

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

А.Ю. Гаршин, С.Е. Тверская

Э К С П Л У А Т А Ц И Я СУДОВЫХ ТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Учебно-методическое пособие
для проведения практических занятий
для студентов специальности
26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок»
очной и заочной форм обучения

Севастополь
СевГУ
2026

УДК 621.125(076.5)
ББК 39.455.13-5*я73
Г217

Рецензенты:

В.А. Очеретяный - канд. техн. наук, доцент кафедры ЭМСС, Морской институт СевГУ
В.А. Галий - канд. техн. наук, доцент кафедры СБС, Морской институт СевГУ

Ответственный за выпуск:

К.Ю. Федоровский – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой ЭМСС

Гаршин А. Ю.

Г217 Эксплуатация судовых турбинных установок : учебно-методическое пособие для проведения практических занятий для студентов специальности 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» очной и заочной форм обучения / А. Ю. Гаршин, С. Е. Тверская; Севастопольский государственный университет, Морской институт. – Севастополь : СевГУ, 2026. – 54 с. – Текст : электронный.

Целью учебно-методического пособия является закрепление студентами теоретических знаний, совершенствование умений и привитие навыков по эксплуатации судовых турбинных установок, подготовка будущих инженеров-механиков в области несения безопасной вахты в машинном отделении, изучение состава, назначения, основ эксплуатации главных судовых турбинных установок, вспомогательных турбин и связанных с ними систем управления.

Изучение дисциплины направлено на освоение требований следующих профессионально-специализированных компетенций (Конвенция ПДНВ): Способен выполнять безопасные и аварийные процедуры эксплуатации механизмов двигательной установки, включая системы управления. Способен осуществлять подготовку, эксплуатацию, обнаружение неисправностей и меры, необходимые для предотвращения причинения повреждений следующим механизмам и системам управления: 1. Главный двигатель и связанные с ним вспомогательные механизмы; 2. Паровой котел и связанные с ним вспомогательные механизмы и паровые системы; 3. Вспомогательные первичные двигатели и связанные с ними системы; 4. Другие вспомогательные механизмы, включая системы охлаждения, кондиционирования воздуха и вентиляции,

Предназначено для преподавателей и студентов и идет в обеспечение самостоятельной работы студентов.

УДК 621.125(076.5)
ББК 39.455.13-5*я73

Рассмотрено и утверждено на заседании кафедры ЭМСС, протокол № 4 от 29 декабря 2025 г.

Рекомендовано к изданию Ученым советом Морского института, протокол № 2 от 03 февраля 2026 г.

© Гаршин А.Ю., Тверская С.Е., 2026
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Перечень сокращений	5
Практическое занятие № 1. Изучение тепловых схем ПТУ морских судов	6
Практическое занятие № 2. Структурная схема энергетической оснащенности, пароконденсатный цикл ПЭБ «Академик Ломоносов»	14
Практическое занятие № 3. Характерные неисправности и неполадки в работе турбоагрегата, их причины и способы устранения	25
Практическое занятие № 4. Структурные схемы ГТД и комбинированных установок	31
Практическое занятие № 5. КГПТУ быстроходных накатных судов типа «Капитан Смирнов»	37
Практическое занятие № 6. Отказы и повреждения газотурбинных установок	43
Список литературы	53

ВВЕДЕНИЕ

В учебно-методическом пособии последовательно рассмотрены особенности тепловых схем ПТУ морских судов, реальная структурная схема энергетической оснащённости, пароконденсатный цикл ПЭБ «Академик Ломоносов». Проанализированы характерные неисправности и неполадки в работе турбоагрегата, их причины и способы устранения отказы и повреждения газотурбинных установок. Анализ выполнен в удобной для изучения и для практической отработки действий судового механика форме (Неисправность

Признаки Причины Предпосылки Последствия Мероприятия по предотвращению) и позволяет на основе понимания сути физических явлений, происходящих внутри работающей турбины добиться главного - предотвратить аварию.

Оценены преимущества и недостатки различных схем ГТД и комбинированных установок. Рассмотрены особенности тепловой схемы газопаротурбинной установки, компоновки и характеристик пропульсивной газотурбинной установки газотурбохода типа «Капитан Смирнов». Выполнено сравнение с иными схемами с учетом эксплуатационных и конструктивных особенностей каждой, закрепление навыков чтения принципиальных тепловых схем СЭУ современных судов.

В результате освоения дисциплины мы добиваемся следующей цели и решаем задачи:

Целью изучения дисциплины «Эксплуатация судовых турбинных установок» является изучение студентами вопросов технической эксплуатации судовых турбинных установок. Подготовка будущих инженеров-механиков в области несения безопасной вахты в машинном отделении, изучение состава, назначения, основ эксплуатации главных судовых турбинных установок, вспомогательных турбин и связанных с ними систем управления.

Задачи дисциплины:

- дать будущим судовым инженерам – механикам знания теории рабочих процессов турбомашин, их конструкции и основ грамотной и безопасной эксплуатации судовых турбинных установок;
- подготовить студентов к практической деятельности судовых механиков в соответствии с квалификационной характеристикой и образовательно-профессиональной программой;
- дать знания теории рабочих процессов турбомашин, их конструкции и основ грамотной и безопасной эксплуатации судовых турбинных установок;
- научить применять базовые знания в области теории и эксплуатации СТУ;
- научить определять пути повышения эффективности эксплуатации СТУ;
- научить выявлять проблемы, формулировать задачи и определять пути исследования в области эксплуатации судовых турбинных установок;
- подготовить студента к прохождению «Дельта-тестов».

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

АДГ – аварийный дизель-генератор
АЗ – автоматическая защита
АРТ – автоматический распределитель топлива
АСТ – автоматический сигнализатор температуры
ВНА – входной направляющий аппарат
ВУ – воздухоприемное устройство
ГК – главный конденсатор
ГПТУ – газопаротурбинная установка
ГТД – газотурбинный двигатель
ГТЗА – главный турбозубчатый агрегат
ГУП – главный упорный подшипник
ЗИМ – звукоизолирующая муфта
ИЭ – инструкция по эксплуатации
КВД – компрессор высокого давления
КНД – компрессор низкого давления
КН – конденсатный насос
КС – камера сгорания
МУ – маневровое устройство
НР – насос-регулятор
ОРТВ – ограничение раскрутки турбины винта
ПАТЭС – плавучая атомная теплоэлектростанция
ПК – паровой котел
ПТУ – паротурбинная установка
ПЭБ – плавучий энергоблок
РДП – регулятор давления пара
РТИ – регулятор температуры импульсный
ТВ – турбина винта
ТВД – турбина высокого давления
ТЗХ – турбина заднего хода
ТК – турбокомпрессор
ТНД – турбина низкого давления
ТО – техническое обслуживание
ТПХ – турбина переднего хода
ТУК – теплоутилизационный контур
ТЯ – теплый ящик
ХХ – холостой ход
ЦН – циркуляционный насос
ШПМ – шинно-пневматическая муфта

Практическое занятие №1 ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ПТУ МОРСКИХ СУДОВ

Целью практического занятия является изучение тепловых схем ПТУ судов с парогенератором на органическом топливе и атомным реактором типа ВВРД, сравнение этих схем с учетом эксплуатационных и конструктивных особенностей каждой, закрепление навыков чтения принципиальных тепловых схем СЭУ современных судов. Подготовка будущих инженеров-механиков в области несения безопасной вахты в машинном отделении, изучение состава, назначения, основ эксплуатации главных судовых турбинных установок, вспомогательных турбин и связанных с ними систем управления.

На рисунках 1.1., 1.2. представлены простейшая тепловая схема ПТУ и схема пароводяной циркуляционной системы судовой ПТУ.

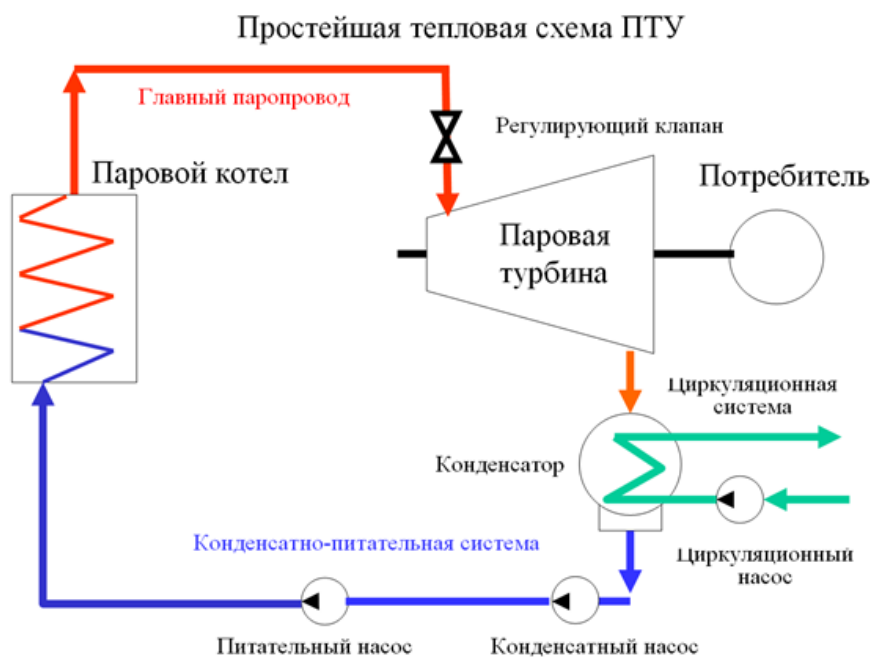


Рисунок 1.1. Простейшая тепловая схема ПТУ

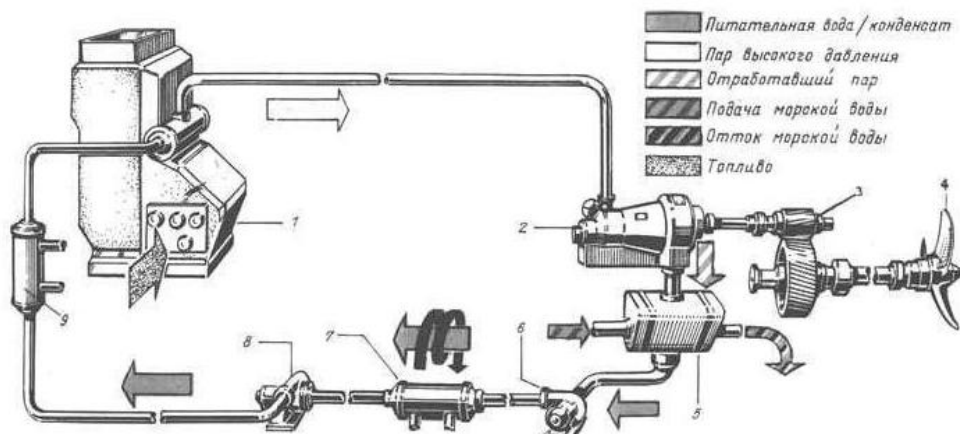


Схема пароводяной циркуляционной системы судовой паротурбинной установки.
1 — парогенератор; 2 — турбина; 3 — редуктор; 4 — гребной винт; 5 — конденсатор; 6 — конденсатный насос; 7 — подогреватель низкого давления; 8 — питательный насос; 9 — подогреватель высокого давления.

Рисунок 1.2. Схема пароводяной циркуляционной системы судовой ПТУ

Тепловые схемы ПТУ могут быть спроектированы как в одноцилиндровом (однокорпусном) так и в двухцилиндровом (двухкорпусном) исполнении. На рисунках 1.3., 1.4. представлены тепловая схема одноцилиндровой (однокорпусной) ПТУ и схемы двухцилиндровых (двухкорпусных) ПТУ.

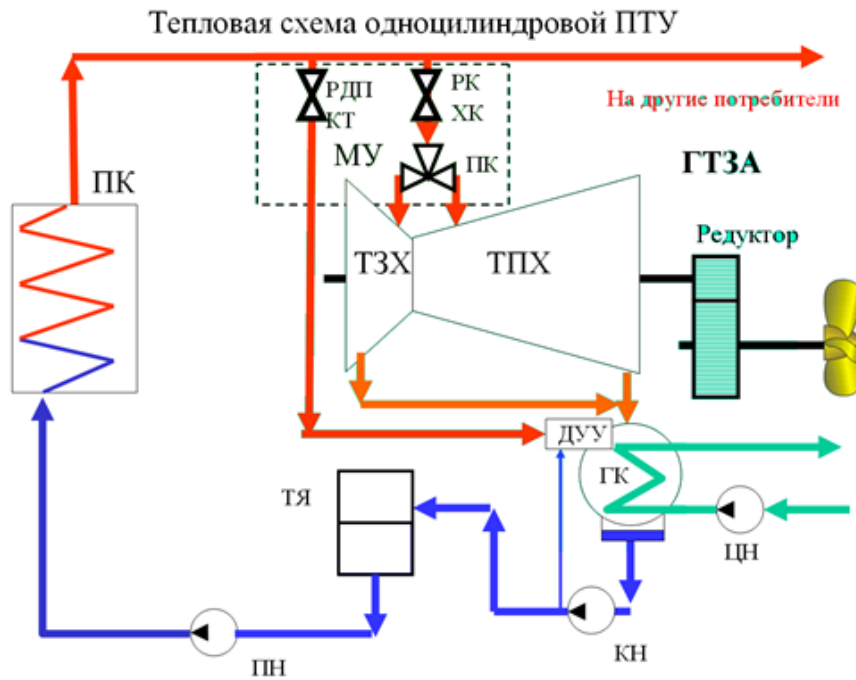


Рисунок 1.3. Тепловая схема одноцилиндровой (однокорпусной) ПТУ

Схемы двухцилиндровых ПТУ

ПТ (главная) может состоять из двух (трех) частей – ТВД, ТСД и ТНД, смонтированных на одном валу

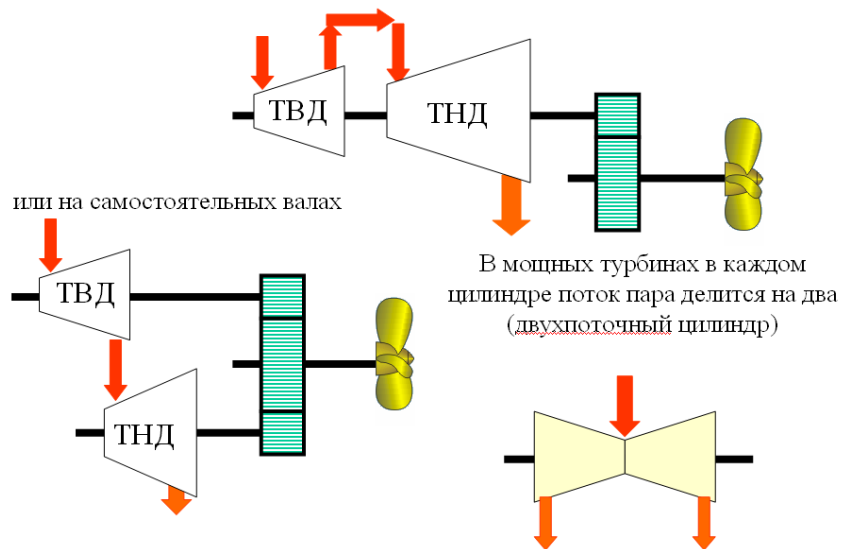


Рисунок 1.4. Схемы двухцилиндровых (двухкорпусных) ПТУ

На рисунке 1.5. изображена принципиальная тепловая схема ПТУ танкера «София». На ней можно проследить ход пара и конденсата, а также изменение их параметров в различных точках схемы.

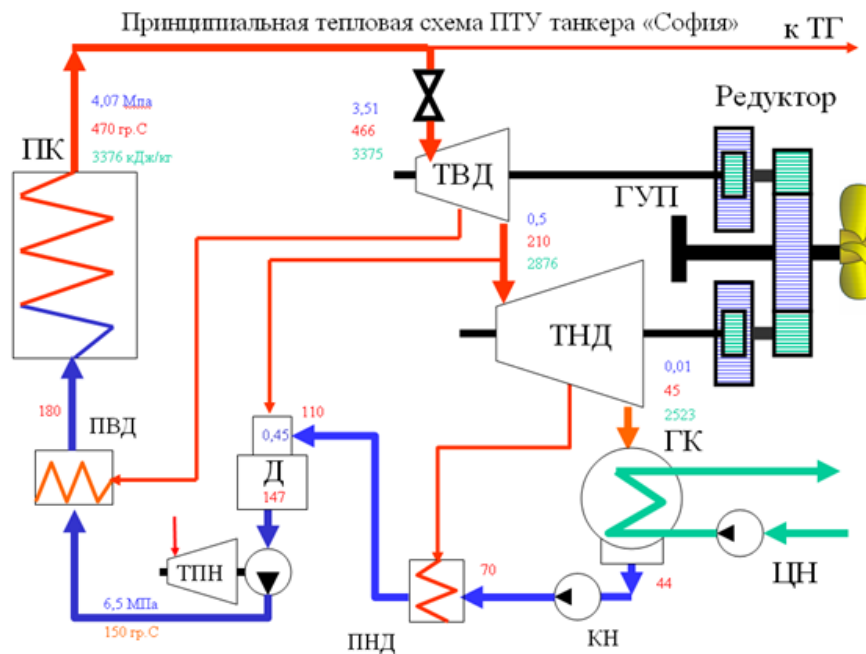


Рисунок 1.5. Принципиальная тепловая схема ПТУ танкера «София»

С целью повышения эффективности процессов превращения энергии в современных ПТУ, т.е. термического КПД, применяют следующие мероприятия:

- повышение начальных параметров пара,
- регенеративный подогрев питательной воды в промежуточных водоподогревателях и
- промежуточный перегрев пара (ППП).

Состав ПТУ

ПТУ является частью главной энергетической установки (ГЭУ) судна.

ПТУ непосредственно обеспечивает движение и маневрирование.

В состав ПТУ входят следующие технические средства:

- ☐ ГТЗА (паровые турбины, зубчатые передачи, главный конденсатор);
- ☐ валопроводы: звукоизолирующая муфта (ЗИМ), главный упорный подшипник (ГУП), опорные подшипники (ОП), дейдвудная труба, подшипники дейдвуда и кронштейнов, гребные винты;
- ☐ механизмы (ТПН, ТМН, ТЦН), теплообменные аппараты, системы, трубопроводы, устройства, обеспечивающие функционирование ПТУ.

К системам ПТУ относятся:

а) паровые системы:

- главного пара;
- вспомогательного пара (перегретого и насыщенного);
- отработавшего пара;
- продувания высокого и низкого давления;
- уплотнения сальников и отсоса пара (отсоса и уплотнения, регулирования давления в концевых уплотнениях ПТ);

- б) конденсатно-питательная система (насосы, трубопроводы, арматура, система автоматизации);
- в) система охлаждения заборной воды (охлаждение конденсаторов, МО, ВМ);
- г) масляная система (ЦЦМ, ЗМЦ, ТМН, ЭМН, трубопроводы, арматура, система автоматизации, масляные фильтры, МО, МП, СЦ, МПН);
- д) система поддержания вакуума в ГК (ГК, трубопроводы, арматура, пароструйные эжекторы);
- е) система поддержания уровня в ГК;
- ж) система управления ПТУ и защиты;
- з) система теплоснабжения, КИП: манометры (пар, конденсат, масло, охлаждающая вода), термометры, термометры, микрометры, указатели частоты вращения (тахометры: механические, электрические, суммирующие счетчики и уравниватели хода);
- и) средства управления ПТУ: телеграфы, звонки, телефоны, трансляция.

Турбины атомных судовых энергетических установок.

В качестве атомных энергетических установок (АСЭУ) на транспортных судах нашли применение двухконтурные установки с водо-водяными реакторами давления (ВВРД). В первом контуре такой установки циркулирует вода под давлением, которая служит как замедлителем нейтронов, так и теплоносителем. Эта вода, нагретая в реакторе, поступает в специальный теплообменник — парогенератор, где происходит образование насыщенного или слегка перегретого пара из воды второго контура. Для обеспечения температурного перепада между контурами давление воды на выходе из реактора должно быть на 3 - 10 МПа выше, чем давление пара на входе в турбину [2]. Таким образом, повышение начального давления пара связано с трудностями создания реактора, надежно работающего под большим давлением. Обычно в судовых конструкциях начальные параметры пара: давление 3 - 4 МПа, температура 240...310 °С, что наряду с отсутствием регенеративных отборов пара приводит к пониженным значениям термического КПД.

Ядерное топливо дешевле органического и может обеспечить непрерывную эксплуатацию атомного судна без ограничения его автономности и дальности плавания в течение многих лет. В результате, несмотря на большую массу и габариты самой АЭУ по сравнению с обычной ПТУ, с учетом массы и объема запасов органического топлива преимущества остаются за атомными установками, причем с возрастанием мощности эти преимущества увеличиваются.

Турбоагрегаты АСЭУ имеют следующие особенности [2].

1. Малый располагаемый перепад энтальпий. Малая величина H_0 зачастую позволяет выполнить турбину однокорпусной конструкции.
2. Большие объемные расходы пара. Пониженные значения H_0 и худший КПД приводят к значительному увеличению удельного расхода пара. Для уменьшения длины лопаток последней ступени ТНД выполняют двухпоточными.
3. Работа всех или большинства ступеней в области влажного пара. В целях

уменьшения потерь от влажности применяют различные методы сепарации. Наиболее широко используется периферийная сепарация, когда капли влаги, находящиеся в закрученном потоке или на поверхности рабочих лопаток, центробежной силой отбрасываются к периферии и по специальным канавкам отводятся из турбины.

4. Специальные меры по уменьшению эрозии лопаток. Они заключаются, помимо влагоудаления, в увеличении зазоров между направляющими, и рабочими лопатками в периферийной области, уменьшении окружной скорости на периферии лопаток и т.д.

5. Особенности регулирования турбин. Для АСЭУ в большей степени, чем для обычных установок, регулирование турбин связано с регулированием всего блока и существенно зависит от типа реактора и способа изменения его мощности. В случае аварийной остановки турбоагрегата невозможно немедленно остановить реактор, отсюда необходимость в перепуске свежего пара в конденсатор.

На рисунках 1.6., 1.7, 1.8, 1.9, 1.10. представлены:

Тепловая схема паротурбинной установки ледокола «Арктика».

Схема расположения атомной энергетической установки ледокола «Арктика».

Расположение контейнера с реактором в корпусе судна.

Принципиальная схема двухконтурной атомной энергетической установки.

Тепловыделяющий элемент и топливная кассета реактора ледокола.

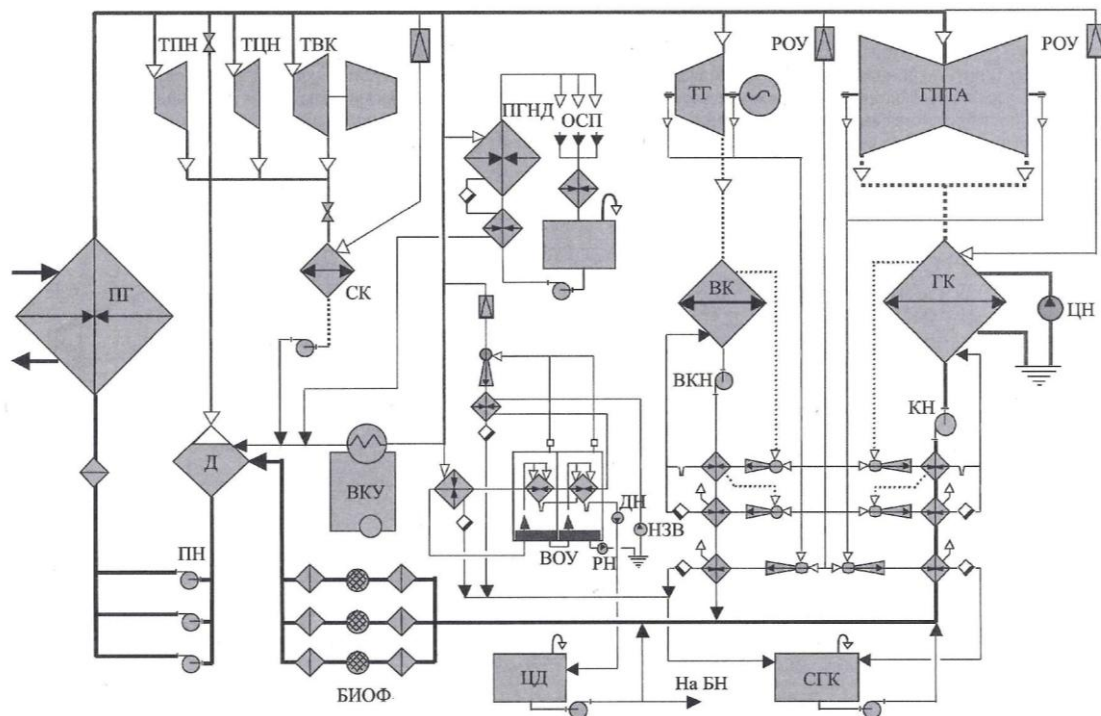


Рисунок 1.6. Тепловая схема паротурбинной установки ледокола «Арктика»

ПГ – парогенератор; ТПН, ТЦН, ТВК – турбоприводы соответственно питательного, циркуляционного насосов и компрессора воздушного омывания корпуса; ПГНД – парогенератор низкого давления; ОСП – общесудовые потребители; ТГ – турбогенератор; РОУ – редукционное охлаждающее устройство; ГПА – главный паротурбозлектрический агрегат; ГК – главный конденсатор; ЦН – циркуляционный насос; КН – конденсатный насос; СГК – сборник горячих конденсатов; ВК – вспомогательный конденсатор; ВКН – вспомогательный конденсатный насос; ЦД – цистерна дистиллята; БН – бытовые нужды; ВОУ – водоопреснительная установка; РН – рассольный насос; ДН – дистилляционный насос; НЗВ – насос забортной воды; БИОФ – блок ионно-обменных фильтров; ВКУ – вспомогательная котельная установка; Д – деаэратор; ПН – питательный насос; СК – стояночный конденсатор

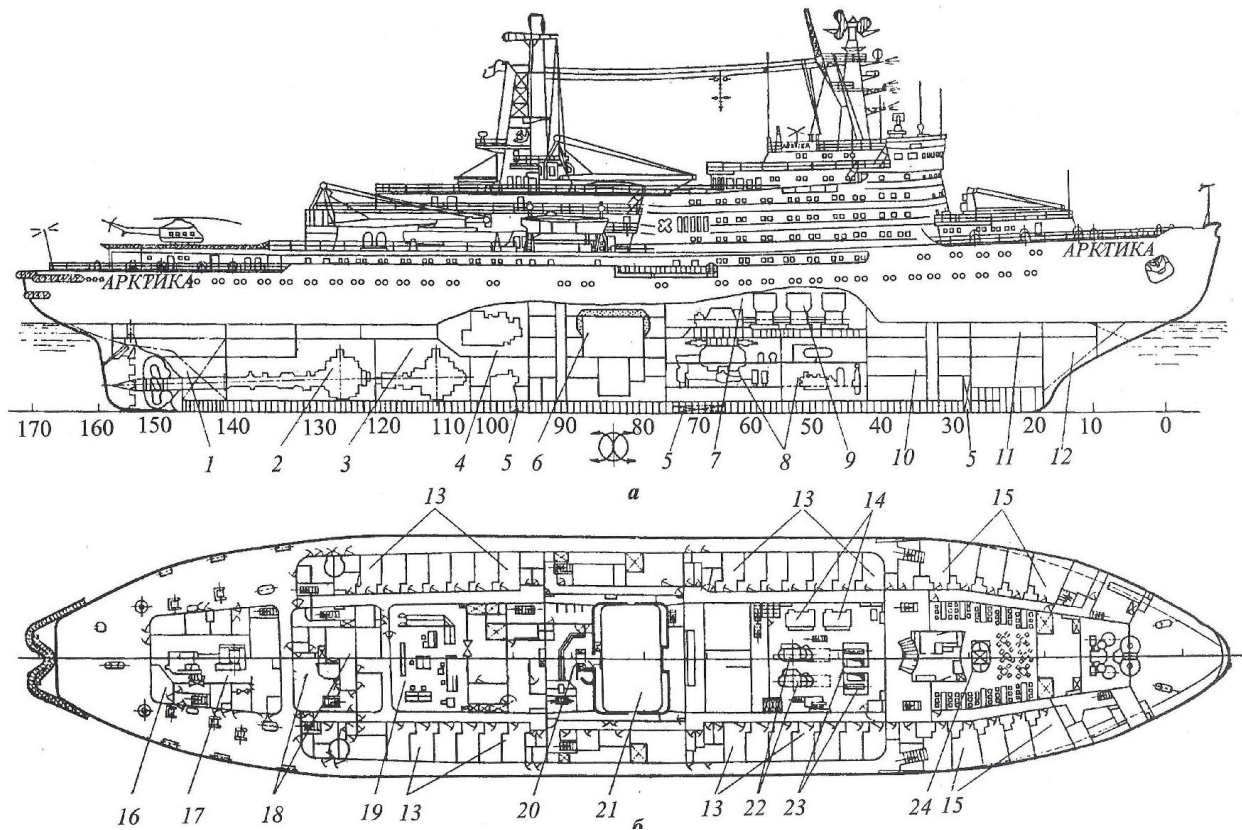


Рисунок 1.7. Схема расположения атомной энергетической установки ледокола «Арктика»

а – вид сбоку; *б* – верхняя палуба; 1, 12 – дифференциальная цистерна; 2, 3 – бортовой и средний гребные электродвигатели соответственно; 4 – кормовая электростанция; 5 – ледовый ящик; 6, 21 – соответственно реакторное и аппаратное помещения атомной паропроизводящей установки; 7 – главная турбина; 8, 17 – помещения соответственно вспомогательных механизмов и буксирной лебедки; 9 – главные генераторы; 10 – провизионные кладовые; 11 – грузовые помещения; 13, 15 – одно- и двухместные каюты соответственно; 14 – ВОУ; 16, 19 – соответственно кормовой и центральный посты управления АЭУ; 18 – медицинский блок; 20 – санпропускник центрального отсека; 22 – ПГНД; 23 – вспомогательные котлы; 24 – столовая команды

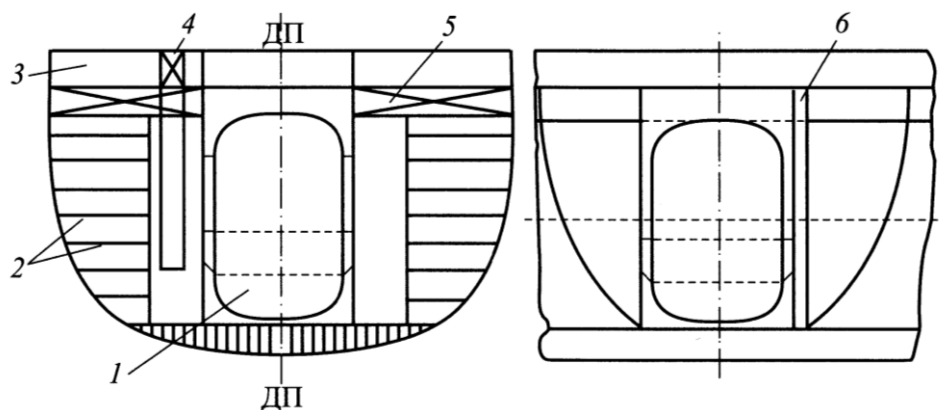


Рисунок 1.8. Расположение контейнера с реактором в корпусе судна

1 – контейнер с оборудованием первого контура; 2 – платформы противоударной защиты;
3, 5 – зоны размещения соответственно вспомогательного оборудования для работы с радиоактивными веществами и оборудования системы вентиляции; 4 – лифт; 5 – коффердам

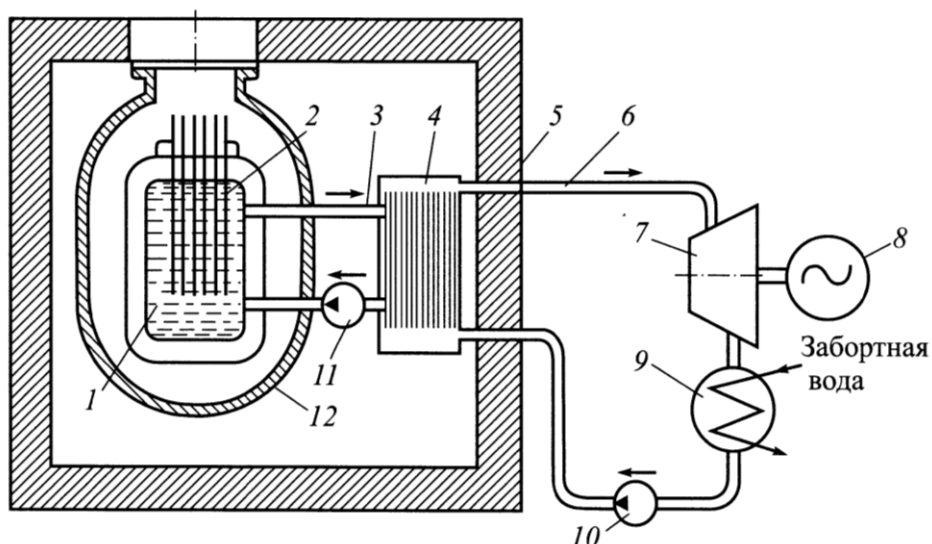


Рисунок 1.9. Принципиальная схема двухконтурной атомной энергетической установки
 1 - активная зона реактора; 2 - ТВЭЛ; 3 - трубопровод первого контура; 4 - парогенератор; 5, 12 - экраны биологической защиты; 6 - паропровод второго контура; 7 - паровая турбина; 8 - главный электрогенератор; 9 - конденсатор; 10 - питательный насос; 11 - циркуляционный насос первого контура

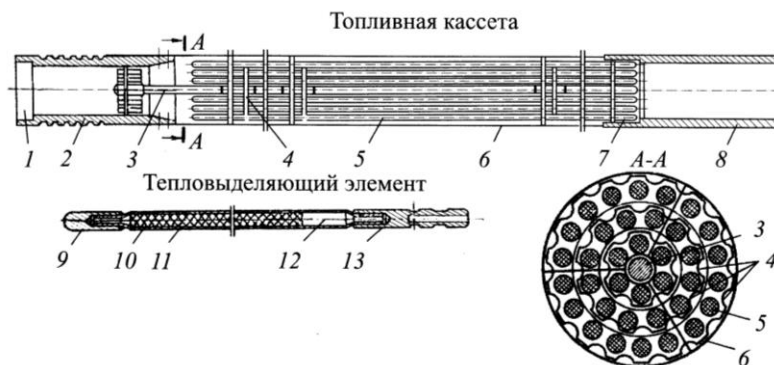


Рисунок 1.10. Тепловыделяющий элемент и топливная кассета реактора ледокола
 1 - расточка нижнего конца; 2 - направляющий наконечник; 3, 4 - дистанционные стержень и кольцо;
 5 - ТВЭЛ; 6 - труба; 7, 8 - нижняя и верхняя подвески; 9, 13 - наконечники; 10 - оболочка; 11 - таблетки топлива (керамическое топливо в виде диоксида урана UO_2); 12 - газовая полость



Содержание отчета

Отчет должен содержать краткое описание тепловых схем ПТУ предложенных для рассмотрения судов с парогенератором на органическом топливе и атомным реактором типа ВВРД, сравнение этих схем с учетом эксплуатационных и конструктивных особенностей каждой.

Контрольные вопросы:

1. Какие технические средства входят в состав ПТУ?
2. Что относится к системам ПТУ?
3. С какой целью и каким образом осуществляется повышение начальных параметров пара?
4. С какой целью и каким образом осуществляется регенеративный подогрев питательной воды в промежуточных водоподогревателях?
5. С какой целью и каким образом осуществляется промежуточный перегрев пара (ППП)?
6. Конструктивные и эксплуатационные особенности судовой двухконтурной АЭУ с ВВРД.
7. За счёт чего и как меняются параметры пара (конденсата, питательной воды) на заданном участке тепловой схемы?

Практическое занятие № 2
СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОСНАЩЕННОСТИ,
ПАРОКОНДЕНСАТНЫЙ ЦИКЛ ПЛАВУЧЕГО ЭНЕРГЕБЛОКА
«АКАДЕМИК ЛОМОНОСОВ»

Целью практического занятия является изучение тепловых схем ПТУ ПЭБ «Академик Ломоносов» с реакторными установками КЛТ-40С, сравнение с иными схемами с учетом эксплуатационных и конструктивных особенностей каждой, закрепление навыков чтения принципиальных тепловых схем СЭУ современных судов. Подготовка будущих инженеров-механиков в области несения безопасной вахты в машинном отделении, изучение состава, назначения, основ эксплуатации главных судовых турбинных установок, вспомогательных турбин и связанных с ними систем управления.

«Академик Ломоносов» – российская плавучая атомная теплоэлектростанция (ПАТЭС) проекта 2087.0 введена в строй в 2020 г., и находится в порту г. Певек (Чаунский район, Чукотского автономного округа), самая северная АЭС в мире. Плавучий энергоблок (ПЭБ) «Академик Ломоносов» изготовлен на АО «Балтийский завод», что в Санкт Петербурге. 15 сентября 2011 года проект размещения плавучей атомно-теплой электростанции (ПАТЭС) в городе Певек получил положительное заключение государственной экологической экспертизы, а 26 июня 2019 года Ростехнадзор дал разрешение на эксплуатацию ПЭБ до 2029 года. ПАТЭС состоит из плавучего энергоблока, береговой инфраструктуры для выдачи электрической и тепловой энергии потребителям, а так же гидротехнических сооружений, которые отвечают за безопасную стоянку в акватории.

На Чукотке открыты несколько рудных месторождений ценных металлов. Она изолирована от единой энергосистемы России. Кроме того, ПЭБ «Академик Ломоносов» станет одним из ключевых элементов инфраструктуры в рамках развития Северного морского пути. В настоящее время он пришвартован в месте своей дислокации г. Певек, Чукотский автономный округ.

ПЭБ «Академик Ломоносов» – это гладкопалубное несамоходное судно, на котором установлены две водо-водяные реакторные установки ледокольного типа КЛТ-40С общей электрической мощности 70 МВт, а по теплу – 140 гигакалорий. Этой мощности, между прочим, хватит на город с населением в 100 тысяч жителей. А это в два раза больше, чем сегодня живёт на всей Чукотке. Дополнительной функцией ПАТЭС является опреснение морской воды – оценочно от 40 до 240 тысяч кубометров пресной воды в сутки.

Кроме двух реакторных установок КЛТ-40С, в состав энергетической установки ПЭБ входят две паротурбинные установки производства ОАО «Калужский турбинный завод», а также другие вспомогательные системы и оборудование российского производства.

ПЭБ состоит из двух основных функциональных модулей: жилого модуля, расположенного в кормовой части и энергетического модуля, расположенного в центральной и носовой части. Жизнедеятельность ПЭБ в целом

обеспечиваются общесудовыми системами. Функционирование обоих модулей обеспечивается системой автоматического управления. Работа ПЭБ обеспечивается экипажем из 70 человек.

Энергетический модуль предназначен для выработки электрической и тепловой энергии. В состав модуля входят две реакторные установки, две паротурбинные установки и электроэнергетическая система. В основу компоновки оборудования положен блочный принцип (1 реактор+1 турбина + 1 генератор).

Основные технические характеристики ПЭБ

№	Наименование характеристики	Значение
1.	Тип	Несамостоятельное стоечное судно
2.	Класс Регистра России	КЕ *[2] А2
3.	Длина, м	175,0
4.	Ширина, м	30,0
5.	Высота борта, м	10,0
6.	Осадка, м	5,6
7.	Водоизмещение, т	21 000
8.	Количество кают для персонала, основных/запасных	64 (одноместных)/ 10
9.	Срок эксплуатации ПЭБ, не менее, лет	36 (3 экспл. цикла)
10.	Максимальное количество топливных загрузок за Эксплуатационный (межремонтный) цикл, шт.	4
11.	Продолжительность ремонта, с учетом буксировки лет	2

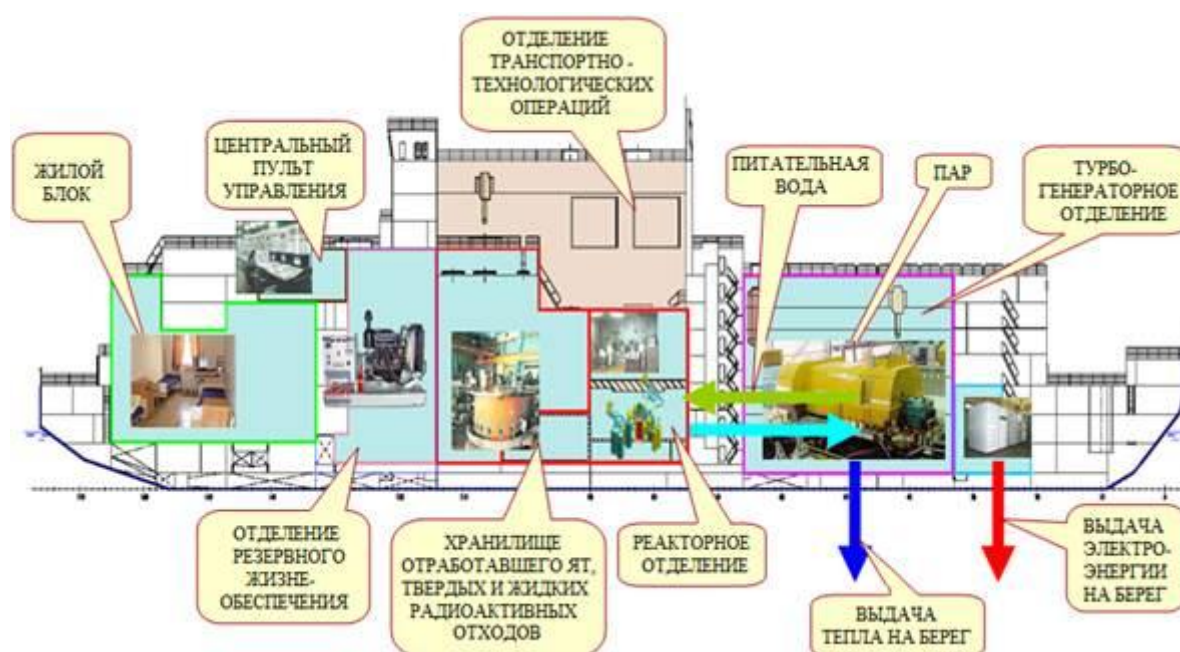


Рисунок 2.1. Общая схема расположения основных помещений ПЭБ [12]

Технические характеристики ПЭБ с реакторной установкой КЛТ-40С представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Характеристика	Значение	Примечание
Электрическая мощность, МВт	60	При наличии двух реакторов
Отпуск теплоты, МВт (Гкал/ч)	58(50)	То же
Тепловая мощность одного реактора, МВт	150	—
Паропроизводительность одного реактора, т/ч	240	—
Давление в первом контуре, МПа	12,7	—
Давление пара на выходе из парогенератора, МПа	3,72	—
Температура перегретого пара, °С	290	—
Срок службы, лет	40	—
Межремонтный период, лет	10—12	—
Ресурс незаменимого оборудования, тыс. ч	240—300	—
Ресурс заменяемого оборудования, тыс. ч	80—100	—
Продолжительность периода отвода теплоты от реактора без вмешательства персонала, ч	24	При длительном обесточивании
Обеспечение резерва времени для управления авариями персоналом, ч	> 1	—
Суммарная активность годового выброса радионуклидов в атмосферу, Ки	< 10	При нормальной эксплуатации
Доза облучения населения при нормальной эксплуатации, мЗв/год	<0,0001	При естественном фоне 2,4 мЗв/год
Радиус санитарно-защитной зоны, м	Около 500	—

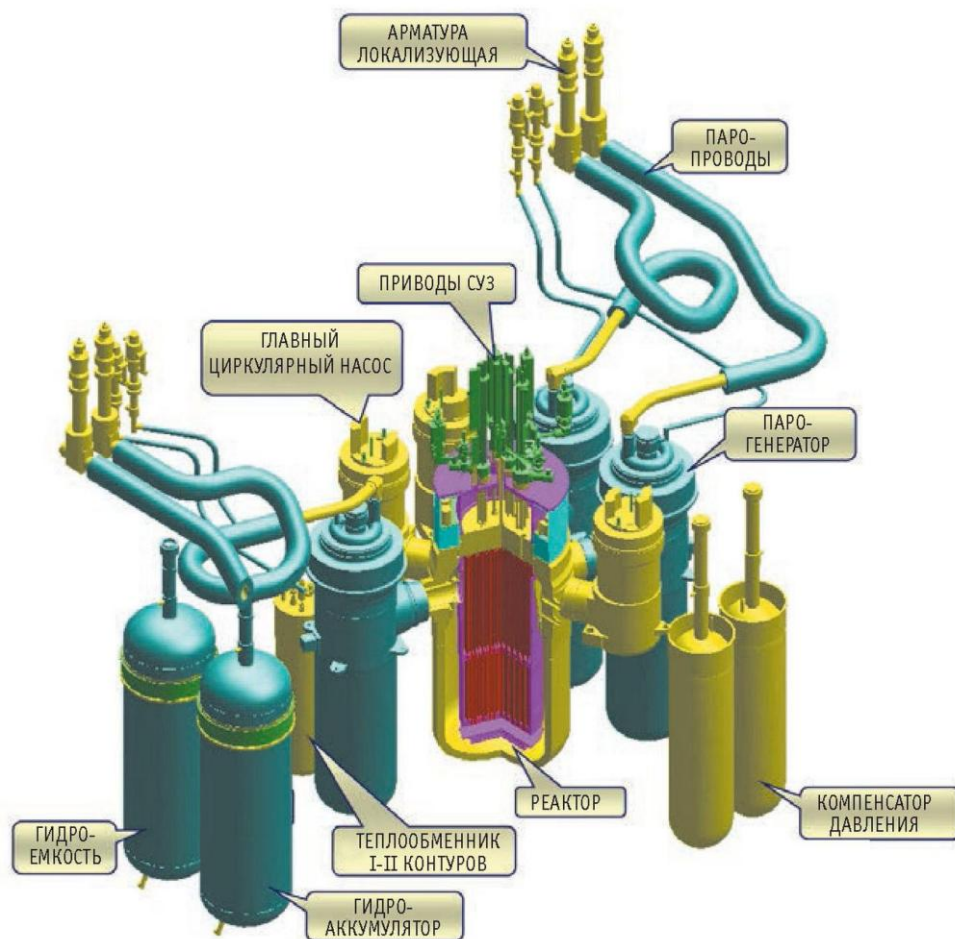


Рисунок 2.2. Реактор КЛТ-40 [12]



Фото 2.1. Установка реактора КЛТ-40 в корпус судна [12]

Турбина ТК-35/38-3,4

Паровая турбина – конденсационного типа, имеет регулируемый теплофикационный отбор пара и 2 нерегулируемых отбора пара для подогрева питательной воды. По условиям размещения регулируемый отбор выполнен в виде двух патрубков, которые за пределами турбины объединяются в одну трубу.

Проточная часть турбины состоит из 13 ступеней давления.

Камера теплофикационного отбора делит турбину на часть высокого давления (ЧВД) и часть, низкого давления (ЧНД).

ЧВД включает в себя: парораспределение, состоящее из двух регулирующих клапанов, каждый из которых расположен в своей клапанной коробке, приваренной к корпусу турбины. Перемещение клапанов осуществляется рычажными передачами, соединенными с сервомотором блока регулирования. Пар, проходя через клапаны, поступает в кольцевую камеру корпуса турбины и затем через сегмент сопел на рабочие лопатки колеса первой ступени. Проточная часть ЧВД состоит из 6 ступеней.

ЧНД состоит из парораспределения, выполненного в виде поворотной диафрагмы с приводом, установленным на корпусе турбины. Проточную часть ЧНД составляют 7 ступеней давления.

Ротор турбины цельнокованный, гибкий. На переднем конце ротора выполнено рабочее колесо масляного насоса-регулятора, которое одновременно служит гребнем упорного подшипника.

На заднем конце ротора насажена полумуфта, жестко соединенная с валом промежуточным, через который приводится во вращение вал генератора.

Ротор опирается на два подшипника скольжения: передний и задний.

Конденсатор выполнен в виде двух отдельных по охлаждающей воде секций, объединенных общим паровым выхлопным патрубком (с встроенным баком расширителем для приема горячих потоков конденсата) и сообщающимися конденсатосборниками. Конденсатор крепится к раме с помощью подвесок. С турбиной конденсатор соединяется переходным прямоугольным патрубком с помощью сварки.

Общий вид конструкции турбины показан на рисунке 2.3.

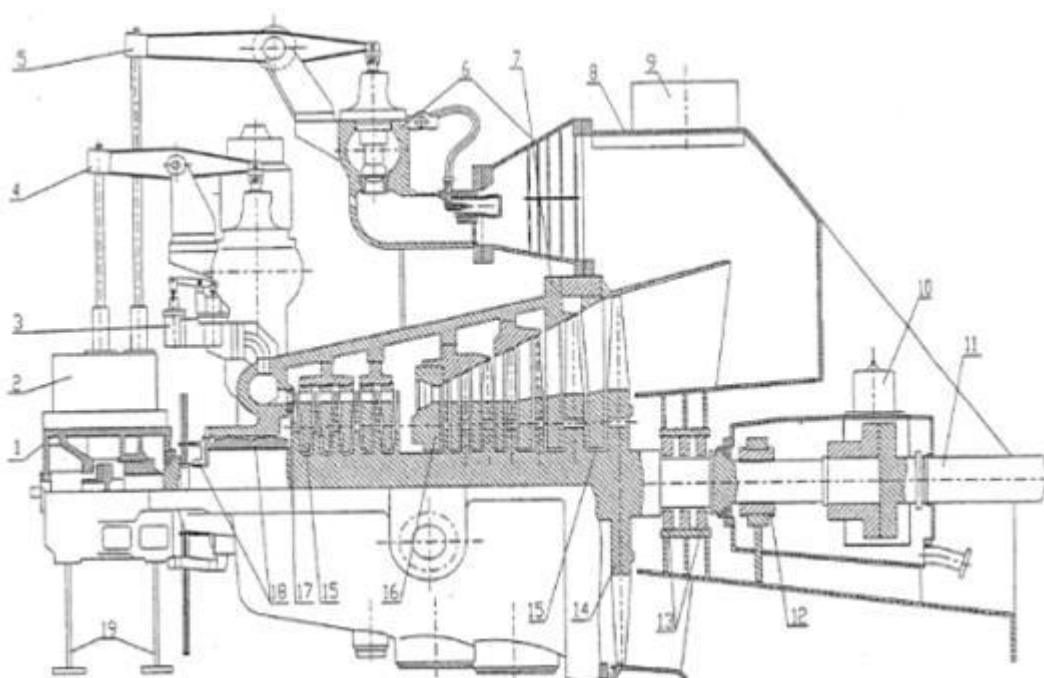


Рисунок 2.3. - общий вид конструкции турбины:

- 1 - передний опорно-упорный подшипник; 2 - блок регулирования; 3 - разгрузочный клапан;
 4 - парораспределение ЧВД; 5 - парораспределение системы травления; 6 - ДУУ; 7- корпус турбины ЧВД; 8 - корпус турбины выхлопная часть; 9 - предохранительная диафрагма;
 10 - валоповоротное устройство; 11 - вал промежуточный; 12 - вкладыш подшипника заднего; 13 - заднее концевое уплотнение; 14 - диафрагмы 2-6 и 8-13 ступеней;
 16 - поворотная диафрагма; 17 - сегмент сопел; 18 - переднее концевое уплотнение;
 19 - гибкая опора турбины

Основные параметры турбоустановки представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Основные параметры турбоустановки

Наименование показателей	Единицы измерения	Значение
Показатели назначения		
Мощность на клеммах генератора	МВт	35
Тепловая нагрузка отопительного отбора	Гкал/ч	25
Частота вращения ротора турбины	об/мин	3000
Параметры пара перед турбиной		
Давление	кгс/см ²	35
Температура	°С	285

Продолжение таблицы 2.2

Температура питательной воды за ПВД	°С	170
Удельный расход пара на турбину	кг/кВтч	6,31
Удельный расход теплоты	ккал/кВтч	3040
Масса турбины	т	75
Масса ПТУ (без генератора)	т	206
Габариты турбины		
Длина	м	8,67
Ширина	м	6,84
Высота	м	9,5

На рис. 2.4., 2.5. представлены структурная схема энергетической оснащённости ПЭБ «Академик Ломоносов» и принципиальная схема пароконденсатного цикла ПЭБ [8].

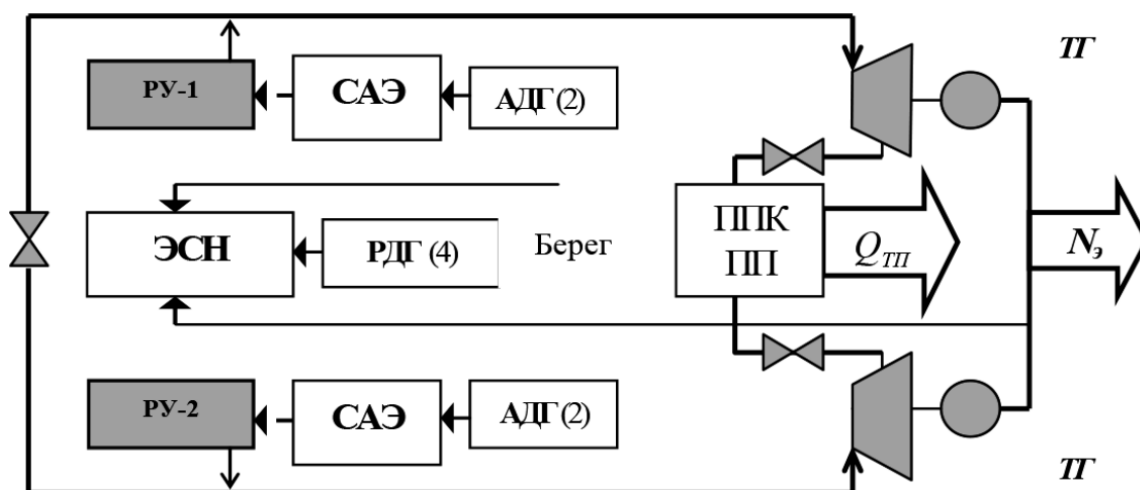


Рисунок 2.4. Структурная схема энергетической оснащённости ПЭБ «Академик Ломоносов»:

РУ-1,2 - реакторные установки; САЭ - система аварийного электроснабжения; ЭСН - электроснабжение собственных нужд; ТГ - турбогенератор; АДГ - аварийный дизель-генератор; РДГ - резервный дизель-генератор; ППК - подогреватели промежуточного (теплофикационного) контура; ПП — пиковые подогреватели; QТП - энергия, идущая на внешнее тепловое потребление; Nэ - энергия, идущая на внешнее электрическое потребление

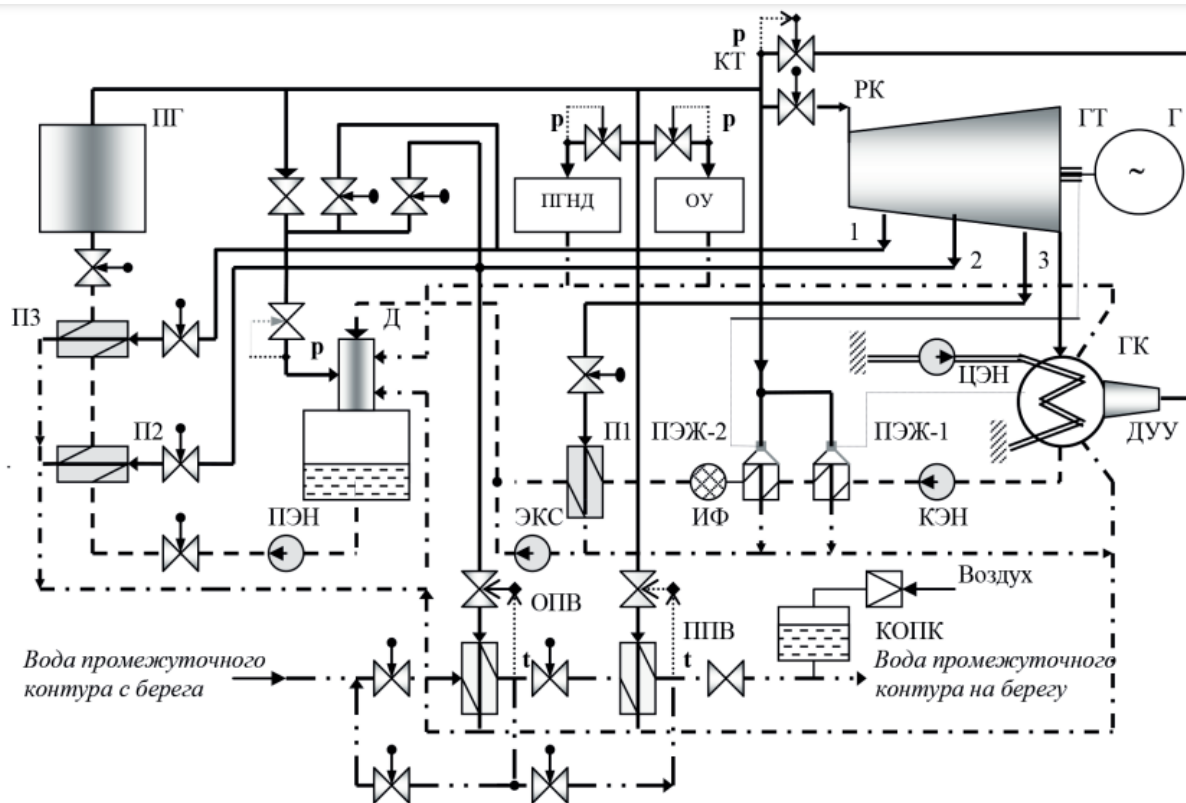


Рисунок 2.5. Принципиальная схема пароконденсатного цикла ПЭБ:

ПГ - парогенератор; ГТ - главная турбина; Г - генератор; ГК - главный конденсатор;

ДУУ - дроссельно-увлажнительное устройство; КЭН - конденсатный электронасос;

ПЭЖ-1, ПЭЖ-2 - пароструйные эжекторы; ЦЭН - циркуляционный электронасос; ЭКС - электронасос конденсатный сливной; ПЭН - питательный электронасос; П1, П2, П3 - подогреватели конденсата и питательной воды; Д - деаэратор; ОПВ - основные подогреватели воды промежуточного контура;

ППВ - пиковый подогреватель воды промежуточного контура; КОПК - компенсатор объема промежуточного контура; ПГНД - парогенератор низкого давления; ОУ - опреснительная установка;

РК - регулирующий клапан; КТ - клапан травления



Фото 2.2. Плавучий энергоблок во время буксировки в Певек, август 2019 г. [12]



Фото 2.3. Плавучий энергоблок «Академик Ломоносов», который сейчас работает в самом северном городе России - Певек [12]



Фото 2.4. Паротурбинная установка мощностью 35 МВт. ПТУ ТК-35/38-3,4 представляет собой блочную машину, которая находится на одной раме вместе с генератором такой же мощности [12]



Фото 2.5. Генераторы филиала ОАО "Силовые машины" "Электросила" [12]



Фото 2.6. ЦПУ ПЭБ [12]

Содержание отчета

Отчет должен содержать краткое описание тепловых схем ПТУ предложенных для рассмотрения судов с парогенератором на органическом топливе и атомным реактором, сравнение этих схем с учетом эксплуатационных и конструктивных особенностей каждой.

Контрольные вопросы:

1. Основные элементы структурной схемы энергетической оснащённости ПЭБ «Академик Ломоносов».
2. Какие технические средства входят в состав ПТУ?
3. Основные элементы принципиальной схемы пароконденсатного цикла ПЭБ, их назначение.
4. Что относится к системам ПТУ?
5. С какой целью и каким образом осуществляется повышение начальных параметров пара?
6. С какой целью и каким образом осуществляется регенеративный подогрев питательной воды в промежуточных водоподогревателях?
7. С какой целью и каким образом осуществляется промежуточный перегрев пара (ППП)?
8. Конструктивные и эксплуатационные особенности двухконтурной АЭУ.
9. За счёт чего и как меняются параметры пара (конденсата, питательной воды) на заданном участке тепловой схемы?

Практическое занятие № 3

ХАРАКТЕРНЫЕ НЕИСПРАВНОСТИ И НЕПОЛАДКИ В РАБОТЕ ТУРБОАГРЕГАТА, ИХ ПРИЧИНЫ И СПОСОБЫ УСТРАНЕНИЯ

Целью практического занятия является формирования умения выполнять безопасные и аварийные процедуры эксплуатации механизмов двигательной установки, включая системы управления, осуществлять подготовку, эксплуатацию, обнаружение неисправностей и меры, необходимые для предотвращения причинения повреждений ПТУ, идентифицировать ситуации, требующие применения аварийной процедуры эксплуатации двигательной установки.

- 1. Неисправности и неполадки при пуске.**
- 2. Неисправности и неполадки в работе подшипников.**
- 3. Неисправности в работе масляной системы.**
- 4. Вибрация турбоагрегата.**
- 5. Неисправности в работе конденсационной установки.**
- 6. Неисправности в работе систем управления, регулирования и защиты.**
- 7. Неисправности в работе зубчатой передачи.**

1 Неисправности и неполадки при пуске

1.1. При проворачивании ГТЗА валоповоротным устройством потребляемая сила тока выше нормальной или сильно колеблется

Причина	Принимаемые меры
.10. Тормоз валопровода зажат	Отдать тормоз
.11. Гребной винт задевает за какое-либо препятствие или на гребной винт намотался трос	Освободить гребной винт
.12. Замерзание воды в дейдвудном устройстве	Отогреть дейдвудную трубу
.1. Температура масла низкая	Подогреть масло
.2. В корпусе турбины скопилась вода	Спустить воду из турбины, прочистить трубопровод или отверстия продувания
.3. Ротор задевает о статор турбины в горячем состоянии	Дать турбине остыть, при необходимости принять меры, указанные в подпункте .4
.4. Ротор задевает о статор турбины	Отсоединить турбину, повернуть вручную, в холодном состоянии проверить осевое и радиальное положение ротора, при необходимости вскрыть турбину и устранить дефекты
.5. Некоторые подшипники загрязнены, в них не поступает масло или корродированы шейки валов	Вскрыть подшипники и устранить дефекты
.6. Некоторые зубья редуктора деформированы, имеют забоины	Осмотреть зубья и устранить дефекты
.7. Неисправно валоповоротное устройство	Отремонтировать валоповоротное устройство

1.3. Давление страгивания выше нормального

Причина	Принимаемые меры
См. п. 11.1.1, а также:	
.1. Низкий вакуум в конденсаторе (высокое противодавление в турбине)	Довести вакуум (противодавление) до требуемого
.2. Закрыты сопловые клапаны турбогенератора	Установить клапаны в пусковое положение

1.4. Посторонние шум и стуки в турбине или редукторе

Немедленная мера: Остановить турбоагрегат.

Причина	Принимаемые меры
.1. Задевание в проточной части турбины или в уплотнениях вследствие теплового прогиба ротора или недопустимого относительного удлинения и быстрого развития частоты вращения	Прослушать турбину при вращении без пара. Дать турбине остыть и произвести нормальный пуск
.2. Водяной удар (сопровождается вибрацией и выбиванием пара или воды из уплотнений)	Открыть клапаны продувания, проверить состояние упорного подшипника и отсутствие задеваний в турбине. Последующий пуск производить только убедившись в отсутствии неисправностей
.3. Зубья редуктора имеют забоины, деформированы или поломаны, в редуктор попал посторонний предмет	Проверить состояние зубьев, устранить обнаруженные дефекты

2. Неисправности и неполадки в работе подшипников

2.1. Повышенный нагрев опорных или упорных подшипников турбины или редуктора

Причина	Принимаемые меры
.1. Давление масла, поступающего на смазку, ниже нормального	Восстановить нормальное давление масла
.2. Уровень масла в подшипниках с кольцевой смазкой выше (ниже) нормального; заедает смазочные кольца	Долить (слить) масло до нормального уровня, устранить заедание колец
.3. Температура масла, поступающего на подшипники, выше нормальной	Понизить температуру масла
.4. Качество масла ухудшилось	Спустить воду и шлам из системы, отсепарировать или сменить масло
.5. Поступление масла к отдельным подшипникам прекратилось из-за засорения каналов или дроссельных шайб	Очистить каналы, дроссельные шайбы
.6. Турбоагрегат перегружен	Снизить нагрузку на агрегат
.7. В масляной системе скопился воздух	Выпустить воздух
.8. Повысилось осевое давление на упорный подшипник (см. п.11.2.3)	Снизить нагрузку на турбоагрегат, принять меры по п. 11.2.3
.9. Масляный зазор (осевой разбег вала) в подшипник занижен	Восстановить нормальный зазор (разбег)
.10. Вкладыши (упорные сегменты) пригнаны неудовлетворительно	Вскрыть подшипник, устранить дефекты
.11. Шейка вала или упорный гребень корродированы	То же
.12. Состояние баббитовой заливки неудовлетворительное (баббит отстал, выкрошен, подплавлен, низкого качества)	То же
.13. Качество укладки валов и сборки подшипников неудовлетворительное	То же
.14. Центровка валов нарушена	Произвести центровку валов

3. Неисправности в работе масляной системы

3.3. Перепад давления до и после масляного фильтра уменьшился либо повысился сверх допустимого

Причина	Принимаемые меры
.1. Сетка фильтра порвана (перепад давлений уменьшился)	Переключить систему на резервный фильтр, заменить сетку
.2. Фильтр загрязнен	Переключить систему на чистый фильтр

3.4. Уровень масла в сточной цистерне повышен (понижен)

Причина	Принимаемые меры
.1. Указатель уровня заедает	Устранить заедание указателя
.2. В масло попадает вода	См. п. 11.3.7
.3. Масло сильно эмульгирует	Произвести промывку или сменить масло
.4. Значительные утечки масла из системы	Устранить не плотности в системе

3.6. Температура масла, поступающего на смазку, выше нормальной

Причина	Принимаемые меры
.1. Терморегулятор неисправен	Устранить неисправность регулятора
.2. Маслоохладитель загрязнен	Включить резервный маслоохладитель и почистить загрязненный
.3. Количество воды, идущей на маслоохладитель, недостаточно	Увеличить подачу воды

4 Вибрация турбоагрегата

4.1. Вибрация возникает при пуске и возрастает с увеличением частоты вращения

Причина	Принимаемые меры
.1. Тепловой прогиб ротора в результате неправильного прогрева турбины	Снизить частоту вращения до исчезновения вибрации, прогреть турбину на этой частоте и постепенно увеличить скорость вращения
.2. Температура масла, поступающего на подшипники, ниже нормальной	Снизить частоту вращения, отрегулировать температуру масла
.3. Быстрое развитие хода (частоты вращения)	Уменьшить частоту вращения до исчезновения вибрации, через 5-10мин постепенно увеличить ход
.4. Неравномерно прогрет корпус турбины из-за повреждения или неправильной установки изоляции	Снизить ход или остановить турбину, восстановить изоляцию корпуса

4.4. Вибрация возникает при определенной частоте вращения

Причина	Принимаемые меры
.1. Частота вращения ротора совпадает с критической частотой системы ротор - статор (резонанс)	Не работать на критической частоте вращения, переходить эту частоту по возможности быстро
.2. Частота вращения гребного вала совпадает с частотой собственных колебаний корпуса судна	То же
.3. Автоколебания на масляной пленке подшипников (частота колебаний близка к половине частоты вращения и мало меняется с изменением нагрузки)	Повысить температуру масла, уменьшить масляный зазор и увеличить натяг вкладышей

4.7. Внезапная сильная вибрация, сопровождающаяся шумом, стуками

Причина	Принимаемые меры
См. п. 11.1.4, подпункты .2, 3, а также:	
.1. Оборвалась лопатка, бандаж; в проточную часть попал посторонний предмет	См. п. 2.4.5.

4.8. Вибрация редуктора

Причина	Принимаемые меры
.1. Кинематическая точность колес и шестерен нарушена в результате расстройства болтовых соединений или неравномерного износа зубьев	Снизить нагрузку, при первой возможности произвести ремонт колес и шестерен
.2. Нарушилась балансировка одной из шестерен или колеса	То же
.3. Изгиб или поломка одной из лопастей гребного винта	Снизить частоту вращения до устранения дефекта

5. Неисправности в работе конденсационной установки

5.1. Вакуум резко снижается

Причина	Принимаемые меры
.1. Остановился, сорвал подачу или неисправен циркуляционный насос	Немедленно остановить турбоагрегат, пустить резервный насос, устранить неисправность насоса или системы
.2. Режим эжектора (вакуум-насоса) резко нарушен	Включить резервный эжектор (вакуум-насос) и устранить неисправность
.3. Остановился или неисправен конденсатный насос	Пустить резервный насос, устранить неисправность
.4. Открыт клапан, сообщающий конденсатор с атмосферой или системой, не находящейся под вакуумом	Закрыть клапан

5.2. Вакуум ниже нормального

Причина	Принимаемые меры
.1. Температура охлаждающей воды повышена	Увеличить подачу охлаждающей воды
.2. Давление пара в системе уплотнений турбин ниже атмосферного	Отрегулировать давление пара в системе уплотнений
.3. Через не плотности фланцев, сальников, клапанов, конденсатного насоса или уплотнения водомерного стекла происходит подсос воздуха	Проверить воздушную плотность конденсатора, обнаружить места подсоса воздуха и устранить не плотности
.4. Количество охлаждающей воды поступающей в конденсатор, недостаточно	Увеличить производительность циркуляционного насоса, включить резервный насос

5.3. Нагрев охлаждающей воды повышен

Причина	Принимаемые меры
См. п. 11.5.2.4, а также:	
.1. Трубные доски и входные отверстия трубок конденсатора загрязнены	Очистить входные отверстия трубок и трубные доски
.2. Отливной клинкет на циркуляционном трубопроводе прикрыт	Открыть отливной клинкет
.3. Давление в приемном трубопроводе циркуляционного насоса понижено	Очистить приемные решетки, фильтры, открыть полностью кингстоны
.4. В водяных камерах конденсатора скопился воздух	Выпустить воздух через воздушные краны

5.4. Нагрев охлаждающей воды понижен

Причина	Принимаемые меры
.1. Поверхности охлаждения конденсатора загрязнены	Очистить поверхности охлаждения
.2. Перегородки водяных камер или крышек конденсатора разрушены	Произвести ремонт или замену изношенных деталей

5.5. Температурный напор на выходе охлаждающей воды повышен

Причина	Принимаемые меры
.1. Поверхности охлаждения конденсатора загрязнены (при этом разность температур отсасываемой паровоздушной смеси и охлаждающей воды увеличена)	Очистить поверхности охлаждения
.2. Через не плотности системы происходит значительный подсос воздуха (скорость падения вакуума при отключении эжектора повышена)	Принять меры, указанные в пункте 11. 5.2.3
.3. Режим эжектора нарушен	См. п. 11.5.7.

5.6. Переохлаждение конденсата повышено

Причина	Принимаемые меры
.1. Уровень конденсата в конденсаторе повышен	См. п. 11.5.10.
.2. Через не плотности системы происходит значительный подсос воздуха	Принять меры, указанные в пункте 11.5.2.3
.3. Режим эжектора нарушен	См. п. 11.5.7.
.4. Количество охлаждающей воды, подаваемой в конденсатор, избыточно	Снизить производительность циркуляционного насоса или перейти к рециркуляции охлаждающей воды

5.7. Режим пароструйного эжектора нарушен

Причина	Принимаемые меры
.1. Давление пара перед соплами эжектора недостаточно	Установить рабочее давление
.2. Уровень конденсата повышен	Отрегулировать уровень конденсата
.3. Количество конденсата, проходящего через охладитель эжектора, недостаточно или его температура повышена	Отрегулировать работу регулятора температуры конденсата или вручную отрегулировать рециркуляцию конденсата
.4. Сетки перед соплами засорены	Очистить сетки
.5. Сопла эжектора изношены, засорены или неправильно установлены	Очистить сопла, устранить дефекты
.6. Диффузор изношен или оборван	Заменить диффузор
.7. Трубки охладителя эжектора загрязнены	Очистить трубки

.8. Охладитель эжектора переполнен водой из-за разрыва трубок или нарушения отводов конденсата	Заглушить дефектные трубки, очистить конденсатоотводчики
.9. Циркуляция воздуха нарушена из-за не плотности в корпусе эжектора	Уплотнить перегородку в корпусе между ступенями эжектора
.10. Эжектор перегружен	Принять меры по п. 11.5.2.3

5.8. Соленость конденсата повышена

Причина	Принимаемые меры
.1. В конденсатор поступает подсолёная вода из другого конденсатора или магистралей	Последовательно отключая магистрали, выявить источник засоления и устранить обнаруженные дефекты
.2. Режим работы испарителей нарушен	Отрегулировать работу испарителей
.3. Пропускают трубки конденсатора или их уплотнения в трубных досках	Проверить водяную плотность конденсатора. Заглушить дефектные трубки, заменить или поджать уплотнения
.4. Пропускают змеевики или батареи испарителя	Отключить испаритель, устранить дефекты

6. Неисправности в работе систем управления, регулирования и защиты

6.1. При закрытии маневого клапана турбина не останавливается

Причина	Принимаемые меры
.1. Шток маневого клапана или его сервомотора заедает	Устранить заедание
.2. Прилегание уплотнительных поверхностей клапана неудовлетворительно	Притереть клапан
.3. В корпусе клапана образовался свищ	Вскрыть клапан и устранить дефект
.4. Под клапан попал посторонний предмет	То же

7. Неисправности в работе зубчатой передачи

7.2. Отслаивание сравнительно больших частиц металла с рабочей поверхности зубьев как проявление прогрессирующего выкрашивания

Причина	Принимаемые меры
.1. Зубья перегружены вследствие уменьшения контактной поверхности из-за выкрашивания	Снизить нагрузку на зубья, чаще чистить магнитные и механические фильтры

7.3. На вершинах зубьев образуются "гребешки", заусенцы

Причина	Принимаемые меры
.1. Пластическая деформация зубьев	Скруглить вершины радиусом 0,3-0,5мм, восстановить скосы по краям зубьев

7.4. Вдоль высоты зубьев образуются глубокие борозды в результате сваривания частиц металла (заедание).

Обязательная мера: Зачистить наждачной шкуркой с маслом поврежденные поверхности зубьев, снять острые края борозд

Причина	Принимаемые меры
.1. Количество масла, подаваемого на смазку, недостаточно	Очистить форсунки смазки, увеличить давление масла
.2. Вязкость масла понижена	Снизить температуру масла, идущего на редуктор
.3. Неудовлетворительные геометрические параметры зацепления	Тщательно подогнать контакт зубьев, обкатать передачу с постепенным повышением нагрузки

7.6. Рабочие поверхности зубьев корродируют

Причина	Принимаемые меры
.1. В масло попала морская вода	Очистить зубья, промыть или заменить масло
.2. Влага попадает в редуктор во время стоянки	Чаше прокачивать агрегат маслом и сепарировать масло
.3. Недостаточный отсос выпара из корпуса редуктора	Проверить систему выпара, ее плотность, чистоту сеток на головке выпара

7.7. На зубьях визуально или с помощью дефектоскопии обнаружены трещины

Причина	Принимаемые меры
.1. Перегрузка отдельных участков зубьев в результате усталости	Удалить или исключить из зацепления участки зубьев, имеющие трещины; снизить нагрузку на передачу; принять меры, указанные в п. 11.7.1.

Содержание отчета

Отчет должен содержать краткое описание действий по обнаружению неисправностей и принятию мер, необходимых для предотвращения причинения повреждений ПТУ, идентификации ситуации, требующей применения аварийной процедуры эксплуатации двигательной установки по вводным и по заданиям руководителя практического занятия.

Контрольные вопросы:

1. Какие отказы и повреждения могут возникать в процессе эксплуатации паротурбинных установок?
2. Неисправности и неполадки при пуске. Причины и принимаемые меры.
3. Неисправности и неполадки в работе подшипников. Причины и принимаемые меры.
4. Неисправности в работе масляной системы. Причины и принимаемые меры.
5. Вибрация турбоагрегата. Причины и принимаемые меры.
6. Неисправности в работе конденсационной установки. Причины и принимаемые меры.
7. Неисправности в работе систем управления, регулирования и защиты. Причины и принимаемые меры.
8. Неисправности в работе зубчатой передачи. Причины и принимаемые меры.

Практическое занятие № 4

СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ГТД И КОМБИНИРОВАННЫХ УСТАНОВОК

Целью практического занятия является изучение структурных схем ГТД и комбинированных установок, сравнение их с учетом эксплуатационных и конструктивных особенностей каждой, закрепление навыков чтения принципиальных тепловых схем СЭУ современных судов. Подготовка будущих инженеров-механиков в области несения безопасной вахты в машинном отделении, изучение состава, назначения, основ эксплуатации главных судовых турбинных установок, вспомогательных турбин и связанных с ними систем управления.

В настоящее время на флоте применяют судовые энергетические установки (СЭУ) с двигателями внутреннего сгорания (ДВС), паровыми турбинами (ПТУ), газотурбинными двигателями (ГТД) и комбинированные. Выбор вида СЭУ обусловлен типом и назначением судна и осуществляется на основе сравнения многих технико-экономических показателей как СЭУ, так и судна в целом.

По удельному расходу топлива паротурбинная установка уступает дизельной — **230 — 320** против **200 — 230 г/(кВт ч)**. Вместе с тем ПТУ менее требовательна к качеству топлива и при мощностях свыше **20 тыс. кВт** имеет меньшую построечную стоимость, меньшую массу и габариты и ряд других преимуществ перед СЭУ с ДВС.

Паровая турбина в настоящее время является единственным реальным тепловым двигателем, где возможно использование ядерной энергии.

Газотурбинные установки (ГТУ) находят широкое применение на тех судах, для которых особенно существенны преимущества этих установок — малая удельная масса, компактность, высокая маневренность, возможность быстрой агрегатной замены и др. Вместе с тем по экономичности ГТУ пока уступают дизельным установкам.

Современные судовые ГТУ можно разделить на легкие и тяжелые.

Достаточно широко ГТУ используются в военно-морском флоте, в частности, на кораблях с динамическими принципами поддержания.

Комбинированные установки выполняются как смешанного типа, так и с единым термодинамическим циклом.

Комбинированные установки смешанного типа состоят из нескольких независимых установок, например ДВС и ГТУ. Такие установки применяются, когда судно имеет два ходовых режима, которые резко различаются мощностью и продолжительностью. Так, режим длительного малого хода может обеспечиваться ДВС, режим полного хода — ГТУ или совместно ГТУ и ДВС.

Комбинированные установки с единым термодинамическим циклом применяют с целью повышения КПД установки при сохранении умеренных массогабаритных характеристик.

- комбинированная дизель-газотурбинная установка (КДГТУ);
- комбинированная паро-газотурбинная установка (КПГТУ);

– комбинированная газо-газотурбинная установка (КГГТУ).

В СГТУ нашли применение многодвигательные агрегаты, в которых на каждый валопровод работает два и более ГТД. Такие схемы обусловлены следующими причинами:

- широким спектром ходовых режимов судов, а, следовательно, значительным изменением мощности ГЭУ;
- снижением экономичности ГТД легкого типа на промежуточных режимах.

На рис. 4.1. показаны СГТУ различных типов. Большинство многодвигательных схем предполагает суммирование мощности ГТД. СГТУ такого типа в технической литературе обычно называют комбинированными энергетическими установками.

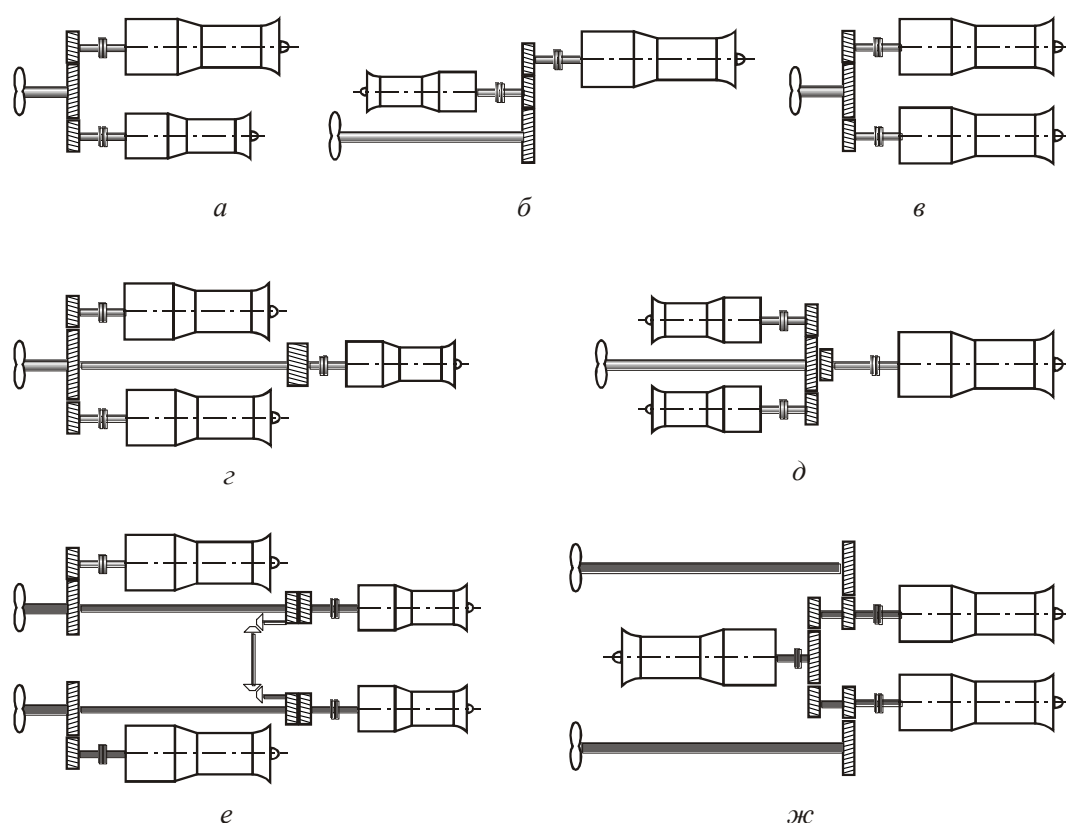


Рисунок 4.1. СГТУ различных типов

В таких схемах могут быть использованы двигатели как равной, так и различной мощности. ГТД малой мощности в многодвигательных установках называют маршевыми. Они предназначены для обеспечения экономических скоростей.

Полная скорость судна обеспечивается за счет работы всех двигателей (если такой режим работы предусмотрен конструктивно), или за счет работы двигателей большой мощности (форсажные или ускорительные двигатели). МД при этом выводятся из действия.

Комбинированные установки появились в результате компоновки нескольких двигателей в составе одной энергетической установки. Эти

двигатели могут быть как однотипные, так и различных типов, термодинамически связанными друг с другом и термодинамически независимыми. Общей целью создания комбинированных установок является стремление повысить экономичность энергетической установки в целом при работе в широком диапазоне изменения её мощности за счет удачного сочетания достоинств двигателей различных типов, или однотипных различного исполнения (маршевых и форсажных), входящих в состав одной энергетической установки.

Комбинированная установка, включающая в свой состав ГТУ, может быть паро-газотурбинной (КПГТУ), дизель-газотурбинной (КДГТУ) и газотурбинной (КГГТУ). Первое слово в названии комбинированной установки означает основной двигатель, второе – ускорительный.

Принята следующая международная классификация комбинированных установок с термодинамически независимыми главными двигателями:

- **COSAG – КПГТУ** – на полной скорости работают оба двигателя;
- **CODAG – КДГТУ** – на полной скорости работают оба двигателя;
- **CODOG – КДГТУ** – на полной скорости работает только ГТД;
- **COGAG – КГГТУ** – на полной скорости работают все ГТД;
- **COGOG – КГГТУ** – на полной скорости работают форсажные ГТД;
- **COGAGE – ГТУ**, обеспечивающая электродвижение судна – на полной скорости работают все газотурбогенераторы.

где CO – combine; G – gas; S – steam; D – diesel; O – or (*применяется между обозначениями двигателей, когда на режиме максимальной мощности работает только ускорительный наиболее мощный двигатель*); A – and.

Появление комбинированных газопаротурбинных установок (КППТУ) с термодинамически связанными между собой двигателями объясняется стремлением утилизировать теплоту выходящих из ГТД газов для получения в утилизационном котле (УК) пара, приводящего во вращение паровую турбину, и тем самым повысить экономичность комбинированной установки.

Большое внимание, уделяемое газовым турбинам, объясняется рядом их преимуществ по сравнению с другими судовыми двигателями.

К преимуществам ГТУ по сравнению с дизельными относятся:

1. осуществление непрерывного и постоянного рабочего процесса, благодаря чему применяются высокие скорости рабочей среды и рабочих органов для повышения экономичности;
2. отсутствие поршней и кривошипно-шатунного механизма, а также трения в рабочих частях (за исключением трения в подшипниках вала ротора);
3. простота устройства и обслуживания;
4. возможность получения большой мощности на валу (до 30 000 кВт);
5. меньшие размеры и масса при одинаковой мощности;
6. возможность сжигания в камерах сгорания более дешевых тяжелых сортов топлива;

7. меньший расход на смазочные материалы (приблизительно в 30—40 раз) и ремонт;

8. удобство автоматизации и дистанционного управления; относительно небольшой обслуживающий персонал в связи с сокращением трудоемкости технического обслуживания.

По сравнению с паротурбинными установками ГТУ имеют следующие преимущества:

1. отсутствие паровых котлов и сложного котельного оборудования (системы, насосы, вентиляторы);
2. отсутствие конденсаторов и связанных с ними систем;
3. лучшие маневренные и пусковые качества;
4. меньшие размеры и масса при одинаковой мощности;
5. низкое давление рабочей среды в цикле, а следовательно, большая безопасность при случайном повреждении трубопровода;
6. высокая маневренность, быстрый пуск и малое время набора полной мощности (пуск и выход на частоту вращения холостого хода в течение 1 мин; время набора полной мощности 2-3 мин).

При применении ГТУ значительно увеличиваются грузоподъемность и дальность плавания судна. При серийном производстве стоимость изготовления ГТУ, амортизационные отчисления и эксплуатационные расходы значительно меньше, чем соответствующие показатели паротурбинных и дизельных установок.

Перспективность ГТУ как судового двигателя в значительной степени определяется возможностью достигнуть высокой экономичности при дальнейшем совершенствовании проточной части турбин и компрессоров, особенно в связи с созданием жаростойких материалов, в том числе керамики. При температуре 900 - 950 °С экономичность ГТУ будет выше, чем большинства построенных ПТУ, а при температуре 1200 °С может превосходить экономичность ДВС.

Газотурбинные установки большой мощности перспективны как главные двигатели для ряда судов новых типов, характерными особенностями которых являются большая мощность энергетических установок при ограничениях по высоте и длине машинных отделений. В настоящее время рядом фирм построены и успешно эксплуатируются газотурбоприводы для ряда потребителей, но основное внимание уделяется разработке газотурбогенераторов.

Внедрение газотурбинных установок на судах позволяет:

- уменьшить площадь машинных отделений на 5 - 10%;
- уменьшить количество вспомогательных механизмов;
- упростить систему управления установкой;
- осуществить безвахтовое обслуживание;
- резко снизить капитальные затраты за счет стоимости монтажа энергоустановки (стоимость монтажа ГТУ примерно в пять раз меньше стоимости монтажа дизельной установки);

- уменьшить численность машинной команды.

Однако следует отметить, что внедрение ГТУ на транспортном и промышленном флотах ограничивается их невысокой экономичностью и направленностью судовых компаний на использование двигателей традиционных типов.

Газотурбинные двигатели в зависимости от назначения выполняются по различным схемам. Если цикл характеризует термодинамические особенности ГТД, то схема — тепломеханические связи между основными элементами двигателя. ГТД одного и того же цикла могут выполняться по различным схемам. Определяющими при выборе схемы являются надежность и экономичность ГТД, особенно на режимах частичных нагрузок.

На рис. 4.2. представлены некоторые схемы, получившие применение на флоте [2, 10].

Блокированная схема 1 конструктивно наиболее проста. Ее характерной особенностью является зависимость частоты вращения компрессора от характеристики двигателя. Схема отличается снижением КПД двигателя на частичных нагрузках при любом способе регулирования.

При запусках и работе на частичных режимах блокированная схема требует уменьшения нагрузки, что вызывает необходимость применения электропередачи, гидropередачи или винта регулируемого шага (ВРШ).

Подобные двигатели применяют в установках, работающих в основном на номинальных нагрузках.

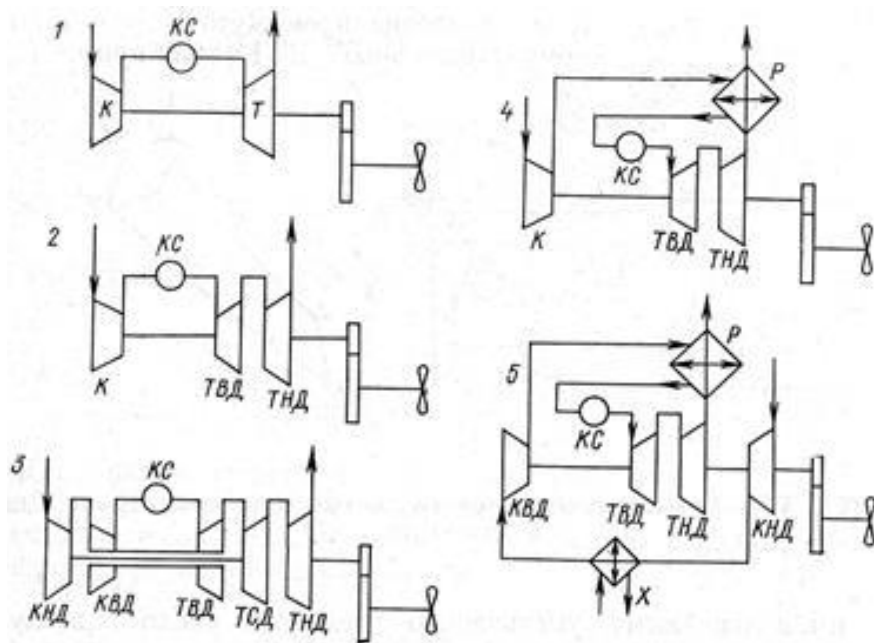


Рисунок 4.2. Структурные схемы газотурбинных двигателей:

Простой цикл: 1 - блокированный привод винта и компрессора;

2 - свободная силовая турбина; 3 - два турбокомпрессора и свободная силовая турбина.

Цикл с регенерацией: 4 - свободная силовая турбина.

Цикл с регенерацией и промежуточным охлаждением:

5 - блокированный привод винта и КНД

Схема 2 со свободной силовой турбиной также отличается простотой компоновки, хорошими пусковыми характеристиками и примерно таким же падением КПД на частичных нагрузках, как и предыдущая. Используется в установках, также работающих в основном на номинальном режиме.

Схема 3 с двумя компрессорами и независимой силовой турбиной позволяет получить требуемое сжатие воздуха при большой начальной температуре газа и обеспечить работу каждого компрессора в оптимальных условиях. Экономичность такого ГТД на частичных нагрузках снижается несколько меньше чем в предыдущих схемах. Установка обоих компрессоров в одном корпусе, а также размещение в общем корпусе всех трех турбин позволяют получить весьма компактный двигатель. Подобная схема находит применение в корабельных установках.

Следует отметить, что большинство двигателей простого цикла конвертированы в судовые из авиационных. В качестве примера можно привести ГТД LM-2500, LM-1500 («Дженерал электрик», США), FT4A («Пратт Уитни», США), «Олимп» и «Гном» («Роллс-Ройс», Англия) и др.

Схема 4 с регенерацией и свободной силовой турбиной T2 обладает более высоким КПД, чем у ГТД простого цикла. Применение регенерации несколько уменьшает также падение КПД двигателя на частичных нагрузках.

Схема 5 с регенерацией и промежуточным охлаждением имеет блокированный привод винта и компрессора низкого давления. Последнее обуславливает необходимость применения ВРШ. Усложнение схемы приводит к возрастанию гидравлических потерь, что снижает эффективность регенерации и промежуточного охлаждения.

Содержание отчета

Отчет должен содержать краткое описание схем ГТУ предложенных для рассмотрения, сравнение этих схем с учетом эксплуатационных и конструктивных особенностей каждой.

Контрольные вопросы:

1. Какие элементы входят в состав ГТУ?
2. Что относится к системам ГТУ?
3. Преимущества и недостатки судовых энергетических установок (СЭУ) с двигателями внутреннего сгорания (ДВС), паровыми турбинами (ПТУ), газотурбинными двигателями (ГТД) и комбинированных.
4. Чем обусловлен выбор вида СЭУ судна и как он осуществляется на основе сравнения технико-экономических показателей как СЭУ, так и судна в целом?
5. Международная классификация комбинированных установок с термодинамически независимыми главными двигателями.
6. Структурные схемы газотурбинных двигателей, их особенности, преимущества и недостатки.

Практическое занятие № 5

ГАЗОПАРОТУРБИННАЯ УСТАНОВКА БЫСТРОХОДНЫХ НАКАТНЫХ СУДОВ ТИПА «КАПИТАН СМИРНОВ»

Целью практического занятия является изучение принципиальной тепловой схемы газопаротурбинной установки, компоновки и характеристик пропульсивной газотурбинной установки газотурбохода типа «Капитан Смирнов», сравнение с иными схемами с учетом эксплуатационных и конструктивных особенностей каждой, закрепление навыков чтения принципиальных тепловых схем СЭУ современных судов. Подготовка в области несения безопасной вахты в машинном отделении, изучение состава, назначения, основ эксплуатации главных судовых турбинных установок, вспомогательных турбин и связанных с ними систем управления.

В состав установки входят два газопаротурбинных агрегата (ГПТА) М25, каждый из которых состоит из автоматизированного реверсивного двигателя ДИ59, прямоточного со свободной силовой турбиной максимальной мощностью 14,12 МВт, ПТУ мощностью 4,28 МВт и общего редуктора. Теплоутилизационный контур состоит из автоматизированного утилизационного котла КУПЗ100 и паровой турбины с конденсатором, эжектором и редукционно-охладительным устройством. Пар, генерируемый в УК, используется в пропульсивной паровой турбине и в утилизационном турбогенераторе ТГУ1000, а также идет на общесудовые нужды. Особенностью установки М25 является то, что она допускает длительную работу без теплоутилизационного контура, когда УК не заполнен водой. Опыт эксплуатации показал высокую надежность и эффективность КППТУ, возможность работы при парциальной мощности установки [9, 10].

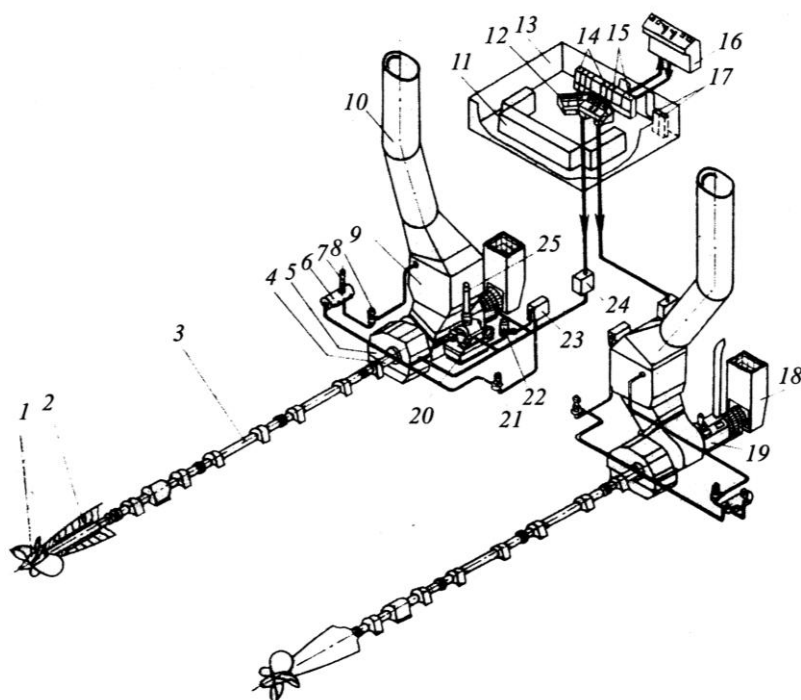


Рисунок 5.1. Компоновка пропульсивной газотурбинной установки газотурбоходов типа «Капитан Смирнов»

1 – ГВ; 2 – дейдвудное устройство; 3 – ВП; 4 – упорный подшипник; 5 – редуктор; 6 – сепаратор пара; 7, 25 – соответственно трубопроводы подачи пара в УК и к ПТ; 8, 21, 22 – соответственно циркуляционный, питательный, конденсатный насосы; 9 – утилизационный котел КУП-3100; 10 – газовыпускной трубопровод; 11 – главный щит; 12, 16 – соответственно пульты управления в ЦПУ и в рулевой рубке; 13 – ЦПУ; 14, 15 – щиты системы автоматизированного управления и контроля соответственно; 17 – комплекс управления общесудовыми системами; 18 – воздухоприемная шахта; 19 – ГТД ДИ59; 20 – утилизационная паровая турбина ПТУ-2; 23 – теплый ящик; 24 – станция управления ГТД

Характеристики агрегата М25

Характеристики	Режим	
	максимальный (без отбора пара)	номинальный (с отбором пара на ТГ и ОСН)
Мощность переднего хода, МВт, в т. ч.:	18,39	17,28
ГТД		14,12
УТГ	4,27	3,16
Удельный расход топлива на ГТД, г/(кВт·ч)	238	256
Частота вращения выходного вала редуктора, мин ⁻¹	130	128
Максимальная мощность заднего хода, МВт	—	5,74
Паропроизводительность УК, т/ч, в т.ч.:		26,2
перегретого пара		24,0
насыщенного пара		2,2
Давление пара в УК, МПа		1,5
Температура, °С:		
пара в УК		310
выпускных газов перед УК		390
газов за УК		179
Расход газов в УК, кг/с		91,8
Масса агрегата в рабочем состоянии, т, в т. ч.:		149
ГТД с рамой, газовойпускным патрубком, маслобаком		19
редуктор с муфтой		55
УК		45
Длина общая (от входного устройства ГТД до выходного фланца редуктора), м		12245
Ширина, м		5155
Высота, м:		
с УК		10875
с выпускным устройством		12525

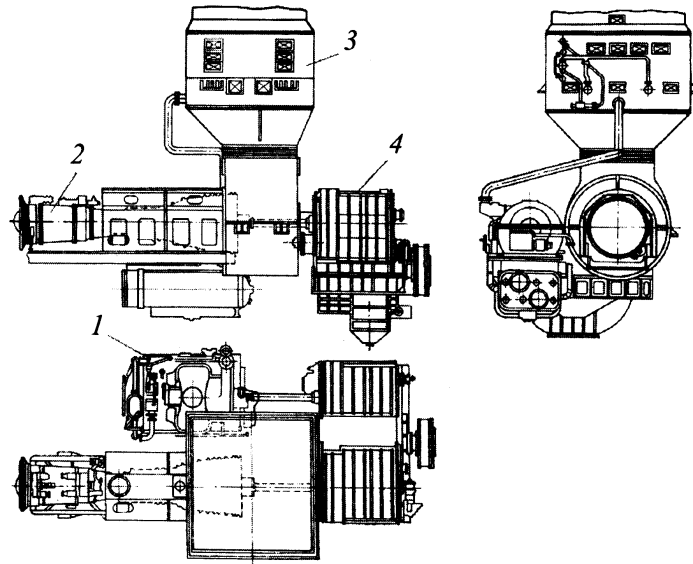


Рисунок 5.2. Компановка газопаротурбинного агрегата М-25:
1 – ПТУ с конденсатором; 2 – ГТД ДИ – 59; 3 – утилизационный котел КУП – 3100;
4 – главный редуктор

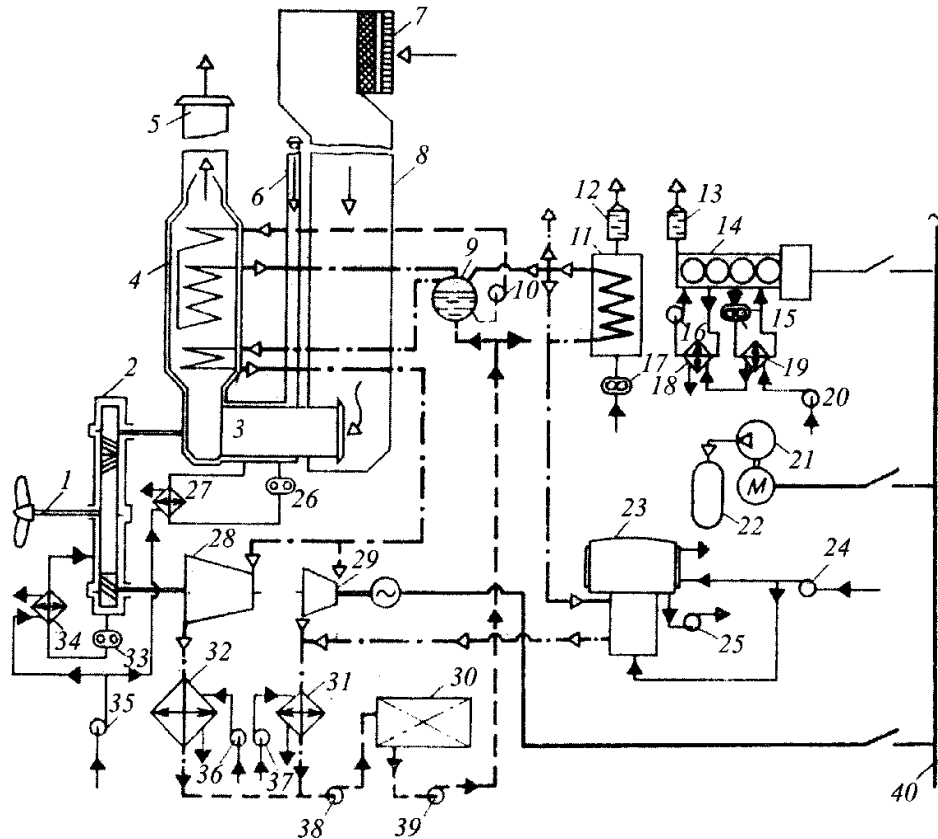


Рисунок 5.3. Принципиальная тепловая схема судовой газопаротурбинной установки:
1 – судовой ВП; 2 – главный редуктор; 3 – ГТД; 4 – УК; 5 – газовыпуск; 6 – подвод воздуха на охлаждение кожухов ГТД и УК; 7, 8 – воздухоприемное устройство и шахта; 9 – сепаратор пара; 10 – циркуляционный насос котловой воды; 11 – ВК; 12 – искрогаситель ВК; 13 – глушитель шума ДГ; 14 – ДГ; 15, 26, 33 – масляные насосы ДГ, ГТД и редуктора; 16 – насос охлаждающей пресной воды ДГ; 17 – топливный насос ВК; 18, 19 – соответственно охладители пресной воды и масла; 20, 35 – насосы охлаждающей забортной воды; 21 – компрессор; 22 – баллон сжатого воздуха; 23 – водоопреснительная установка; 24 – насос забортной воды; 25 – конденсатный насос водоопреснительной установки; 27 – охладитель масла ГТД; 28 – ПТУ; 29 – ТГ; 30 – теплый ящик; 31, 32 – соответственно конденсаторы ТГ и ПТУ; 34 – охладитель масла редуктора; 36, 37 – циркуляционные насосы конденсаторов ПТУ и ТГ; 38 – конденсатный насос; 39 – ПН; 40 – электропитание



Фото 5.1. Проект 1609, шифр «Атлантика», тип Капитан Смирнов [11]

Тип судна: газотурбоход, ролкер (накатное Ro-Ro).

Конструктивный тип: четырехпалубное, с наклонным бульбообразным носом и транцевой кормой, с МО и надстройкой, смещенными в корму, с кормовой 3-секционной угловой рампой, с двойным бортом на всем протяжении грузовых отсеков и вторым дном, двухвинтовое, с двумя подруливающими устройствами.

Назначение: перевозка генеральных грузов в большегрузных пакетах на ролтрейлерах (поддонах) и без них, а также в контейнерах; колесной техники и автомобилей с топливом в баках; контейнеров (в т.ч. рефрижераторных); опасных и взрывоопасных грузов.

Район плавания: неограниченный.

Дальность плавания: 16000 - 20000 миль.

Экипаж и обслуживающий персонал: 55 чел. (запасных мест – 8).

Валовая вместимость: 14345 рег. Т.

Дедвейт: 20075 т.

Контейнерная вместимость: 1230 TEU.

Длина: 227,34 м.

Ширина: 30,00 м.

Высота борта: 11,3/21,0 м.

Осадка: 9,87 м.

Тип ГД: два газотурбинных агрегата "М25" (бортовые каждый на свой винт).

Мощность ГД: 2 х 25000 л.с. (18400 кВт).

Скорость: 25,0/26,7 уз.

3 горизонтальных грузовых отсека общей вместимостью 54313 куб. м.

Груз располагался на 4-х палубах и на втором дне.

14 бортовых автопогрузчиков производства фирмы "Валмет" (Финляндия).

Стационарные внутренние аппарели с наклоном 7 град. для перемещения автопогрузчиков в грузовых отсеках с одной палубы на другую.



USNS LCPL ROY M. WHEAT - удивительно изящный корабль [11]

После развала СССР все четыре ролкера достались Украине и были приватизированы. Не зная как распорядиться честно нажитым имуществом, их владельцы продали четыре огромных красавца фирмам Global Container Lines и Marianna Shipbuilding Ltd. В 2001 - 2002 годах три из них оказались на свалке металлолома в Индии. Оставшийся «Владимир Васляев» пополнил ряды ВМС США.

Американцы провели коренную модернизацию корабля: корпус корабля разобрали и удлиннили, вставив дополнительную секцию. Полное водоизмещение ролкера увеличилось до 50 тысяч тонн. Была заменена судовая электростанция – американское оборудование рассчитано на частоту тока 60 Гц. В остальном конструкция ролкера не изменилась – его уникальная силовая установка осталась прежней. Даже с увеличенным в 1,5 раза водоизмещением USNS LCPL ROY M. WHEAT сейчас способен развивать 20 узлов. С внедрением большей автоматизации экипаж ролкера уменьшился до 29 человек.

Благодаря своим уникальным характеристикам бывший советский корабль был отобран среди других 30 кораблей в группу сил быстрого реагирования – элитное подразделение Командования морских перевозок.

Таким образом, схема уникальная силовой установки считается чрезвычайно эффективной и используется при проектировании современных судов.

Содержание отчета

Отчет должен содержать краткое описание тепловой схемы, компоновки, характеристик газопаротурбинной установки предложенной для рассмотрения, сравнение этой схемы с другими ранее рассмотренными с учетом эксплуатационных и конструктивных особенностей каждой.

Контрольные вопросы:

1. Основные элементы структурной схемы энергетической оснащённости газотурбохода типа «Капитан Смирнов»
2. Назначение элементов принципиальной тепловой схемы

газопаротурбинной установки газотурбохода типа «Капитан Смирнов».

3. Компоновка и характеристики пропульсивной газотурбинной установки газотурбохода типа «Капитан Смирнов».

4. Характеристики газопаротурбинного агрегата (ГПТА) М25.

5. Назначение и состав теплоутилизационного контура газопаротурбинного агрегата (ГПТА) М25.

6. Проведите сравнение схемы газопаротурбинной установки газотурбохода типа «Капитан Смирнов» с иными схемами с учетом эксплуатационных и конструктивных особенностей каждой.

Практическое занятие № 6

ОТКАЗЫ И ПОВРЕЖДЕНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Целью практического занятия является формирования умения выполнять безопасные и аварийные процедуры эксплуатации механизмов двигательной установки, включая системы управления, осуществлять подготовку, эксплуатацию, обнаружение неисправностей и меры, необходимые для предотвращения причинения повреждений ГТУ, идентифицировать ситуации, требующие применения аварийной процедуры эксплуатации двигательной установки.

В процессе эксплуатации газотурбинных установок возникают следующие отказы и повреждения:

- обрыв рабочих лопаток компрессоров и турбин;
- трещины в направляющих и спрямляющих аппаратах компрессоров;
- повреждения проточных частей компрессоров и турбин из-за попадания в них твердых предметов;
- обгорание направляющих и рабочих лопаток турбин;
- обрыв крепежа;
- трещины в дисках, диафрагмах и сопловых аппаратах турбин;
- деформации, трещины и прогорание камер сгорания и жаровых труб;
- неисправности рабочих и пусковых топливных форсунок;
- неисправности топливо-регулирующей аппаратуры;
- неисправности подшипников;
- неисправности контрольно-измерительной аппаратуры и систем управления.

Из всех деталей ГТД рабочие лопатки турбин работают в наиболее тяжелых условиях. Испытывая значительные механические нагрузки от действий центробежных и газовых сил, а также вибрации, они одновременно подвержены воздействию высоких температур агрессивных коррозионных сред. Кроме того, рабочие лопатки подвергаются действию циклических термических напряжений. Опыт эксплуатации показывает, что последние являются основной причиной разрушения лопаток газовых турбин. Окислительная среда дополнительно увеличивает скорость образования и развития трещин. В судовых ГТД имеет место высокотемпературная «натриево-ванадиевая» коррозия лопаточного аппарата и других узлов турбин.

Лопаточный аппарат. Обрыв рабочих лопаток компрессора или турбины относится к наиболее тяжелым видам повреждения ГТД.

Основной причиной обрыва лопаток компрессора является снижение усталостной прочности материала в результате коррозии или эрозии при высоких напряжениях, вследствие динамических и вибрационных нагрузок. Эти нагрузки могут возрастать в случаях работы компрессора в зоне неустойчивой работы, иногда этому способствуют конструктивные и технологические дефекты (рост вибрационных напряжений вследствие неравномерностей в потоке воздуха, недостаточная отстройка лопаток по частоте, некачественное изготовление лопаток).

Начало усталостного разрушения металла лопатки носит местный характер и связано с образованием микротрещин, которые при циклических нагрузках, развиваются в макротрещины. Развитие усталостных трещин начинается, как правило, с входных кромок лопаток и реже - с выходных. Часто источниками образования трещин являются участки коррозионно-эрозионных поражений.

Обрыв лопаток на работающем ГТД приводит к снижению частот вращения турбокомпрессорных блоков и турбин и повышению температуры газов перед турбиной выше допустимой для данного режима, появлению повышенной вибрации, резкому изменению шума работы. В момент обрыва лопатки турбины или компрессора ясно различим сильный удар. **Частичное разрушение лопаток может вызвать помпаж** и появление характерных для него признаков. При попадании траектории разрушившейся лопатки в зазор между торцами лопаток и корпусом происходит заклинивание или торможение ротора. В результате снижения частоты вращения увеличивается подача топлива в камеру сгорания, что приводит к срыву пламени и выключению ГТД.

При обрыве рабочей лопатки турбины, снижения частоты вращения в начальный момент может не происходить. Дальнейшая работа ГТД зависит от последствий, которые вызывает обрыв лопатки. Обычно оборвавшаяся часть разрушенной лопатки, попадая в зазор между корпусом турбины и торцами следующих по потоку лопаток, вызывает изгиб этих лопаток и выпучивание корпуса турбины или разрушение металлокерамических вставок. Кусок лопатки, имея осевую, составляющую скорости движения в направлении выходного устройства, производит аналогичные деформации лопаток последующих ступеней. Если двигатель продолжает работать, то из-за снижения частоты вращения происходит увеличение подачи топлива и рост температуры, газов перед турбиной. При значительном падении частоты вращения и соответствующем увеличении подачи топлива происходит срыв пламени и остановка ГТД. Если оторвавшаяся лопатка вызывает заклинивание ротора, то это также приводит к отключению ГТД. Оторвавшаяся лопатка может пробить корпус и вызвать разрушение элементов силовой установки.

Иногда наблюдаются повреждения лопаточного аппарата компрессоров и турбин, связанные с попаданием в их проточные части твердых посторонних частиц и предметов: песка; кусочков защитной металлической сетки или обломков воздухоприёмных жалюзи; деталей крепления внутренней арматуры воздухозаборных шахт; крепежа узлов камер сгорания и др. Например, разрушения лопаточного аппарата компрессора были вызваны засасыванием оторвавшихся стержней заклепок двери, обеспечивающей доступ во впускную камеру. Другой пример: причиной повреждения компрессора явился карманный фонарик, забытый механиком при осмотре воздухозаборной шахты.

Из приведенных примеров видно, что засасывание посторонних предметов представляет особую опасность для ГТД. Всасывание небольших по размеру частиц и предметов может не приводить к катастрофическому разрушению проточных частей ГТД, однако вызывают образование на лопатках забоин и вмятин, способствующих ускорению процессов, вызывающих разрушения лопаточных аппаратов.

В эксплуатации отмечаются случаи оплавления (обгорания) и значительного перегрева рабочих и сопловых лопаток. Это происходит в результате нарушений в работе топливо-регулирующей аппаратуры, отказов тепловой защиты, возникновения помпажа ГТД. Наиболее опасным является помпаж при пусках и на режимах работы, соответствующим средней мощности. В этих случаях помпаж происходит без сильных звуковых эффектов, а при невнимательности обслуживающего персонала или нарушениях в системе контроля за температурами газов или отказе тепловой защиты он может пройти незамеченным и привести к обгоранию лопаток. **Опыт эксплуатации показывает, что при помпаже, вследствие интенсивного роста температуры газов в течение 20...30 секунд обгорают все лопатки.** Обычно рабочие лопатки обгорают на половину длины в верхней части. Как правило, наибольшим повреждениям подвержены лопатки первой ступени турбины высокого давления.

Температура в лопатках повышается во время работы на переменных режимах и при маневрировании установки, когда возможны колебания температуры газа, подаваемого в проточную часть ГТД.

Циклические, температурные нагрузки приводят к повреждениям лопаток, выражающимся в короблении и растрескивании их кромок и снижения длительной прочности материала. При больших механических нагрузках эти начальные трещины могут послужить очагами разрушения лопатки.

Камеры сгорания относятся к сложным и высоконапряженным в тепловом отношении деталям газотурбинных двигателей.

Наиболее часто встречаются следующие повреждения камер сгорания:

- коробление и прогар жаровых труб;
- образования трещин в жаровых трубах и других деталях;
- различные неисправности топливных форсунок.

Прогар жаровых труб – наиболее тяжелое повреждение, требующее их замены.

Основными эксплуатационными причинами образования трещин и прогара жаровых труб камер сгорания являются:

- изменение температурного режима работы жаровых труб, приводящие к местным перегревам, вследствие влияния отложений и нагаров, образующихся на поверхности жаровых труб, влияющих на аэродинамику охлаждения, а также искажения факела при закоксовании форсунок;
- большое число теплосмен и значительные градиенты температуры, определяемые количеством и режимом пуска;
- повышенный износ поверхностей контакта элементов жаровых труб с фиксаторами, пламене-перебрасывающими патрубками и сопловым аппаратом ТВД вследствие вибрации жаровых труб из-за пульсации давления в камере сгорания.

Неправильная организация процесса горения в камере сгорания приводит к деформации полей температур и давлений газового потока перед турбиной.

К наиболее часто встречающимся неисправностям и повреждениям топливных форсунок следует отнести:

- засорение сопловых отверстий и фильтров форсунок;
- образование нагара;
- негерметичность топливной системы;
- увеличенная производительность при разработке сопел;
- разрушения отдельных деталей.

Засорение форсунок происходит вследствие использования загрязненного топлива. Засорение топливных форсунок нарушает распыливание топлива и способствует искажению факела, в результате образуется нагар на стенках жаровой трубы.

При появлении неисправности топливной форсунки дальнейшая эксплуатация газотурбинного двигателя приводит к аварии с тяжелыми последствиями, например, пожару соплового аппарата ГТД.

В газотурбинных установках применяются подшипники качения (роликовые и шариковые) и скольжения.

Возможные причины нарушения нормальной работы и повреждений подшипников скольжения следующие:

- нарушения режима смазки;
- попадание в подшипник вместе со смазкой посторонних твердых частиц;
- воздействие вибрационных нагрузок;
- дефекты заливки белого металла;
- неудовлетворительная подгонка вкладышей и упорных подушек.

Эти повреждения характерны для подшипников не только газотурбинных двигателей, но и их редукторов.

Существенное влияние на работоспособность подшипников ГТУ оказывает вибрационные нагрузки при эксплуатации, которые могут привести к наклепу и выкрашиванию белого металла.

Подшипники качения судовых ГТУ подвержены коррозионному воздействию. Коррозионное повреждение подшипников – весьма распространенный дефект проявляющийся в образовании поверхностных налетов и раковин. Коррозионные повреждения снижают контактную выносливость и ухудшают вращения подшипников.

Характерным повреждением подшипника является трещина на его наружном кольце. В результате перегрева подшипника на рабочей поверхности наружного кольца отмечается сильное оплавление и налипание расплавленного металла роликов

В таблице 6.1. показаны основные поломки (неисправности) ГТЭУ, приводящие к аварийным происшествиям.

Анализ выполнен в удобной для изучения и для практической отработки действий судового механика форме (Неисправность Признаки Причины Предпосылки Последствия Мероприятия по предотвращению) и позволяет на основе понимания сути физических явлений, происходящих внутри работающей турбины добиться главного – предотвратить аварию.

Таблица 6.1

Основные поломки (неисправности) ГТЭУ, приводящие к аварийным происшествиям

Неисправность	Признаки	Причины	Предпосылки	Последствия	Мероприятия по предотвращению
Лопатки					
Обрыв рабочих лопаток компрессора	Вибрация и шум. Изменение частоты вращения турбины	Нарушение аэродинамики потока воздуха. Резкие вибрационные нагрузки. Производственные дефекты	Механические усталостные или технологические трещины. Коррозионные повреждения. Загрязнение, засоление поверхностей лопаток. Обрыв защитных сеток, обледенение ВУ	Повреждение элементов проточной части компрессора после ступени с поврежденной лопаткой. Изменение нагрузки на подшипник	Не допускать загрязнения, засоления проточной части ГТД, обледенения и засорения ВУ, искажения конфигурации, приемных шахт, вибрации двигателя. Тщательно осматривать проточную часть при ТО
Обрыв рабочих лопаток турбины	Вибрация и шум. Изменение частоты вращения и температуры газа за турбиной	Нарушение аэродинамики и тепловых режимов потока газа. Резкие вибрационные нагрузки. Технологические пороки изготовления	Механические усталостные, тепловые или технологические трещины. Коррозионно-эрозионные повреждения. Загрязнение, засоление поверхностей лопаток	Повреждение элементов проточной части турбин после ступени с поврежденной лопаткой. Изменение нагрузки на подшипники	Не допускать загрязнения, засоления проточной части, резких изменений температур газа, вибрации двигателя, нарушений процесса пуска, попадания посторонних предметов. Тщательно осматривать проточную часть при ТО
Пожог рабочих лопаток турбины	Изменение частоты вращения ротора и температуры газа за турбиной. Вибрация и шум. Возможен выброс пламени из выходного устройства	Нарушение тепловых режимов потока газа	Нарушение процесса пуска. Некондиционное топливо. Резкие циклические тепло-смены, особенно при пусках и остановках. Общие и локальные процессы газовой коррозии и эрозии. Отложения в каналах охлаждаемых лопаток. Нарушение технологии изготовления. Ухудшение качества распыла топлива рабочими форсунками	Повреждения элементов проточной части и корпуса турбины. Изменение нагрузки на подшипники	Не допускать резких пусков остановок двигателя. Своевременно и качественно проверять топливную аппаратуру и устанавливать ее строго по комплектам. Перед пуском проверять работу свечей зажигания. Использовать только кондиционное топливо. Не допускать загрязнения приемных устройств. Не превышать давления топлива при пуске, установленного ИЭ. Перед каждой нормальной остановкой ГТД проверять, давление топлива перед форсунками на контрольной частоте вращения КВД
Выпучивание охлаждаемых сопловых лопаток	Нехарактерные. Возможно изменение температуры газа за турбиной	Нарушение тепловых режимов потока газа	Резкие циклические теплосмены. Нарушение работы топливной аппаратуры. Общие и локальные процессы газовой	Нарушение аэродинамики потока	Использовать только кондиционное топливо. Исключить резкие циклические теплосмены, нарушение работы

			коррозии. Отложения во внутренней полости охлаждаемой лопатки. Некондиционное топливо. Нарушение технологии изготовления. Ухудшение качества распыла топлива рабочими форсунками		топливной аппаратуры. Тщательно осматривать проточную часть при проведении ТО
Трещины лопаток	Возможны вибрация и шум	Многократное изменение или силовых или тепловых воздействий, что приводит к снижению усталостной прочности материала лопаток и образованию и развитию трещин	Повышенное остаточное напряжение, обусловленное нарушениями технологии изготовления. Коррозионно-эрозионные процессы	При значительных нагрузках возможен обрыв лопатки	Не допускать нарушения аэродинамики потока, вибрации двигателя, резких тепловых смен. Исключить работу на грязном обводненном топливе. Не допускать нарушений работы системы автоматического пуска. Тщательно осматривать проточную часть при ТО
Коррозионно-эрозионное повреждение лопаток	Изменение частоты вращения ротора и температуры за турбиной	Агрессивное действие рабочей среды на материал лопаток турбомашин	Нарушение защитных покрытий материала лопаток. Концентрация агрессивных веществ и твердых частичек солей и несгоревшего топлива. Напряженное состояние материала лопаток, качество изготовления. Температура рабочей среды, некондиционное топливо	Снижение прочностного состояния лопаток. Уточнение профиля лопаток	Использовать только кондиционное топливо. Содержать в чистоте приемные шахты и проточные части турбомашин. Тщательно осматривать проточную часть при ТО
Забоины на лопатках	Вибрация и шум. Возможно изменение температуры рабочего тела	Попадание посторонних предметов в проточную часть, обрыв элементов проточной части	Оставление в проточной части или в шахтах посторонних предметов. Нарушение целостности защитных сеток и изоляции на ВУ	Воздействие на все элементы проточной части	Не допускать наличия в проточной части посторонних предметов. Содержать в исправном состоянии приемные шахты и ВУ. Тщательно осматривать приемные шахты, ВУ и проточную часть при проведении ТО
Диски, роторы, корпус					
Разрыв диска турбины	Вибрация, шум, стук, удары. Разрушение корпуса турбины	Действие центробежных сил на ослабленное сечение диска	Усталостные механические, тепловые или технологические	Разрушение корпуса и ротора турбины. Пожар в	Тщательный осмотр полотна диска при ремонтах на наличие трещин,

			трещины. Коррозионно-эрозионные повреждения. Превышение предельно допустимой частоты вращения	машинном отделении. Возможны пробои подволока и днища	особенно в районах разгрузочных отверстий. Содержание проточных частей в чистоте и в исправном состоянии муфт сцепления. Систематический контроль исправности системы ОРТВ
Вибрация ротора	Вибрация шум	Увеличенная динамическая неуравновешенность ротора. Разрушение подшипников	Повреждение проточной части. Засоление или загрязнение проточной части	Возможно разрушение лопаток, лабиринтных уплотнений, подшипников, корпуса турбомашин	Содержать в чистоте проточную часть турбомашин. При проведении ТО тщательно осматривать все элементы турбомашин. При ремонте обязательно делать статическую и динамическую балансировку ротора
Деформация корпуса турбомашин	Изменение температуры и давления рабочего тела, выход рабочего тела по разъемам	Неравномерность температуры рабочего тела по окружности	Некачественная работа КС. Коксование форсунок. Засоление и загрязнение проточной части	Повреждение лопаток турбомашин, лабиринтных уплотнений, датчиков	Обеспечить качественную работу КС. Использовать только кондиционное топливо. Своевременно и качественно промывать двигатель
Камеры сгорания					
Прогар и коробление жаровых труб	Вибрация и шум. Изменение температуры газа за турбиной	Нарушение горения топлива и равномерного смешения газов с вторичным воздухом. Нарушение технологии изготовления. Местный перегрев из-за недостаточного охлаждения	Одиночные и групповые трещины. Неправильная установка форсунок. Засорение форсунок и отверстий подвода воздуха. Образование нагара. Разработка проходных сечений форсунок	Повреждение лопаток ротора и корпуса турбины	Использовать только кондиционное топливо. Своевременно и качественно промывать двигатель. Тщательно осматривать поверхность жаровых труб при ТО. Своевременно проверять топливную аппаратуру. При пуске строго контролировать работу системы автоматического пуска
Загрязнение. Закоксование топливных форсунок и завихрителей	Изменение температуры газа за турбиной	Некондиционное топливо. Конструктивный недостаток форсунок	Засорение топливных фильтров. Нагар, негерметичность форсунок	Прогар жаровых труб, обгорание лопаток, коробление корпуса турбины	Использовать только кондиционное топливо. Не превышать давления топлива при пуске, установленного ИЭ. Перед каждой нормальной остановкой ГТД проверять давление топлива перед форсунками на контрольной частоте вращения КВД
Подшипники					
Выплавление белого металла в подшипниках	Вибрация и шум. Изменение температуры масла.	Повышение температуры подшипника. Нарушение	Масляное голодание. Наличие в масле значитель-	Повреждение лопаток, лабиринтных	Исключить подачу некондиционного масла. Обеспечить

скольжения	Стружка в масле	технологии изготовления	ного количества абразивных веществ и воды	уплотнений, корпуса и ротора	подачу масла с параметрами, предусмотренными ИЭ
Коррозионно-эрозионный износ подшипников	Вибрация и шум	Некондиционная смазка. Нарушение режима длительного хранения	Некачественная очистка масла. Слабый контроль за качеством масла.	Повреждения беговых дорожек и тел качения	Обеспечить подачу кондиционного масла
Выкрашивание металла на внутреннем кольце подшипника	Вибрация и шум. Частицы металла на магнитных пробках. Срабатывание сигнализатора стружки -	Вибрация ротора	Нарушения режимов смазки. Пороки изготовления	Повреждение беговых дорожек и тел качения	Не допускать вибрацию ротора и соблюдать режим смазки подшипников
Оплавление беговых дорожек и тел качения в подшипниках качения	Вибрация и шум. Изменение параметров масла. Стружка в масле	Повышение температуры подшипника	Недостаточная подача масла из-за засорения фильтров, жиклеров и выхода из строя элементов масляной системы. Некондиционное масло	Повреждение лопаток, лабиринтных уплотнений	Исключить подачу некондиционного масла. Обеспечить подачу масла с параметрами, предусмотренными ИЭ
Зубчатые передачи					
Усталостное выкрашивание поверхности зубьев	Шум. Возможно появление стружки в масле	Неполный контакт. Резкое изменение нагрузки. Искривление профиля зуба. Работа редуктора в запретной зоне при несоответствии мощности ГТД частоте вращения гребного вала	Усталостные трещины. Обильная смазка (выше нормы). Коррозия	Снижение прочности зубьев и нагрузочной способности зубчатого зацепления	Не допускать обильной смазки. Исключать резкие изменения нагрузки
Излом зубьев	Стук, шум, вибрация	Резкие изменения нагрузки, перегрузки. Длительная вибрация элементов зубчатой передачи. Нарушение технологии изготовления	Усталостные трещины, выкрашивание, коррозия, износ зубьев	Выход из строя зубчатой передачи	Исключение вибрации и резких изменений нагрузок и перегрузок. При проведении ТО тщательно осматривать зубчатые зацепления для выявления трещин в выкрашивания поверхности зубьев
Износ зубьев	Вибрация и шум	Наличие в масле абразивных веществ	Некачественная очистка масла. Недостаток или избыток масла	Нарушение контакта зубьев. Усталостное выкрашивание	Использовать только кондиционное масло. Обеспечить подачу его с параметрами, предусмотренными ИЭ
Наволакивание металла на поверхности зубьев	Изменение температуры масла	Разрыв масляной пленки	Некачественное масло. Недостаточное количество масла	Возможно заедание зубчатого зацепления	Использовать только кондиционное масло. Усилить контроль за температурой масла на больших скоростях корабля к нагрузкам ГТД

Топливная аппаратура					
Засорение фильтров, регуляторов и форсунок	Повышение давления топлива перед форсунками	Наличие в топливе механических примесей, отложения на внутренних поверхностях полостей насоса	Некондиционное топливо	Повышенный износ топливной аппаратуры. Невозможность АЗ ГТД	Исключить подачу некондиционного топлива. Соблюдать правила эксплуатации расходных цистерн
Выработка и повреждение плунжеров НР	Снижение давления топлива перед форсунками, уменьшение частоты вращения ТК	Наличие в топливе механических примесей, отложения на внутренних поверхностях полостей насоса	Некондиционное топливо	Снижение мощности двигателя или его остановка	Исключить использование некондиционного топлива. Тщательно выполнять мероприятия ТО топливной системы согласно ИЭ
Вымывание материала стенок, каналов, жиклеров, затупление отсечных кромок золотников	Шум. Изменение давления топлива на выходе из насоса	Наличие в топливе механических примесей, продуктов коррозии, кавитация	Некондиционное топливо	Повышенный износ топливной аппаратуры. Снижение качества работы камеры сгорания. Невозможность АЗ ГТД	Исключить использование некондиционного топлива. Систематически проводить ультразвуковую чистку фильтров
Поражение наклонной шайбы топливного НР	Изменение давления топлива. Снижение частоты вращения ТК	Износ в результате коррозии плунжеров и подпятников плунжеров	Некондиционное топливо	Заедание сопряженных деталей. Увеличение протечек топлива	Использовать кондиционное топливо
Заклинивание плунжеров и разрушение пружин НР	Остановка двигателя	Коррозия деталей НР	Некондиционное топливо. Повышенный износ трущихся деталей. Отложения на внутренних поверхностях ротора	Невозможность пуска двигателя. Увеличенные протечки топлива	Использовать кондиционное топливо

Содержание отчета

Отчет должен содержать краткое описание действий по обнаружению неисправностей и принятию мер, необходимых для предотвращения причинения повреждений ГТУ, идентификации ситуации, требующей применения аварийной процедуры эксплуатации двигательной установки по вводным и по заданиям руководителя практического занятия.

Контрольные вопросы:

1. Какие отказы и повреждения могут возникать в процессе эксплуатации газотурбинных установок?
2. Что относится к наиболее тяжелым видам повреждения ГТД?
3. Признаки, причины, предпосылки, последствия, мероприятия по предотвращению повреждений лопаток компрессора или турбины.
4. Основные причины пожара рабочих лопаток турбины?
5. Признаки, причины, предпосылки, последствия, мероприятия по предотвращению повреждений дисков, ротора, корпуса турбомашин?

6. Признаки, причины, предпосылки, последствия, мероприятия по предотвращению повреждений камер сгорания?

7. Признаки, причины, предпосылки, последствия, мероприятия по предотвращению повреждений подшипников?

8. Признаки, причины, предпосылки, последствия, мероприятия по предотвращению повреждений зубчатых передач?

9. Признаки, причины, предпосылки, последствия, мероприятия по предотвращению повреждений топливной аппаратуры?

10. К каким последствиям может привести использование некондиционного топлива или масла?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемов Г. А. Судовые газотурбинные установки / Г. А. Артемов, В. П. Бойков, А. Г. Гильмутдинов. - Л. : Судостроение, 1978. - 246 с. – Текст: непосредственный.
2. Слободянюк Л. И. Судовые паровые и газовые турбины и их эксплуатация / Л. И. Слободянюк, В. И. Поляков. - Л. : Судостроение, 1983. - 354 с. – Текст: непосредственный.
3. Слободянюк Л. И. Проектирование судовых газотурбинных двигателей / Л. И. Слободянюк. - КЕ. : Институт содержания и методов обучения, 1996. - 166 с. – Текст: непосредственный.
4. Правила технической эксплуатации судовых технических средств и конструкций. Часть IV. Судовые паровые турбоагрегаты : РД 31.21.30-97 : нормативный документ : введен 01.07.1997. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293809/4293809273.htm> (дата обращения: 06.04.2026). – Текст : электронный.
5. Альбом схем и характеристик паротурбинных установок специализированных судов : методические указания к проведению практических занятий / сост.: В. Н. Литошенко, Г. Б. Лыкова. – Севастополь : СевНТУ, 2008. - 20 с. – Текст: непосредственный.
6. Наставление по борьбе за живучесть судов Министерства морского флота Союза ССР НБЖС : РД 31.60.14-81 : введен 01.01.1984. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4294815/4294815869.htm> (дата обращения: 06.04.2026). – Текст : электронный.
7. Устав службы на морских судах : утв. приказом Министерства транспорта РФ от 4 июня 2018 г. № 224. – URL: <https://minjust.consultant.ru/files/40325> (дата обращения: 06.04.2026). – Текст : электронный.
8. Королёв В. И. Теплорасходная диаграмма пара и конденсата для анализа режимов использования теплофикационных паротурбинных установок / В. И. Королёв. - Текст : непосредственный // Вестник ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 2018. - № 5. - С. 1025 - 1039.
9. Горбов В. М. Энциклопедия судовой энергетики : учебник / В. М. Горбов, В. П. Кот. – Николаев : НУК, 2013. – 607 с. – Текст: непосредственный.
10. Судовые энергетические установки / Г. А. Артемов, В. П. Волошин, Ю. В. Захаров, А. Я. Шквар. – Л. : Судостроение, 1987. – 480 с. – Текст: непосредственный.
11. Капцов О. Советский корабль в составе сил быстрого реагирования ВМС США / О. Капцов – Текст : электронный // Военное обозрение : [сайт]. – URL: <https://topwar.ru/18367-sovetskiy-korabl-v-sostave-sil-bystrogo-reagirovaniya-vms-ssha.html>. – Дата публикации : 01.09.2012.
12. Что представляет машинное отделение на ПЭБ «Академик Ломоносов». – Текст : электронный // Дзен : [сайт]. – URL:

[https://dzen.yandex.ru/media/zavodfoto/cto-predstavliaet-mashinnoe-otdelenie-na-
peb-akademik-lomonosov-5d5e3a894e057700ad5e6fe0](https://dzen.yandex.ru/media/zavodfoto/cto-predstavliaet-mashinnoe-otdelenie-na-
peb-akademik-lomonosov-5d5e3a894e057700ad5e6fe0).

13. Универсальные атомные ледоколы проекта 22220 «Арктика», «Сибирь», «Урал». – Текст : электронный // Акционерное общество «Объединенная судостроительная корпорация» : [сайт]. – URL: <https://www.aosk.ru/products/civil/universalnyy-atomnyy-ledokol-proekta-22220-arktika> (дата обращения: 06.04.2026).

Учебное издание

**Гаршин Александр Юрьевич
Тверская Светлана Евгеньевна**

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ
СУДОВЫХ ТУРБИННЫХ УСТАНОВОК**

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Изд. № 26/2026. Объем 3,5 п. л. Усл. печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 3,43.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»