЭУ?
2. Что понимают под циркуляционной масляной системой?
3. Что понимают под гравитационной масляной системой?
4. Что понимают под лубрикаторной масляной системой?
5. Какие основные элементы входят в состав циркуляционной масляной системы?
6. Что понимают под системой смазки двигателя «с мокрым картером»?
7. Что понимают под системой смазки двигателя «с сухим картером»?
8. Из каких контуров смазки состоит масляная система МОД?

12. СХЕМЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ СЭУ

Краткие теоретические сведения

Системы охлаждения предназначены для отвода теплоты от различных деталей, механизмов, устройств, приборов, а также рабочих сред в теплообменных аппаратах.

В ПТУ система охлаждения служит для конденсации пара в конденсаторах, в ГТУ – для охлаждения деталей ротора и статора газовых турбин, в ДУ – для охлаждения втулок, крышек цилиндров, поршней, форсунок двигателей, пресной воды, надувочного воздуха, цилиндров воздушных компрессоров.

Во всех установках система служит для охлаждения масла в маслоохладителях, подшипников судового валопровода, редукторов главных передач (при наличии), дейдвудных устройств.

В качестве рабочих сред в СЭУ применяются: забортная и пресная вода, масло, топливо и воздух.

Вода по сравнению с другими охлаждающими средами имеет самую большую теплоемкость (у пресной воды изобарная теплоемкость – 4,2 кДж/кг·К) и при скорости 0,5 - 2,5 м/с – высокие коэффициенты теплоотдачи. Это легкодоступная охлаждающая среда, применяемая в установках всех типов. Однако в воде содержатся растворимые соли, микроорганизмы и другие примеси, которые при нагревании выпадают в осадок и осаждаются на поверхности в виде накипи. Особенно много солей и примесей в морской воде, поэтому ее подогрев в теплообменных аппаратах выше 55 °С нежелателен.

Пресная вода допускает нагрев в системах охлаждения при атмосферном давлении до 90 °С, а при повышенном – и более. При этом пресная вода проходит предварительную обработку с целью снижения солесодержания, жесткости и удаления различных примесей. В нее вводят ингибиторы – замедлители коррозии.

Отдельные узлы ГД, где весьма опасна коррозия и нужна более высокая температура кипения, охлаждаются маслом и топливом. Например, в ДУ применяются системы с охлаждением поршней маслом, а форсунок – топливом.

Атмосферный воздух имеет теплоемкость 1 кДж/кг·К (в 4 раза меньше, чем у воды), в связи с чем в системах охлаждения требуется его увеличенное количество и подача со скоростью до 10 м/с и более, что требует повышенного расхода энергии на привод нагнетателей. Поэтому воздух в качестве охлаждающей среды используется в СЭУ только для охлаждения электрогенераторов и электродвигателей (там, где нельзя применять жидкие среды).

Наиболее сложные системы охлаждения применяют в дизельных установках (ДУ). Их обычно выполняют двухконтурными, состоящими из

замкнутой системы пресной воды (высокотемпературный контур), охлаждающей двигателя, и открытой системы заборной воды (низкотемпературный контур), которая в теплообменниках отводит теплоту от пресной воды, масла и непосредственно от некоторых других элементов (подшипников валопроводов и др.).

В систему низкотемпературного контура заборная вода поступает через кингстонные ящики. В МО должно быть не менее двух кингстонных ящиков. Как правило, один из них размещают в двойном дне, а другой – у борта. Их оборудуют устройствами для подачи пара давлением 0,5 МПа, горячей воды и сжатого воздуха давлением 0,3 МПа для подогрева воды в ящиках и продувания приемных решеток. В верхней части кингстонного ящика предусматривается трубопровод для отвода воздуха, попавшего вместе с водой. Далее заборная вода поступает к теплообменным аппаратам для охлаждения пресной воды, выходящей из двигателя.

Отвод охлаждающей воды за борт осуществляется через невозвратно-запорные клапаны.

Одна из возможных схем охлаждения ДУ показана на рисунке 12.1.

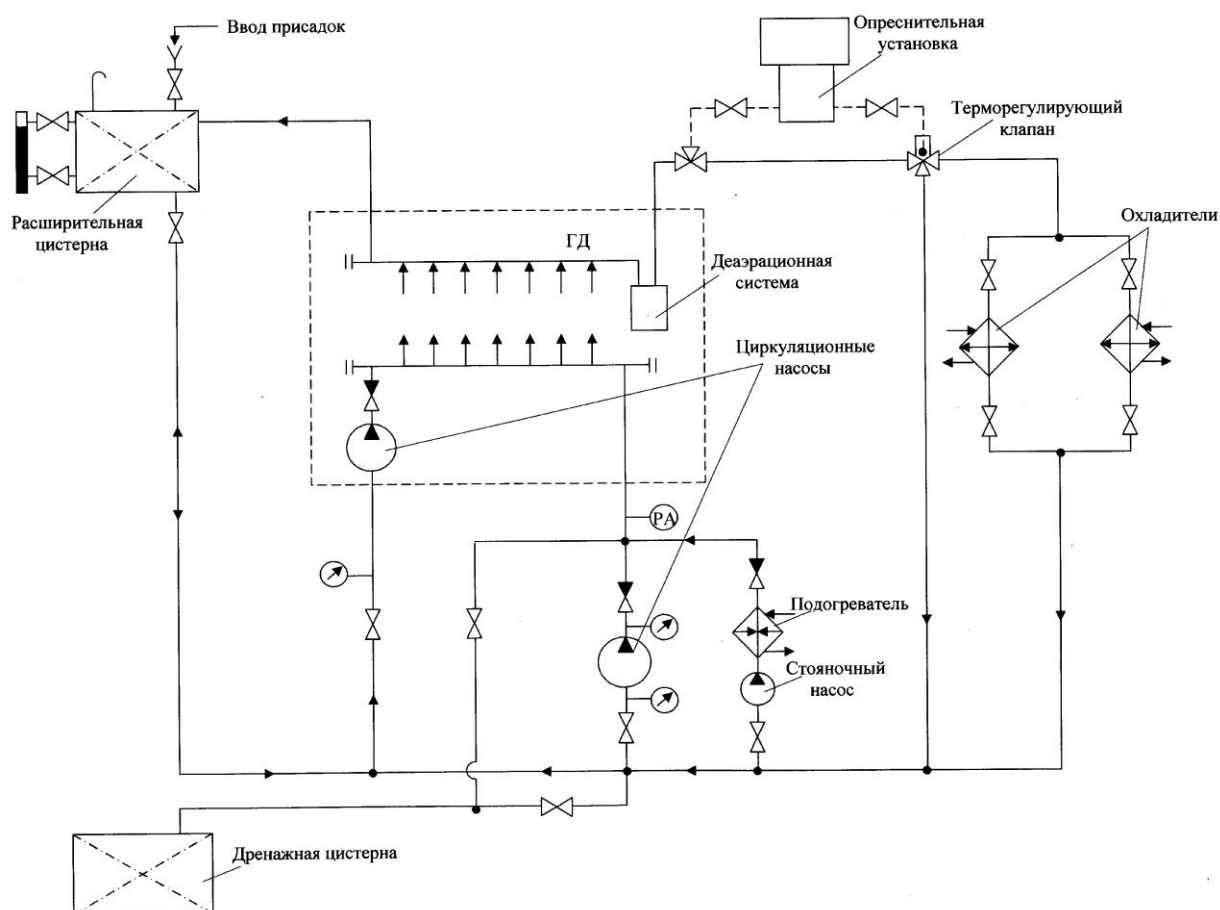


Рисунок 12.1 – Система охлаждения ГД

Система охлаждения включает циркуляционные насосы (один основной, один – резервный). Оба насоса могут иметь привод от электродвигателя.

телей. Для компактности системы основной насос может иметь привод непосредственно от дизеля (навешенный насос).

Основной насос забирает воду из системы и подает ее в блок обеспечения водой главного двигателя, затем вода через деаэрационную систему может быть направлена для работы опреснительной установки или непосредственно в охладители для отдачи тепла забортной воде. С целью поддержания заданной температуры в системе предусмотрен терморегулирующий клапан. После этого вода опять приходит к циркуляционному насосу. Таким образом, пресная вода циркулирует по замкнутому контуру.

Температура пресной воды на входе в двигатель должна поддерживаться не ниже 55 °С для предотвращения износа цилиндровой втулки и надежного запуска двигателя. Поэтому для подогрева воды во время стоянки судна предусмотрена работа стояночного циркуляционного насоса, включенного параллельно с главными насосами и работающего через подогреватель.

Для пополнения системы и удаления избытка воды при ее нагревании используется расширительная цистерна. В нее же отводится паровоздушная смесь из полостей охлаждения двигателя и теплообменных аппаратов.

Слив воды из системы осуществляется в дренажную цистерну.

Контрольные вопросы

1. Какие типы систем охлаждения применяются на судах?
2. Какие основные элементы входят в состав системы охлаждения?
3. Какие детали и узлы охлаждают в судовой дизельной установке?
4. С какой целью в систему охлаждения включают расширительные баки?

13. СХЕМЫ СИСТЕМ СЖАТОГО ВОЗДУХА, ПУСКА И ГАЗОВЫПУСКА

Краткие теоретические сведения

Система сжатого воздуха предназначена для получения, хранения и подвода сжатого воздуха к потребителям. На судне сжатый воздух используется, прежде всего, для запуска главных и вспомогательных двигателей, а также в системах пневмоавтоматики и АПС, для очистки автоматических фильтров, продувания кингстонов, в гидрофорах, для хозяйственных нужд, работы тифона и т.п.

Различают системы сжатого воздуха низкого (до 1 МПа), среднего (до 3 МПа) и высокого (до 5 МПа) давления воздуха. Воздух низкого давления используется для хозяйственных нужд судна, высокого – в системах управления ГТД.

Основной является система сжатого воздуха среднего давления, обеспечивающая пуск главных и вспомогательных двигателей, а также способная поставлять сжатый воздух (через редукторы) ко всем другим потребителям.

В состав системы входят электроприводные поршневые компрессоры, водомаслоотделители, баллоны для хранения воздуха, редукционные клапаны, трубопроводы, контрольно-измерительные приборы и устройства автоматического регулирования системы.

Компрессоры предназначены для получения сжатого воздуха. На судне должно быть не менее двух главных компрессоров.

Для аварийного снабжения сжатым воздухом (при обесточивании судна) предусматривается аварийный дизель-компрессор.

После электрокомпрессоров устанавливают водомаслоотделители, в которых воздух очищается от примесей воды и масла.

Воздух, сжимаемый компрессорами, хранится на судне в баллонах.

Для пуска ГД предусматриваются два баллона одинаковой вместимости, представляющие собой крупногабаритные цилиндрические емкости, расположенные в МО по бортам судна с небольшим уклоном в корму для скопления конденсата. Суммарный объем баллонов определяется в зависимости от размера цилиндра двигателя, их числа, а также количества последовательных пусков двигателей. Емкость одного баллона должна обеспечивать не менее 12 последовательных пусков главного двигателя.

Воздух для пуска ВДГ хранится в одном баллоне вместимостью, достаточной для обеспечения 6 последовательных пусков одного двигателя.

Все баллоны должны быть оборудованы манометрами, предохранительными клапанами, клапанами продувания и спуска конденсата.

Система низкого давления включает один баллон воздуха, предназначенного для общесудовых нужд.

На магистрали, идущей к тифонам и другим потребителям, устанавливаются редукционные клапаны, которые понижают давление воздуха до нужных значений.

Система сжатого воздуха представлена на рисунке 13.1.

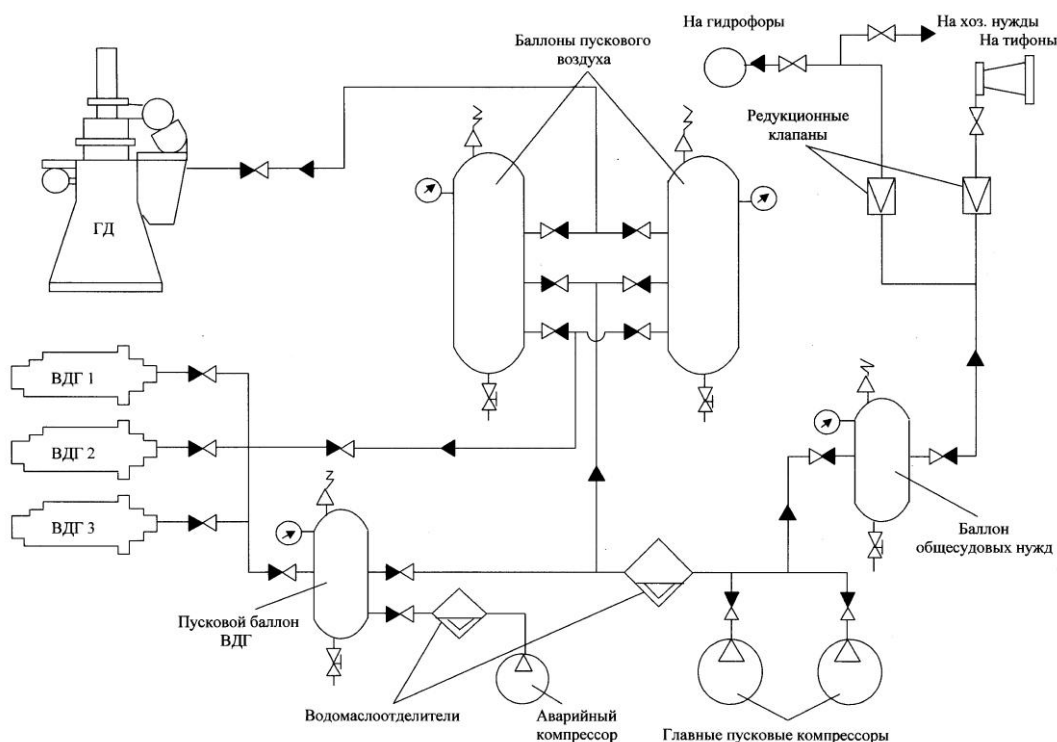


Рисунок 13.1 – Система сжатого воздуха

Система пуска служит для обеспечения двигателей и котлов воздухом, необходимым для сгорания топлива.

Расходы воздуха для сгорания топлива в СЭУ различных типов неодинаковы. При одной и той же мощности ГД наименьшее количество воздуха потребляют ПТУ, несколько большее – ДУ и наибольшее – ГТД.

В топку паровых котлов воздух подводится под давлением с помощью вентиляторов, устанавливаемых в верхней части МО над котлом. Вентиляторы засасывают подогретый в воздухоподогревателе воздух.

В судовых дизелях воздух для горения топлива подается из МО, куда он поступает через люки и из системы вентиляции. Турбонагнетатели двигателя, расположенные в верхней его части, снабжены приемным патрубком с фильтрами, которые очищают воздух и снижают уровень шума.

В ГТУ воздух подается по специальному воздухоприемному тракту – прямоугольным каналам большого сечения, воздухоприемные устройства которого размещают в верхней части судовой надстройки.

Система газопуска служит для отвода отработавших газов от главных и вспомогательных двигателей и котлов. Отработавшие газы имеют высокую температуру (150 - 500 °С), обладают токсичностью и несут несгоревшие частицы топлива в виде искр, которые могут вызвать пожар.

В состав системы (рисунок 13.2) входят газовыпускные трубопроводы, глушители шума, искрогасители, компенсаторы температурных расширений, утилизационный котел (при наличии), устройства для крепления трубопроводов, изоляцию.

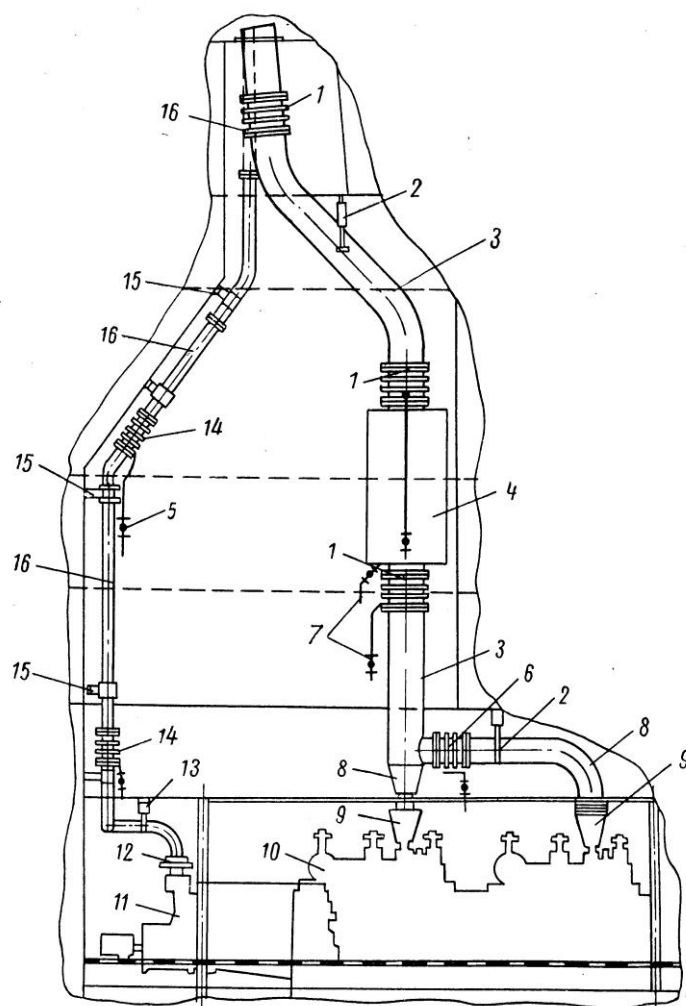


Рисунок 13.2 – Схема газовойхлопной системы:

1, 6, 14 – компенсаторы температурных расширений; 2, 13 – пружинные подвески; 3 – выпускной трубопровод ГД; 4 – УК; 5, 7 – спускные трубки с кранами (для периодического спуска гидрона); 8 – патрубки; 9 – газотурбонагнетатели; 10 – ГД; 11 – ДГ; 12 – фланцы; 15 – жесткие опоры; 16 – глушитель-искрогаситель

Каждый двигатель, как главный, так и вспомогательные, имеют отдельные газовыпускные трубопроводы (дымоходы). Дымоходы главных и вспомогательных котлов могут быть объединены в общий трубопровод. Трубопроводы крепятся к корпусу с помощью жестких опор или пружинных подвесок, изготавливаются из стали и имеют изоляцию (асбест, советлит и др.). Газовыпускные трубопроводы выводят вверх через дымовую трубу.

В связи с высокой температурой газов значительно изменяются линейные размеры трубопроводов (3 - 5 мм на 1 м длины). Для компенсации тепловых удлинений в газовыпускные трубопроводы встраиваются специальные эластичные элементы – компенсаторы.

В системе газовыпуска устанавливают глушители-искрогасители (сухие или водяные). УК (при наличии) не только понижает температуру выпускных газов, но и выполняет функции глушителя и искрогасителя.

Контрольные вопросы

1. Какие функции выполняют судовые системы сжатого воздуха?
2. Какие элементы входят в состав систем сжатого воздуха?
3. Какое давление необходимо для запуска главных и вспомогательных двигателей?
4. Для чего в системе сжатого воздуха служат редукционные клапаны?
5. Для какого количества последовательных пусков должен быть запас сжатого воздуха: для ГД; для ВДГ?
6. Каковы требования к пусковым баллонам? С какой целью их необходимо периодически продувать?
7. Из каких основных элементов состоит система подачи воздуха ГТД?
8. Назовите основные источники шума в ДВС, ГТУ и ПТУ.
9. С какой целью применяются искрогасители?

14. ЭЛЕМЕНТЫ СУДОВОГО ВАЛОПРОВОДА

Краткие теоретические сведения

Судовой валопровод относится к тем элементам СЭУ, отказ которых в большинстве случаев (для всех одновинтовых судов) приводит к полной потере управляемости судна, что ставит его порой на грань катастрофы.

Судовой валопровод конструктивно представляет собой систему последовательно соединенных валов, на кормовом конце которой закреплен движитель, а носовой конец соединен с двигателем или с передачей от двигателя. Такую систему называют также *линией вала*.

Назначение валопровода заключается в передаче движителю (гребному винту) крутящего момента от главного двигателя, а также в восприятии осевого усилия (упора), создаваемого винтом при вращении его в воде, и передаче этого усилия корпусу судна с целью обеспечения его движения. Судно может иметь один или несколько валопроводов.

В состав валопровода (рисунок 14.1) обычно входят следующие элементы: *валы и их соединения, опорные и упорные подшипники, дейдвудная труба, переборочные уплотнения, специальные устройства, измерительные приборы и системы, обслуживающие работу валопровода.*

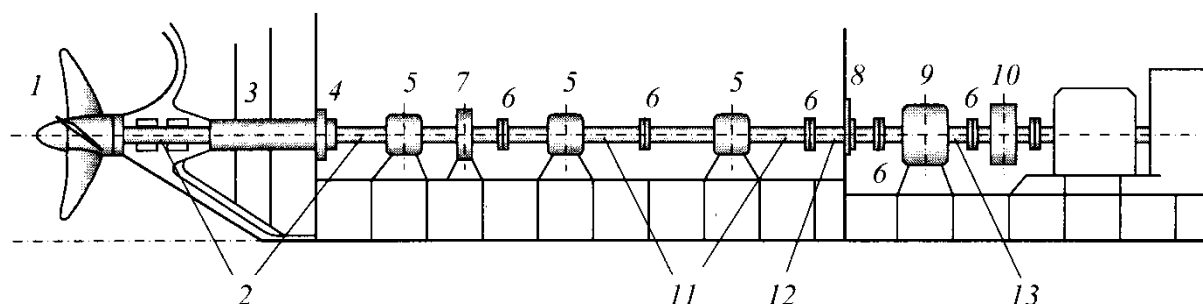


Рисунок 14.1 – Линия вала:

- 1 – гребной винт; 2 – гребной вал; 3 – дейдвудная труба; 4 – уплотнение гребного вала;
 5 – опорные подшипники; 6 – фланцевые соединения валов; 7 – тормоз линии вала;
 8 – переборочное уплотнение; 9 – главный упорный подшипник;
 10 – валоповоротное устройство; 11, 12 – промежуточные валы; 13 – упорный вал

Гребной винт 1 закрепляется на кормовом конце гребного вала 2. Гребной вал вращается в подшипниках, расположенных в дейдвудной трубе 3, жестко соединенной с корпусом. Для предотвращения протечек забортной воды через дейдвудную трубу в корпус судна, она на конце снабжена уплотнением 4. Гребной вал посредством промежуточных валов 11 и 12, установленных на опорных подшипниках скольжения 5, соединен с упорным валом 13, который через главный упорный подшипник 9 передает упор гребного винта корпусу судна. Валы соединяются между собой посредством фланцев 6.

В вырезы водонепроницаемых переборок, через которые проходит валопровод, устанавливают переборочные уплотнения 8, назначением которых является предотвращение проникновения воды из отсека в отсек в случае затопления одного из них.

Гребные валы обычно изготавливают из углеродистых сталей повышенного качества с бронзовой облицовкой, обеспечивающую защиту вала от коррозии.

В настоящее время дейдвудные подшипники применяют с вкладышами, выполненными из бакаута (твердая порода гваякового дерева), текстолита, термопластика, резины. Эти подшипники имеют водяную смазку забортной водой. На крупнотоннажных судах новой постройки дейдвудные подшипники имеют металлические вкладыши с масляной смазкой.

Кроме основных элементов валопровод имеет тормоз 7 и валоповоротное устройство 10.

Назначение тормоза состоит в удержании валопровода от проворачивания в неподвижном состоянии (например, закреплении валопровода на стоянках судна во время ремонтных работ, а также во время хода судна при буксировке, когда необходимо, чтобы валопровод не вращался).

Валоповоротное устройство служит для проворачивания главного двигателя и валопровода перед запуском установки. Оно приводится в действие отдельным электродвигателем, а при отсутствии электроэнергии – ручным приводом. Обычно валоповоротное устройство имеет червячную передачу, которая обеспечивает полный поворот валопровода за 103 минуты.

Работу линии вала обеспечивают следующие системы и приборы:

- система охлаждения забортной водой, предназначенная для охлаждения подшипников промежуточных валов, а также смазки и охлаждения дейдвудных подшипников (кроме металлических);
- система смазки валопровода, обеспечивающая смазку подшипников линии вала;
- контрольно-измерительные приборы, включающие электрические тахометры, измеряющие частоту вращения валопровода, термометры и манометры.

Длина валопровода зависит от расположения МО. Самый короткий валопровод при кормовом расположении МО. При среднем и промежуточном расположении МО длина валопровода может достигать 90 - 100 м. В этих случаях его прокладывают в водонепроницаемом туннеле.

Гребной винт относится к гидрореактивному движителю, создающему движущую судно силу за счет реакции отбрасываемой назад струи воды. Он имеет от двух до шести лопастей, имеющих крыловидное сечение. Лопасты располагаются радиально на равных расстояниях друг от друга на ступице, насаженной на гребной вал, приводимый во вращение главным

двигателем. Материал для изготовления лопастей – латунь, нержавеющая сталь, чугун и бронза.

Гребной винт преобразует вращение гребного вала в упор – движущую судно силу следующим образом. При вращении винта на поверхностях его лопастей, обращенных вперед – в сторону движения судна (засасывающих), создается разрежение, а на обращенных назад (нагнетающих) – повышенное давление воды (рисунок 14.2). В результате разности давлений на лопастях возникает подъемная сила F_y , вектор которой перпендикулярен скорости набегающего потока v_0 . Эта сила имеет две составляющие: одну, направленную в сторону движения судна P , которая и создает упор гребного винта (движущую силу); и вторую силу T , образующую крутящий момент, преодолеваемый двигателем.

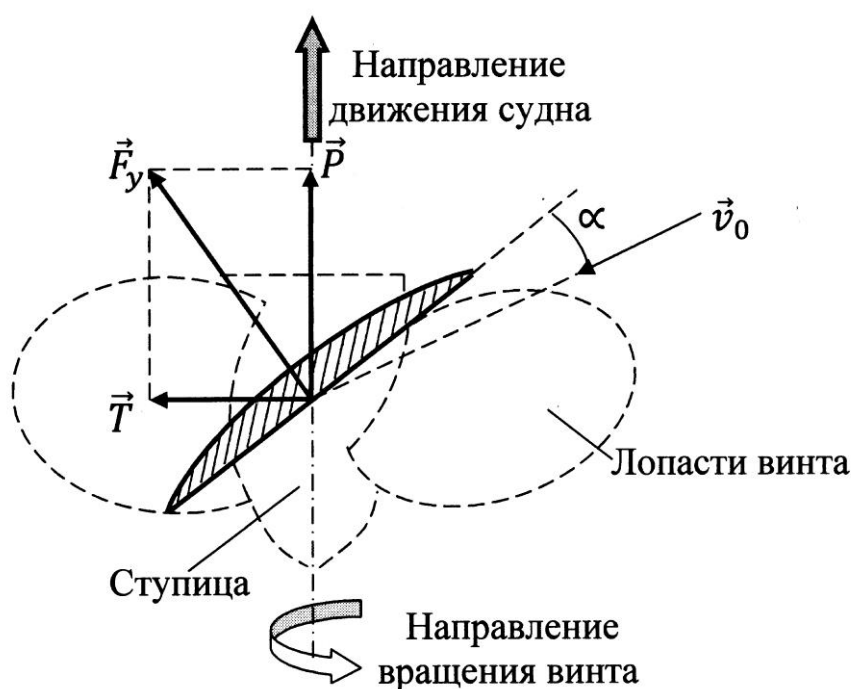


Рисунок 14.2 – Схема сил и скоростей на лопасти гребного винта

Направление вращения винтов выбирается исходя из условий их безопасной работы, маневренности и управляемости судна. Для одновальной установки направление вращения движителя определяется направлением вращения главного двигателя. Обычно принимается правое вращение гребного винта на переднем ходу (по часовой стрелке, если смотреть с кормы на нос). В многовальных установках лопасти бортовых гребных винтов должны вращаться в наружную сторону из верхнего положения. Такое направление вращения снижает вероятность заклинки винтов при попадании в них посторонних предметов (битого льда и т.д.), так как потоками воды они отбрасываются в стороны.

В настоящее время используются гребные винты фиксированного (ВФШ) и регулируемого шага (ВРШ). При наличии ВФШ изменение ско-

рости судна осуществляется изменением частоты вращения коленчатого вала двигателя, что требует установки реверсивного двигателя.

При наличии ВРШ изменение скорости судна осуществляется не изменением частоты вращения коленчатого вала, а изменением шага винта посредством поворота лопастей. Это позволяет применять более простые нереверсивные двигатели, повысить маневренность судна, улучшить работу установки на переменных режимах и упростить систему ее дистанционного управления.

В состав установки с ВРШ (рисунок 14.3) входят механизм изменения шага гребного винта (МИШ), с помощью которого осуществляется поворот лопастей винта; приводной механизм (силовая часть системы управления) и пост дистанционной системы управления.

МИШ состоит из сервомотора, создающего усилие, потребное для поворота лопастей. Наиболее распространенными являются МИШ с гидроприводом, у которых под давлением жидкости (минерального масла), создаваемым специальным насосом, в гидроцилиндре перемещается поршень, устанавливающий через управляющую штангу лопасти винта в нужное положение.

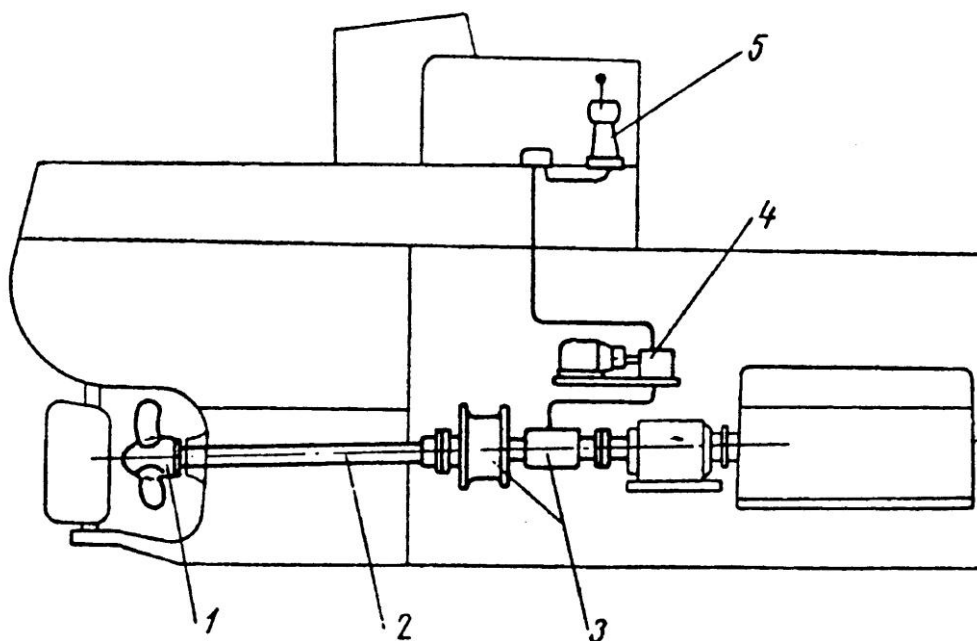


Рисунок 14.3 – Установка с ВРШ:

- 1 – гребной винт с поворотными лопастями, 2 – гребной вал,
3 – механизм изменения шага (МИШ), 4 – силовая часть системы управления,
5 – пост дистанционной системы управления

Контрольные вопросы

1. Для чего служит судовой валопровод?
2. Какие элементы входят в состав судового валопровода?
3. Каково назначение главного упорного подшипника?
4. Каково назначение дейдвудного устройства?
5. Каково назначение валоповоротного устройства?
6. Назовите виды гребных винтов, применяемых на судах.
7. Каково назначение и принцип действия гребного винта?

ЛИТЕРАТУРА

1. Артемов Г.А. Судовые энергетические установки / Г.А. Артемов, В.П. Волошин, Ю.В. Захаров. – Л.: Судостроение, 1987 – 480 с.
2. Системы судовых энергетических установок / Г.А. Артемов и др.: учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1990.
3. Болдырев О.Н. Судовые энергетические установки. Часть I. Дизельные и газотурбинные установки: учебное пособие / О.Н. Болдырев – Северодвинск: Севмашвтуз, 2003. – 168 с.
4. Болдырев О.Н. Судовые энергетические установки. Часть II. Котлотурбинные энергетические установки: учебное пособие / О.Н. Болдырев – Северодвинск: Севмашвтуз, 2004. – 187 с.
5. Сизых В.А. Судовые энергетические установки / В.А. Сизых. – М.: Транслит, 2006. – 352с.
6. Харин В.М. Судовые вспомогательные механизмы и системы / В.М. Харин, Б.Г. Декин, О.Н. Занько, В.Т. Писклов. – М.: Транспорт, 1992. – 319 с.

У ч е б н о е и з д а н и е

Тверская Светлана Евгеньевна

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

*Учебно-методическое пособие
по проведению практических занятий*

В авторской редакции

Изд. № 16/2025. Объем 5,25 п.л. Усл. печ. л. 4,88. Уч. изд. л. 5,145.
РИИЦМ ФГАОУВО «Севастопольский государственный университет»
299015, Севастополь, ул. Курчатова, 7