МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

В. М. ГОРБОВ

ІСТОРІЯ СТВОРЕННЯ ТА РОЗВИТКУ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Навчальний посібник

Рекомендовано Вченою радою НУК

ВИДАВНИЦТВО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМ. АДМІРАЛА МАКАРОВА
2026

УДК 629.5.03(076)
Г67

Автор
В. М. Горбов, канд. техн. наук, проф., зав. кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики НУК імені адмірала Макарова

Рецензенти:
С. І. Сербін, д-р техн. наук, професор кафедри турбін НУК імені адмірала Макарова;
Р. А. Варбанець, д-р техн. наук, завідувач кафедри суднових енергетичних установок і технічної експлуатації Одеського національного морського університету;
Б. В. Димо, канд. техн. наук, професор, завідувач кафедри технічної теплофізики та суднових паровиробних установок НУК імені адмірала Макарова

Рекомендовано Вченою радою НУК ім. адмірала Макарова
як навчальний посібник
(*протокол № 07 від 30.06.2023 р.*)

Горбов В. М.
Г67 Історія створення та розвитку суднових енергетичних установок : навчальний посібник / В. М. Горбов. – Миколаїв : НУК, 2026. – 556 с.

ISBN 978-966-321-513-6
DOI

У посібнику розглянута історія виникнення, розвитку та становлення суднових рушійних комплексів, сучасний стан та перспективи розвитку суднової енергетики. Наведена інформація щодо комплектування енергетичних установок сучасних суден різних типів, детально висвітлені питання, пов'язані з впливом типу судна на склад та параметри енергетичного обладнання.

Призначено для студентів, що навчаються за спеціальностями 271 (J5) «Морський та внутрішній водний транспорт» освітньої програми «Управління судновими технічними системами і комплексами», 135 (G11.04) «Суднобудування» освітньої програми «Суднові енергетичні установки та устаткування», «Експлуатація суднових енергетичних установок», які вивчають дисципліни «Суднові енергетичні установки», «Проєктування СЕУ», «Суднові котли та атомні реактори», «Технічна експлуатація СЕУ», «Проєктування ГТУ», «Газові турбіни та газотурбінні установки», «Суднові дизельні установки й системи та їх експлуатація», «Технічне обслуговування та ремонт суднових технічних засобів».

Посібник може бути корисним також курсантам морських навчальних закладів під час вивчення питань загальної будови та експлуатації суднових енергетичних установок, фахівцям морського транспорту, що підвищують свою кваліфікацію.

УДК 629.5.03(076)

© В. М. Горбов, 2026
© Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, 2026

ISBN 978-966-321-513-6

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА....6
СПИСОК СКОРОЧЕНЬ....7
ЧАСТИНА І. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СУДНОВІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ....10
ГЛАВА 1. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА СКЛАД СЕУ....10
1.1. Суднові енергетичні установки: визначення та терміни....10
1.2. Класифікація СЕУ....14
1.3. Вплив типу судна на склад суднової енергетичної установки....21
Контрольні питання та завдання....59
ГЛАВА 2. ПЕРЕТВОРЕННЯ І ПЕРЕДАЧА ЕНЕРГІЇ В СЕУ....61
2.1. Потоки енергії в суднових енергетичних установках....61
2.2. Судновий валопровід....72
2.3. Передачі суднових енергетичних установок....76
Контрольні питання та завдання....92
ЧАСТИНА ІІ. ОСНОВНІ ЕТАПИ СТВОРЕННЯ ТА РОЗВИТКУ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК....95
ГЛАВА 1. ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ РУХУ СУДЕН ТЕЧІЙ РІЧОК ТА МОРІВ, МУСКУЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ ЛЮДЕЙ І СВІЙСЬКИХ ТВАРИН, ЕНЕРГІЇ ВІТРУ ТА СОНЦЯ....95
1.1. Забезпечення руху суден водною течією та за допомогою мускульної енергії....95
1.2. Вітрова енергія як засіб здійснення руху суден....107
1.3. Сучасні судна-вітроходи....119
Контрольні питання та завдання....150
ГЛАВА 2. ПАРОВІ МАШИНИ – ПЕРШОПРОХІДЦІ ВІКУ ПАРИ....152
2.1. Історичні передумови створення теплових двигунів....152
2.2. Створення перших універсальних двигунів....158
2.3. Розвиток конструкцій суднових парових машин....162
2.4. Перші судна з тепловими двигунами....171
2.5. Від колісних рушіїв до гребних гвинтів....179
Контрольні питання та завдання....186
ГЛАВА 3. СУДНОВІ ПАРОТУРБІННІ УСТАНОВКИ....188
3.1. Парові турбіни: принцип дії, визначення і параметри....188

3.2. Карл Густав Лаваль та Чарльз Парсонс – створювачі суднових парових турбін 192
3.3. Застосування парових турбін на суднах (1900–1940 рр.) 199
3.4. Розвиток теплових схем суднових паросилових та паротурбінних установок 213
3.5. Суднові парові турбоагрегати (1950–1960 рр.) 221
3.6. Паротурбінні агрегати сучасних морських суден 234
Контрольні питання та завдання 248
ГЛАВА 4. ЕВОЛЮЦІЯ СУДНОВИХ ПАРОВИХ КОТЛІВ 251
4.1. Котли суднових ЕУ: принцип дії, визначення, терміни 251
4.2. Загальна будова перших суднових парових котлів 254
4.3. Розвиток вогнетрубних котлів 256
4.4. Створення та розвиток суднових парових водотрубних котлів 261
4.5. Головні суднові парові котли сучасних суден (з другої половини XX ст. по сьогодні) 269
4.6. Допоміжні суднові парові котли 283
4.7. Утилізаційні та комбіновані парові котли. Термомасляні котли 301
4.8. Топкові пристрої суднових парових котлів 317
Контрольні питання та завдання 320
ГЛАВА 5. СУДНОВІ ДИЗЕЛЬНІ УСТАНОВКИ 323
5.1. Довгий шлях від ідеї до створення працездатного дизельного двигуна для судна 323
5.2. Класифікація та маркування суднових дизелів 332
5.3. Принцип дії суднових дизелів. Терміни та визначення 338
5.4. Основні конструктивні елементи, агрегати та системи суднових двигунів внутрішнього згоряння 346
5.5. Загальна будова суднових дизелів 365
5.6. Захист навколишнього середовища під час експлуатації суднових дизельних установок 386
Контрольні питання та завдання 390
ГЛАВА 6. СУДНОВІ ГАЗОТУРБІННІ УСТАНОВКИ 394
6.1. Створення передумов морського застосування газотурбінних двигунів 394
6.2. Принципові та структурні схеми суднових ГТА 406
6.3. Заснування та розвиток суднового газотурбобудування у країнах Заходу та США (50-ті роки XX ст.) 413
6.4. Заснування та становлення суднового й корабельного газотурбобудування на Україні 423

6.5. Зарубіжне суднове газотурбобудування із 60-х рр. XX ст. до сьогодні....437
6.7. Характеристики суднових ГТД провідних виробників....473
Контрольні питання та завдання....475

ГЛАВА 7. ЗАСТОСУВАННЯ АТОМНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК НА СУДНАХ....478
7.1. Виникнення і становлення атомної енергетики....478
7.2. Принцип роботи та загальна будова суднових ЯЕУ....485
7.3. Принципові теплові схеми суднових АЕУ....490
Контрольні питання та завдання....501

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ....503

ДОДАТКИ....506
ДОДАТОК А....506
ДОДАТОК В....544
ДОДАТОК С....551

ПЕРЕДМОВА

Горбов Віктор Михайлович – завідувач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики НУК імені адмірала Макарова.

Кандидат технічних наук, професор, академік Академії наук суднобудування України, академік Академії технологічних наук України, Заслужений працівник освіти України.

Професійна компетентність Віктора Михайловича визнана і за кордоном – дійсний член Англійського Королівського товариства корабельних інженерів, чартерний інженер Морської ради Великобританії, дійсний член Інституту морської техніки, науки і технологій Великобританії.

Наукова робота, трудова діяльність та професійне зростання Віктора Михайловича пов'язані з Миколаївським кораблебудівним інститутом (МКІ): 1963 р. – вступив до інституту, 1969 р. – з відзнакою закінчив МКІ за спеціальністю «Турбінобудування», 1981 р. – захистив кандидатську дисертацію «Дослідження газодинамічних підшипників із самовстановлюваними сегментами для суднових швидкохідних турбомашин», 1983 р. – отримав вчене звання доцента, 1986 р. – за плідну наукову діяльність і високий професіоналізм Вчена рада МКІ обрала В. М. Горбова деканом машинобудівного факультету.

Тридцять років (з 1993 р.) Віктор Михайлович очолював кафедру суднових енергетичних установок (нині кафедра експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики), яка готує щорічно понад 180 фахівців. Після реорганізації МКІ Віктор Михайлович обирається директором Машинобудівного інституту і до 2009 р. обіймає цю посаду.

Серед здобутків – заснування та керівництво науковою школою «Ефективність та екологічність суднових енергетичних установок». На рахунку Віктора Михайловича успішне наукове керівництво та підготовка шести кандидатів технічних наук. У 1994 р., був обраний членом науково-методичної комісії з енергетики МОН України, з 2007 по 2017 рр. був членом НМК МОНУ з транспорту. У 2008 р. обраний академіком Академії наук суднобудування України, з 2005 – академіком Академії технологічних наук України.

У доробку професора В. М. Горбова більше 350 наукових праць. Він автор 30 підручників і навчальних посібників з питань проєктування та експлуатації СЕУ, серед найбільш відомих варто відзначити наступні: «Океан та океанотехніка» (2010 р., монографія, 436 с.); «Альтернативні палива в судновій енергетиці» (2012 р., монографія, 316 с.); «Енциклопедія суднової енергетики» (2010 р., підручник з грифом МОНУ, 624 с.); «Суднова енергетика та Світовий океан» (2007 р., підручник з грифом МОНУ, 596 с.); «Marine Engineering Encyclopedia» (2017 р., підручник, 200 с.); «Alternative Fuels in Ship Power Plants» (2017 р., монографія, 120 с.); «Стандарти компетентності персоналу морських суден та захист його прав» (2021 р., навчальний. посібник); навчальні посібники з грифом МОНУ «Енергетичні палива» (2003 р., 327 с.), «Суднові енергетичні установки» (2002 р., 353 с.), «Суднові установки з газотурбінними двигунами» (1997 р., 233 с.), «Основи технічної експлуатації суднових газотурбінних установок»» (1996 р., 139 с.).

Навчальний посібник «Історія створення та розвитку суднових енергетичних установок» Віктор Михайлович писав під гуркіт канонади і прильоти осколків у вікна квартири, писав самовіддано, натхненно та із задоволенням до останніх кроків свого життя …

Рукопис навчального посібника підготував до видання Бондаренко М. С., канд. техн. наук, доцент кафедри Е СЕУ та ТЕ.

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

АЕУ – атомна енергетична установка
ВВП – вуглеводневе паливо
ВВРТ – водно-водяний реактор під тиском
ВГ – валогенератор
ВМРТ – великий морозильний риболовний траулер
ВМТ – верхня мертва точка
ВОД – високообертовий двигун
ВП – валопровід
ВПГГ – вільнопоршневий генератор газу
ВПЕ – водопаливна емульсія
ВР – водометний рушій
ГГ – гребний гвинт
ГД – головний двигун
ГЕД – гребний електричний двигун
ГЕУ – головна енергетична установка
ГК – головний конденсатор
ГПТУ – газопаротурбінна установка
ГРК – гвинт регульованого кроку
ГРЩ – головний розподільний щит
ГТА – газотурбінний агрегат
ГТД – газотурбінний двигун
ГТЕА – головний турбо-електричний агрегат
ГТЗА – головний турбозубчастий агрегат
ГТН – газотурбонагнітач
ГТУ – газотурбінна установка
ГУП – головний упорний підшипник
ГФК – гвинт фіксованого кроку
ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння
ДГ – дизель-генератор
ДД – допоміжний двигун
ДЕУ – дизельна енергетична установка
ДК – допоміжний котел
ДРА – дизель-редукторний агрегат
ЖН – живильний насос
ЗГ – зріджений газ
КВТ – компресор високого тиску
КЕУ – комбінована енергетична установка
ККД – коефіцієнт корисної дії
КН – конденсатний насос
КНТ – компресор низького тиску
КПК – корабель на підводних крилах
КПП – корабель на повітряній подушці
КР – крильчастий рушій
МВ – машинне відділення
МОД – малообертовий двигун
НДС – науково-дослідницьке судно
НМТ – нижня мертва точка
НПП – носовий підрулюючий пристрій
ПЖВ – підігрівник живильної води
ПК – пропульсивний комплекс
ПНВТ – паливний насос високого тиску
ППП – проміжний перегрів (перегрівник) пари
ПТ – парова турбіна
ПТУ – паротурбінна установка
РВ – рідкий вантаж
СДПП – судно з динамічним принципом підтримання
СЕС – суднова електростанція
СЕУ – суднова енергетична установка

СОД – середньообертовий двигун
СПК – судно на підводних крилах
СПП – судно на повітряній подушці
ТВЕЛ – тепловидільний елемент
ТВТ – турбіна високого тиску
ТГ – турбогенератор
ТЗХ – турбіна заднього ходу
ТНА – турбонаддувний агрегат
ТНТ – турбіна низького тиску
ТРД – турбореактивний двигун
ТСТ – турбіна середнього тиску
ТУК – теплоутилізаційний контур
УК – утилізаційний котел
УПТ – утилізаційна парова турбіна
ФГО – фільтр грубого очищення
ФТО – фільтр тонкого очищення
ЦПК – центральний пост керування
ABS – American Bureau of Shipping – Класифікаційне товариство США
BV – Bureau Veritas – Класифікаційне товариство Франції
Class NK (NK) – Nippon Kaiji Kyokai – Класифікаційне товариство Японії
CNG – Compressefied natural gas – стиснений природний газ
DAT – Double action tanker – танкер подвійної дії з однаковими обрисами носової та кормової частин
DNV – Det Norske Veritas – Класифікаційне товариство Норвегії
ECA – Emission control area – зона контролю емісії шкідливих викидів
EGR – Exhaust gas recirculation – рециркуляція відхідних газів
FPDSO – Floating Production Drilling Storage and Offloading Vessel – судно для переробки, буріння, зберігання і перевантаження нафти та газу
FPSO – Floating Production Storage and Offloading Vessel – судно для переробки, зберігання і перевантаження нафти та газу
FSO – Floating Storage and Offloading Vessel – судно для зберігання і перевантаження нафти та газу
GE – General Electric – енергетичний концерн США
GL – Germanysher Lloyd – Класифікаційне товариство Німеччини
HAM – Humid air motor – зволоження наддувного повітря
HFO – Heavy fuel oil – важке паливо
HSC – High speed craft – високошвидкісне судно
HSF – High sulphur heavy fuel oil – високосірчисте важке паливо
IFO – Intermediate fuel oil – паливо середньої в'язкості
IMO – International Marine Organization – Міжнародна морська організація
KHI – Kawasaki Heavy Industries – компанія, що виробляє паротурбінні агрегати (Японія)
LEE – Low emission engine – низькоемісійний двигун
LNG – Liquefied natural gas – зріджений природний газ
LPG – Liquefied petroleum gas – зріджений нафтовий газ
LR – Lloyds Register of Shipping – Класифікаційне товариство Англії
LSF – Low sulphur fuel – низькосірчисте паливо

MEPC – Marine Environment Protection Committee – Комітет із захисту морського довкілля IMO

MGO – Marine gasoil – морський газойль

MHI – Mitsubishi Heavy Industries – компанія, що виробляє МОД (Японія)

OSV – Offshore supply vessel – офшорне судно забезпечення

PSV – Platform supply vessel – судно забезпечення бурових платформ

RINa – Registro Italiano Navali – Класифікаційне товариство Італії

RR – Rolls-Royce – компанія, що виготовляє ГТД та рушії (Англія)

SCR – Selective catalytic reduction – селективне каталітичне очищення відхідних газів теплових двигунів

SECA – Sulphur emission control area – зона контролю емісії сірки

TCA – Turbocharge axial – турбонагнітач з осьовою турбіною

TCR – Turbocharge radial – турбонагнітач з радіальною турбіною

TCS – Turbocompound system – турбокомпаундна система

TES – Thermo efficiently system – термоефективна система

VTA – Variable turbine area – змінювана площа турбіни турбонагнітача

WFE – Water fuel emulsion – водопаливна емульсія

WHR – Waste heat recovery – утилізація втрат теплоти

ЧАСТИНА І
ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СУДНОВІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ

ГЛАВА 1. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА СКЛАД СЕУ

1.1. Суднові енергетичні установки: визначення та терміни

Суднова енергетична установка – це складний комплекс функціонально взаємопов'язаних елементів енергетичного устаткування, машин, механізмів, апаратів та пристроїв, призначених для виробництва, трансформування, передачі й використання різних видів енергії, необхідних для забезпечення всіх суднових потреб [27].

Розглянемо основні положення цього визначення. До складу СЕУ входять теплові двигуни, машини, котли (елементи енергетичного устаткування); електричні машини: генератори, двигуни та перетворювачі; механізми (редуктори, мультиплікатори, насоси різного призначення, їх на судні нараховується декілька сотень), компресори, вентилятори; очисні апарати (фільтри, гомогенізатори, сепаратори палива й масла); теплообмінні апарати (охолодники, нагрівники, випарники, конденсатори); пристрої (повітроочисні, газовипускні, очищення випускних газів, валоповоротні, гальмівні, стопорні).

До основних видів енергії, що виробляється та споживається на судні, належить: *механічна, теплова, електрична*. Механічна енергія виробляється тепловими двигунами та електричними двигунами; електричну виробляють генератори електричного струму; теплова виробляється пароводяними котлами й нагрівниками різного типу.

Разом із цим обмежене застосування на судні отримали *гідравлічна* (гідравлічні системи рульових машин, палубних механізмів, гідромуфти, гідротрансформатори) і *пневматична енергія* (пневмоприводи допоміжних механізмів, системи стисненого повітря).

Кожна СЕУ складається з головної та допоміжних енергетичних установок. Головною енергетичною установкою (ГЕУ) зазвичай є та частина СЕУ, що забезпечує рух судна. Її також називають *пропульсивною* (від англ. *propulsion* – рух), тому що вона складається з елементів, за

допомогою яких енергія виробляється та передається судновому рушію для забезпечення руху судна. Транспортні судна та кораблі на рух витрачають до 90 % виробленої енергії. У той же час на окремих типах суден, наприклад, суднах технічного флоту (плавучих самохідних кранах, землесосах, землечерпалках, плавучих бурових установках та бурових суднах), сумарна потужність застосованих на них технічних засобів (підйомних кранів, бурових установок, рефулерних насосів) часто перевищує потужність, що використовується для забезпечення руху судна. Усі елементи СЕУ, що входять до складу головної енергетичної установки, мають назву головних.

До складу ГЕУ (рис. 1.1) входять: головний двигун (ГД) *1* (один або декілька) із системами, що його обслуговують *2*; муфта *3*, що поєднує двигун з валопроводом *6*; головний упорний підшипник (ГУП) *4*, який сприймає через валопровід упор від гребного гвинта (упор і є рушійною силою судна) і передає його судну через фундамент; передача *5*, через яку енергія ГД передається валопроводу та яка призначена для узгодження частот обертання головного двигуна і гребного вала; валопровід *6*, призначений для передачі обертального моменту гребному гвинту та передачі розвиненого гвинтом упору корпусу судна; гребний гвинт *7*, який забезпечує перетворення обертального моменту на упор.

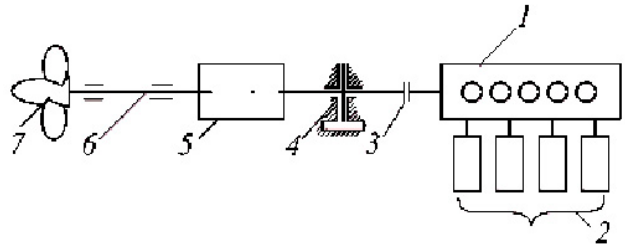


Рис. 1.1. Спрощена схема пропульсивної дизельної ЕУ

Як головні можуть бути застосовані дизельні, газотурбінні й паротурбінні двигуни. У разі застосування паротурбінного двигуна до складу ГЕУ входить ще і головний паровий котел.

Передачі, які входять до складу пропульсивної установки, бувають *прямими, механічними, електричними* та *гідравлічними*.

Як рушії зазвичай застосовують гребні гвинти фіксованого (ГФК) та регульованого (ГРК) кроків, водометні й крильчасті рушії (ВР і КР).

Призначенням *допоміжних установок* є забезпечення потреб в енергії різних видів пропульсивної установки та загальносуднових споживачів, а також створення умов для їх ефективного функціонування.

До таких установок належать суднова допоміжна електроенергетична установка – суднова електростанція (СЕС), допоміжна котельна установка, водоопріснювальна установка, установка комфортного кондиціювання.

Суднова електростанція призначена для забезпечення електричною енергією судна під час руху, на стоянці та в разі виконання швартових та вантажно-розвантажувальних операцій судновими засобами.

Вона складається з наступних елементів: привідний допоміжний тепловий двигун (у його ролі можуть використовуватися дизельні, газотурбінні двигуни та паротурбінні агрегати), електричний генератор, головний розподільний щит (ГРЩ), електротехнічні пристрої (трансформатори, випрямлячі, перетворювачі), кабелі для підведення живлення до споживачів.

До складу допоміжної електростанції можуть входити також валогенератори, що виробляють електричний струм за рахунок потужності, яка відбирається від ГД. Валогенератори працюють тільки під час роботи ГД. Суднова допоміжна електростанція може складатися з декількох (2…10) допоміжних генераторів електричного струму із згаданими вище варіантами приводу.

Обов'язковим елементом кожної суднової допоміжної електростанції є аварійний електрогенератор, призначений для забезпечення роботи життєво важливих суднових об'єктів і систем у разі повного знеструмлення судна. Приводом такого електрогенератора на суднах з будь-якими типами СЕУ обов'язково є дизельний двигун.

Потужність СЕС залежить від типу та призначення судна. Найбільшу потужність СЕС мають пасажирські, промислові та дослідницькі судна, для них вона складає до 60 % потужності ГД; для універсальних суховантажних суден і катерів – 10…15 % [27].

Призначенням *допоміжної котельної установки* є забезпечення судна та енергетичної установки парою і гарячою водою. До її складу входять допоміжні, утилізаційні та комбіновані котли, теплообмінні апарати, насоси, вентилятори, прилади й системи обслуговування котлів, аварійно-попереджувальної сигналізації та захисту.

Водоопріснювальна установка забезпечує отримання прісної води, необхідної для технічних та побутових цілей, з морської.

Установка комфортного кондиціювання призначена для підтримання необхідних комфортних параметрів повітря у приміщеннях СЕУ та інших, де можливе перебування людей.

Елементи СЕУ поєднуються в єдиний енергетичний комплекс судна за допомогою систем суднової енергетичної установки.

Системою СЕУ називається сукупність трубопроводів, механізмів, апаратів, пристроїв, приладів та вмістилищ, призначених для забезпечення виконання судновою енергетичною установкою певних функцій [1, 27, 33].

Типи систем СЕУ за призначенням наведені на рис. 1.2. Типовий склад системи СЕУ наведений на рис. 1.3.

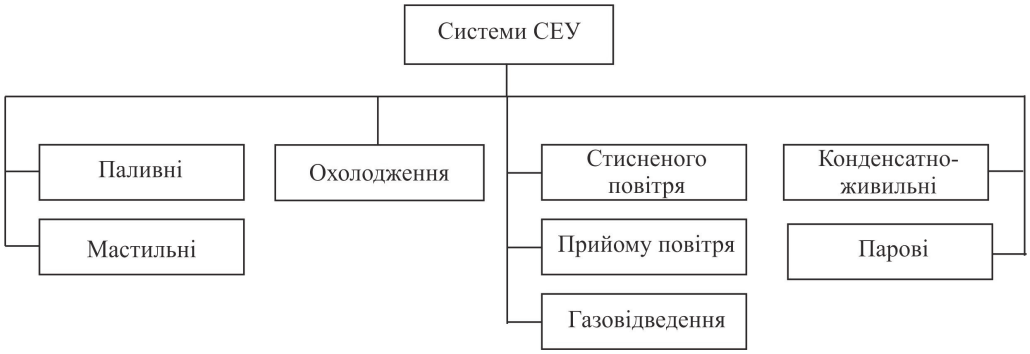


Рис. 1.2. Класифікація систем суднових енергетичних установок

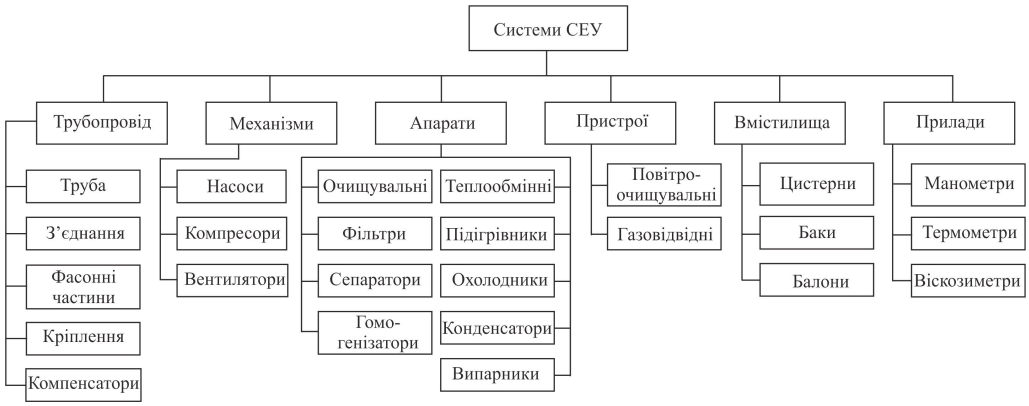


Рис. 1.3. Склад систем суднових енергетичних установок

Призначенням *паливної системи* є приймання, зберігання, видавання, перекачування, очищення, підігрівання та підведення палива до дизельних, газотурбінних двигунів і котлів.

Масляна система забезпечує процеси приймання, видавання, зберігання, очищення та подавання масла для змащування й охолодження машин та механізмів.

Система охолодження призначена для підведення води на охолодження механізмів, пристроїв, робочих середовищ у теплообмінних апаратах СЕУ.

Система стисненого повітря забезпечує СЕУ та судно стисненим повітрям необхідних параметрів для пуску й реверса головних дизелів, пуску допоміжних двигунів, роботи систем автоматики і керування, продувки кінгстонів, господарських потреб.

Повітропостачальні системи очищають та подають до двигунів і котлів повітря, необхідне для спалювання палива та охолодження двигунів.

Газовідвідні системи відводять відпрацьовані гази від двигунів і котлів.

Конденсатно-живильна система призначена для відбирання конденсату з головного та допоміжних конденсаторів, приймання, видавання, зберігання і подавання живильної води до паровиробних установок та агрегатів, а також до органів регулювання і керування.

Парові системи забезпечують підведення перегрітої або насиченої пари від паровиробних установок та агрегатів до головних парових турбін і допоміжних механізмів, апаратів та обладнання, а також відведення відпрацьованої пари до теплообмінних апаратів.

1.2. Класифікація СЕУ

Тип СЕУ та її склад визначаються типом і призначенням судна, на якому вона встановлена. На рис. 1.4 наведена класифікація суднових енергетичних установок за основними загальноприйнятними ознаками.

За типом палива. За сучасним станом усі суднові енергетичні установки можуть бути поділені на такі групи: СЕУ, що працюють на різних видах вуглеводневих палив (ВВП); СЕУ, що працюють на альтернативних паливах; гібридні СЕУ, які використовують для роботи як вуглеводневі палива, так і електричну та вітрову енергії; СЕУ з виключно електричними джерелами енергії (ЕДГ) на борту; СЕУ, що працюють на ядерному паливі – атомні енергетичні установки.

Суднові енергетичні установки можуть використовувати наступні види вуглеводневого палива: *тверде, рідке, газоподібне.*

Тверде паливо застосовувалося в котлах, які забезпечували парою парові машини та парові турбіни. Спочатку це була деревина, потім застосування знайшло кам'яне вугілля, перевагою якого була більша кількість теплоти, що виділялася під час згоряння одиниці маси палива. У той же час процеси завантаження вугілля на судні, його зберігання, приготування до спалювання, подавання до топки та видалення шлаку, що утворювався під час згоряння, були надзвичайно складними, трудомісткими, а робота кочегарів – виснажливою. З винайденням нафти розпочалося її стрімке впровадження в суднову енергетику. Перші СЕУ, що працювали на нафті, з'явилися на початку XX ст., і вже через 15–20 років переважна більшість енергетичних установок на суднах працювала на рідкому паливі [1]. Сьогодні вугілля майже не використовується на суднах, а переважна кількість СЕУ працює на продуктах переробки нафти.

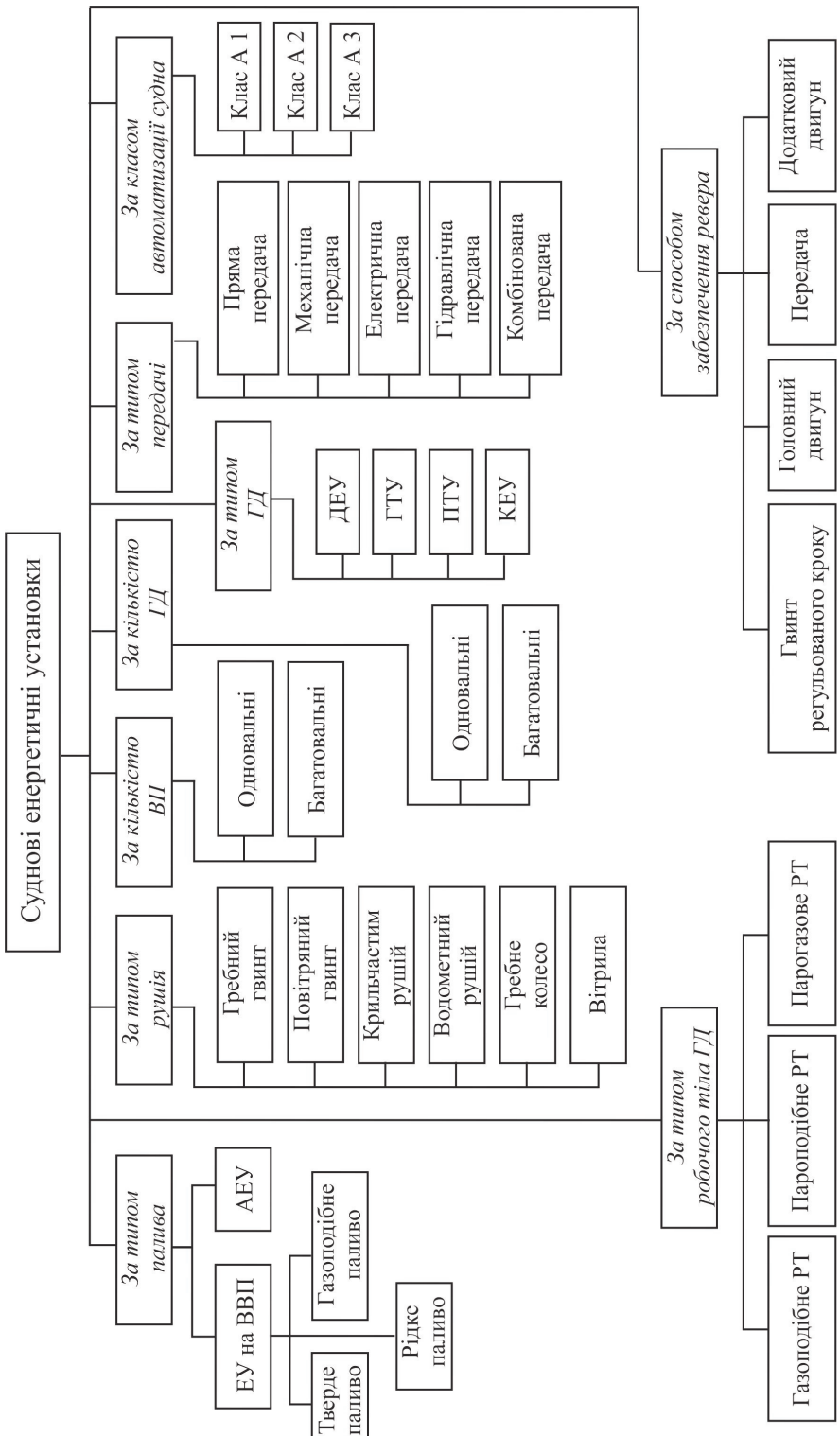


Рис. 1.4. Класифікація суднових енергетичних установок:
ДЕУ – дизельна енергетична установка; КЕУ – комбінована енергетична установка

Газоподібне паливо для роботи СЕУ спочатку знайшло застосування переважно на суднах – газовозах, на яких газ випару (частина газового вантажу, яка неминуче випаровується з вантажних цистерн під час перевезення, що викликано особливостями технології його зберігання) подається до двигунів та котлів. Разом із цим останніми роками з'явилися приклади застосування зрідженого газу (ЗГ) і на інших типах суден, найчастіше це судна обслуговування нафтогазодобувних платформ.

Зважаючи на обмеженість запасів рідких та газоподібних ВВП на Землі й нерівномірність їх розподілу, фахівці передбачають можливість найближчим часом поширеного застосування твердих палив, найвірогідніше у вигляді водо-вугільних суспензій [1].

Останнім часом поширилось застосування на суднах альтернативних палив (АП) – не вуглеводневого походження. Їх номенклатура поширюється з кожним днем. Це такі спирти, як етанол і метанол, біодизельні палива, водень і, зокрема, аміак.

Починаючи з 2010-х рр., на транспортних суднах, поряд із отриманням механічної енергії за рахунок спалювання вуглеводневих палив розпочали застосовувати й електричну енергію накопичувану в батареях з подальшим її використанням для пропульсивних цілей і загальносуднових потреб. Електрична енергія для зарядки батарей може бути отримана як з використанням теплових двигунів, так і за рахунок сонячної енергії. Відомі енергетичні установки, у яких для цілей руху, поряд з механічною енергією теплових двигунів, використовується енергія вітру. Весь цей клас СЕУ стосовно джерел енергії відноситься до гібридних СЕУ [42].

Боротьба із забрудненням навколишнього середовища привела до створення суден з електрорухом, з використанням електричних батарей, які заряджаються у портах призначення. Найчастіше це невеликі пасажирські пороми, але останнім часом з'явились і перші транспортні судна, для заряджання батарей яких розроблені спеціальні судна-заправники. Це є найхарактернішим прикладом СЕУ з електричними джерелами енергії [42].

Стан застосування на суднах енергетичних установок, що працюють на ядерному паливі, атомних енергетичних установок, на сьогодні характеризується наступним: найбільшого поширення АЕУ набули на військовому флоті – авіаносці, важкі крейсери, підводні човни; на цивільному флоті їх застосування майже виключно обмежується криголамами. Наразі у світі є тільки одне судно – не криголам – це ліхтеровоз «Сєвморпуть», побудоване у м. Керч у 1988 р. [1].

Останнім часом з'явилися відомості про побудову двох плавучих атомних електростанцій. Замовлення на цивільні судна з АЕУ на сьогодні відсутні.

За типом робочого тіла. У ДВЗ та ГТД корисна робота здійснюється за допомогою продуктів згоряння – *газоподібних* робочих тіл. Одержання механічної енергії в парових турбінах відбувається під час взаємодії пари – *пароподібного* робочого тіла – з лопатками. Крім того, у так званих, контактних газопаротурбінних установках, працює *газопарова* суміш.

За типом рушія. Найпоширенішим типом рушія є *гребний гвинт* (ГГ). На суднах застосовуються ГГ двох типів: фіксованого кроку (з нерухомими лопатями) та регульованого кроку (з лопатями, які можуть повертатися за допомогою органів керування). На суднах на повітряній подушці рушієм є *повітряний гвинт*.

Крильчастий рушій з урахуванням його високих маневрених характеристик є незамінним для буксирів або суден, яким за родом функціонування необхідне забезпечення точного позиціювання.

Водометні рушії, які спочатку використовувалися виключно на суднах з малою осадкою, знайшли широке застосування у складі пропульсивного комплексу швидкохідних суден – поромів.

Гребне колесо як елемент ПК застосовується у теперішні часи на ретро-суднах або, іноді, на невеликих суднах з обмеженою осадкою. Незважаючи на оптимістичні прогнози 70–80-х рр. XX століття, *вітрила* як рушії не знайшли широкого розповсюдження на торгових та пасажирських суднах. У той же час останніми роками з'явилися цікаві проєкти застосування вітро-дизельних енергетичних установок з використанням сучасних високотехнологічних систем на комерційних суднах [1].

За кількістю валопроводів. Пропульсивний комплекс сучасних суден може включати в себе один або декілька (два, три) валопроводів і відповідну кількість рушіїв. Дво- та тривальні ПК забезпечують підвищену маневреність та живучість судна. Усі пасажирські судна в обов'язковому порядку обладнуються двома-трьома лініями вала.

Цікавий факт! Серед поодиноких випадків застосування на суднах декількох гребних гвинтів на одному валопроводі найбільш відомим є судно «Turbinia». Чарльз Парсонс у 1897 р. встановив на кожному валопроводі судна по три гребних гвинти діаметром 0,45 м, що дозволило йому зменшити навантаження на лопаті та знизити потрібну частоту обертання роторів парових турбін. «Turbinia» розвинула швидкість біля 32 вузлів.

За кількістю головних двигунів. До складу суднової енергетичної установки може входити один або декілька головних двигунів. Відомий варіант компонування СЕУ з електропередачею, до складу якої входять 10 дизельних двигунів. Збільшення кількості двигунів спрощує керування СЕУ, дозволяючи регулювати її потужність шляхом підключення

чи відключення одного двигуна або групи двигунів. Суднові енергетичні установки з малообертовими двигунами (МОД) майже завжди виконуються одновальними.

За типом головного двигуна. Відповідно до цієї ознаки класифікації розрізняють СЕУ дизельні, паротурбінні, газотурбінні та комбіновані, СЕУ з тепловими та електричними двигунами, СЕУ з електричними двигунами.

Дизельні установки є найпоширенішим типом енергетичних установок завдяки їх високій економічності. Головним двигуном у цих установках є двигун внутрішнього згоряння – дизель. Існують три типи дизелів за частотою обертання вихідного вала: *малообертові* – МОД ($n = 50…250$ хв$^{-1}$); *середньообертові* – СОД ($n = 251…750$ хв$^{-1}$) та високообертові – ВОД ($n = 751…2500$ хв$^{-1}$).

Паротурбінна установка є сукупністю двигунів, агрегатів та пристроїв, об'єднаних загальною тепловою схемою. Робоче тіло, водяну пару виробляє котел. Утворена пара подається на турбіни, яких може бути декілька: високого, середнього та низького тиску, відповідно, ТВТ, ТСТ і ТНТ. Пара, що відпрацювала в турбінах, надходить до конденсатора, у якому конденсується. Отриманий конденсат використовується для живлення котла. Паротурбінна установка є виключним типом енергетичної установки для суден, які працюють на ядерному паливі. Парові турбіни відрізняються високою надійністю та відносною простотою ремонту. На даний час кількість суден з ПТУ, які будуються щорічно, не перевищує 10 [35, 36].

Головним елементом *газотурбінної установки* є газотурбінний двигун. Робочим тілом ГТД є гази, які утворюються у камері згоряння, що розташована безпосередньо у двигуні. На відміну від ПТУ, відсутність такого громіздкого елемента, як паровий котел, дозволила створити компактний і легкий двигун зі значною агрегатною потужністю. Така позитивна властивість ГТД широко використовується на кораблях ВМФ, суднах динамічного підтримання та швидкісних суднах [1, 27, 34].

Комбінованою вважається енергетична установка, де як головні входять два типи двигунів і використовуються переваги кожного з них, чи однотипні двигуни різного призначення (маршові та форсажні) [1].

Найбільшого поширення останнім часом набули комбіновані установки з використанням ГТД. Характерними для ГТД є велика витрата відхідних газів та їх значна температура. Використовуючи теплоту цих газів в утилізаційному котлі (УК), установленому за ГТД, отримують водяну пару, яку можна спрямувати у ПТУ, та одержати значну потужність, що буде підсумовуватися з потужністю ГТД.

Суднова енергетична установка, що складається з газотурбінної та паротурбінної частин, з термодинамічно зв'язаними циклами (від температури й витрати відхідних газів ГТД залежать температура, тиск та витрати пари, що надається на парову турбіну) називається *комбінованою газопаротурбінною установкою* (ГПТУ), або *газотурбінною установкою з теплоутилізаційним контуром* (ГТУ з ТУК). У такій установці основним є газотурбінний цикл, якщо ж основним буде паровий цикл, а газотурбінний – додатковим, то таку установку називають *комбінованою парогазотурбінною.*

Комбінованою може бути і дизель-паротурбінна установка, якщо дизель обладнаний ТУК, а потужність утилізаційної парової турбіни передається валопроводу. Застосування комбінованих установок дозволяє суттєво збільшити потужність установки без додаткових витрат палива. Використання комбінованої установки з різнотипними двигунами з термодинамічно не зв'язаними циклами (наприклад, дизель-газотурбінної) має місце у випадку, коли СЕУ повинна мати два основні ходові режими, що суттєво відрізняються за потужністю та тривалістю. У таких установках більш економічні маршові двигуни (зазвичай, дизелі) забезпечують помірні (економічні, маршові) режими, а повний, форсажний режим роботи судна забезпечується за рахунок більш потужних ГТД – форсажних.

До *комбінованих* можна віднести й установки, які складаються з однотипних, найчастіше, газотурбінних двигунів різної потужності, призначених для забезпечення малих та повних ходів судна. У комбінованих установках маршові й форсажні двигуни можуть працювати спільно та окремо.

За типом передачі. Призначенням головної передачі є передача енергії від ГД судновому валопроводу та узгодження частоти обертання двигуна і гребного гвинта.

Частота обертання гребного гвинта, за якої він має найвищу ефективність залежно від його потужності, форми й розмірів, становить 60…150 хв$^{-1}$. Збільшення діаметра ГГ супроводжується зниженням його оптимальної частоти обертання і позитивно відбивається на рівні ККД пропульсивного комплексу.

Усі суднові передачі поділяються на дві групи: *головні*, які передають енергію головних двигунів, та *допоміжні*, що передають енергію теплових двигунів допоміжного призначення.

Найбільшого поширення на суднах набули *механічні* (зубчасті) та *електричні* передачі, іноді застосовуються *гідравлічні* або *комбіновані* (наприклад, гідрозубчасті). У разі збігу частоти обертання вихідного

вала головного двигуна і розрахункової (оптимальної) частоти обертання гребного гвинта, передача потужності є *прямою.*

Механічні передачі являють собою сукупність зубчастих передач, валів, підшипників, муфт і органів керування. Вони поділяються на *редуктори*, призначені для зниження підведеної частоти обертання, і *мультиплікатори*, які підвищують частоту обертання. Усі головні передачі являють собою редуктори. Це пов'язано з тим, що частота обертання вихідного вала теплових двигунів (за винятком МОД) суттєво перевищує діапазон рекомендованих частот обертання ГГ. Так, частота обертання вихідного вала ГТД становить 3000…10 000 хв$^{-1}$, ПТ – 2600…4000 хв$^{-1}$.

До складу електричної передачі входять електричний генератор, який приводиться у дію тепловим двигуном (він має назву *первинного* чи *привідного двигуна*) і виробляє електричний струм, електричний двигун, що споживає електричну енергію та перетворює її на механічну, а також комутуючі пристрої, кабелі, розподільні щити тощо.

Електричні передачі переважно застосовуються на суднах, які потребують частої швидкої зміни напряму руху (криголами), а також на пасажирських суднах і суднах офшорного флоту.

За способом забезпечення реверса. Реверс судна – це маневр, який забезпечує енергетична установка, пов'язаний з повною зупинкою судна та його подальшим рухом у протилежному напрямку. Тривалість реверса характеризує проміжок часу від початку виконання режиму реверсування до початку роботи рушія в режимі, що забезпечує зміну напрямку упору. До найбільш поширених способів забезпечення реверса належать наступні:

Реверс рушієм. Найбільш розповсюдженим є реверс із застосуванням гвинта регульованого кроку (ГРК). У цьому випадку лопаті гвинта, що мають можливість розвертатися, установлюються у положення, за якого упор, розвинений гвинтом, набуває зворотного напряму. При цьому напрям обертання вала головного двигуна і валопроводу залишається незмінним. Реверсування судна з водометним рушієм забезпечується зміною напрямку струменів води за допомогою спеціальних заслінок.

Реверс головним двигуном. У цьому випадку змінюються як напрям обертання вихідного вала головного двигуна, так і валопроводу з гребним гвинтом. Двигуни внутрішнього згоряння можуть бути як реверсивними, так і нереверсивними.

Реверс парових турбін здійснюється за допомогою спеціальних ступенів заднього ходу, які розташовуються в турбіні низького тиску (ТНТ). Реверсивні ГТД мають силову турбіну з двоярусними робочими лопатками і спеціальний газорозподільний пристрій. Напрямок обертання

силової турбіни залежить від того, на який ярус лопаток (їх профілі розгорнуті на 180° відносно один одного) буде спрямований потік газів з попередніх ступенів.

Реверс передачею. Реверс механічною передачею здійснюється за допомогою спеціальних муфт (фрикційних та гідравлічних), розташованих у редукторі; реверс електричною передачею забезпечується зміною умов підведення електричного струму до електричного двигуна, що викликає зміну напрямку обертання його ротора; реверс гідравлічною передачею забезпечується за допомогою гідравлічних муфт і гідротрансформаторів.

На окремих типах суден (суднах на підводних крилах) для забезпечення заднього ходу використовуються спеціальні двигуни невеликої, порівняно з ГД, потужності.

За класом автоматизації. Усі судна поділяються на три класи залежно від рівня автоматизації суднової енергетичної установки AUT1, AUT2, AUT3. Клас AUT1 передбачає обслуговування СЕУ під час рейсу без постійної вахти в машинному відділенні (МВ) та центральному посту керування (ЦПК). Пуск, зупинка та керування СЕУ здійснюється з ходового містка. Клас AUT2 надається у випадку, коли під час руху судна передбачається вахта одного механіка у ЦПК (у МВ при цьому постійна вахта не ведеться), на стоянці обслуговування СЕУ – безвахтове. Клас автоматизації AUT3 передбачає забезпечення керування головними та допоміжними механізмами СЕУ з місцевих постів керування та ЦПК. Вахта у МВ несеться цілодобово.

Більшість морських суден, що перебувають в експлуатації, мають клас автоматизації AUT2, нові проєктуються майже виключно на клас AUT1.

1.3. Вплив типу судна на склад суднової енергетичної установки

Основним призначенням суднових енергетичних установок є забезпечення ефективного функціонування суден, на яких вони встановлені. Усе різноманіття існуючих суден поділяють за певними класифікаційними ознаками на групи залежно від функцій, які вони виконують, конструктивних та технологічних особливостей, принципів, забезпечення руху тощо [1].

Головною ознакою, за якою класифікують судна, є їхнє призначення. Згідно із цим усі цивільні морські судна поділяються на *транспортні, промислові, службово-допоміжні та судна технічного флоту.*

Далі наведені матеріали стосовно особливостей комплектації суднових енергетичних установок морських суден різних типів.

1.3.1. Суховантажні транспортні судна

Найбільш поширеним типом транспортних суден є універсальні суховантажні судна (УСВС) (рис. 1.5). В останні роки широко застосовуються універсальні суховантажні судна водотоннажністю до 7 тис. тонн – так звані «коустери». Головний двигун на таких суднах – чотиритактний середньообертовий ДВЗ. Загальносуднові потреби в електроенергії забезпечує суднова допоміжна електростанція, яка зазвичай складається з трьох ДДГ потужністю по 300–400 кВт. Потреби у теплоті закриває допоміжна котельна установка, до складу якої входить допоміжний котел продуктивністю до 3–5 т/год та утилізаційний котел, іноді їх функції виконує один комбінований котел.



а ***б***

Рис. 1.5. Універсальні суховантажні судна:
а – «Catarina-C» дедвейтом 5000 т; ***б*** – «Celine» дедвейтом 9000 т

Аналогічний склад СЕУ і у таких суден, як балкери, рудовози, лісовози, судна для перевезення автомобілів (автомобілевози – СПА) (рис. 1.6, 1.7).



а ***б***

Рис. 1.6. Навалочні судна:
а – балкер «Pierre LD» (DW 172 000 т); ***б*** – рудовоз «Brasil Maru» (DW 270 000 т)

Транспортні рефрижераторні судна (рис. 1.8.) призначені для перевезення м'яса, риби за низьких температур до (–25 ºС) та фруктів (насамперед бананів) за температур 0…+5 ºС. Холодильні установки, які забезпечують потрібний температурний режим у трюмах, споживають значну кількість електричної енергії. Це знаходить відображення в потрібній потужності допоміжної суднової електростанції, яка, окрім закриття потреб в електроенергії енергетичної установки та загальносуднових споживачів, повинна забезпечити потреби й рефрижераторної установки.



Рис. 1.7. Автомобілевоз «Crystal Ray»



Рис. 1.8. Рефрижераторне судно «Buzzard Bay»

Розпочинаючи з 90-х років минулого століття будівництво нових рефрижераторних суден майже повністю призупинено, тому що різко зменшився попит на них. Більш доцільними для доставки мороженої продукції – м'яса, риби й морепродуктів, для перевезення тропічних фруктів і овочів стали контейнерні технології, які суттєво підвищили швидкість товарообігу, зменшили стоянки суден під вантажними операціями, поліпшили збереженість вантажів.

Комплектація СЕУ сучасних суховантажних суден

1. УСВС «Jolly Titanio». Дедвейт – 64 574 т, довжина – 240 м, ширина – 37,5 м, висота борту – 20 м, швидкість руху – 21,5 вузлів. Вантажопідйомність – 51 060 т/3016 TEU. ГД: MAN Diesel 3×7L70ME-C8 потужністю по 22 890 кВт, ДЕС: 3ДДГ STX Engine, 3×1980 кВт. ДКУ: 1 ДК Kangrim продуктивністю 2 т/год. Рушійний комплекс: 1 ГРК, НПП 1×400кВт, КПП 1×1400 кВт.

2. УСВС «CSB Fortune». Дедвейт – 230 000 т, довжина – 325 м, ширина – 52,5 м, висота борту – 24,3 м, швидкість руху – 15 вузлів. Вантажопідйомність – 116 400 т. ГД: MAN B&W 6S80 MC-C7 потужністю 1×22 500 кВт. ДЕС: 3×960 кВт Yanmar. ДКУ: 1 КК Green Shazhov 1×3,2 т/год. Рушійний комплекс: 1 ГФК.

3. УСВС «Pirgos». Дедвейт – 9000 т, довжина – 136,8 м, ширина – 17,5 м, висота борту – 8,5 м, швидкість руху – 12,5 вузлів. ГД МНІ

1×6UEC33LS потужністю 2260 кВт. ДЕС: 2×MAN 5L16/24 потужністю по 450 кВт. Сонячні панелі сумарною потужністю 20 кВт, установлені на кришках трюмів, подають вироблений струм у суднову електромережу. ДКУ: 1 термо-масляний котел WRY600 потужністю 600 кВт. Рушійний комплекс: 1 ГФК.

4. Балкер «Vale Brazil». Дедвейт – 400 000 т, довжина – 362 м, ширина – 65 м, висота борту – 30,4 м, швидкість ходу – 14,8 вузлів. ГД MAN B&W 1×7S80 ME-C8 потужністю 29 260 кВт. ДКУ: 1ДК Aalborg, паропродуктивністю 2,5 т/год. Рушійний комплекс: 1 ГФК.

5. Рудовоз «Brasil Maru». Дедвейт – 327 000 т, довжина – 340 м, ширина – 60 м, висота борту – 28,15 м, швидкість руху – 15 вузлів. ГД: MAN B&W 1×7S80MC-C потужністю 22 340 кВт. ДЕС: 3 ДДГ Daihatsu 6ДК-20 потужністю по 380 кВт. ДКУ: 1 КК Osaka Boiler паропродуктивністю по 2 т/год як ДК, так і УК. Рушійний комплекс: 1ГФК.

6. Судно для перевезення автомобілів «City of Hamburg». Дедвейт – 35 000 т, довжина – 126,5 м, ширина – 220,6 м, висота борту – 19,7 м, швидкість руху – 15 вузлів, кількість автомобілів на борту – 688. ГД: MAN B&W 2×8L32/40 потужністю по 4000 кВт. ДЕС: 2 ВГ по 1000 кВт, 2 ДДГ×8L21/31 по 1200 кВт. ДКУ: 1 допоміжний термальний котел Cesab тепловою потужністю 1000 кВт, 2 термальних УК Cesab потужністю по 550 кВт. Рушійний комплекс: 2 ГРК×3000 кВт, 2 НПП×750 кВт.

7. СПА «Thermopylae». Дедвейт – 22 000 т, довжина – 200 м, ширина – 36,5 м, висота борту – 38,2 м, швидкість руху – 19,8 вузлів. Кількість автомобілів на борту – 803. ГД: Hyundai – MAN 1×8S60ME-C8 потужністю 15 560 кВт. ДЕС: 3 ДДГ HHI 7H25/33 потужністю по 2000 кВт, 1 ДДГ HHI×6H25/33 потужністю 1684 кВт. ДКУ: ДК Alfa Laval 1×1,3 т/год. Рушійний комплекс: 1 ГФК×15 560 кВт.

Комплектація СЕУ сучасних рефрижераторних суден

1. Транспортний рефрижератор «Frio Antarctic». Дедвейт – 4910 т, вантажомісткість – 4058 т, довжина – 126 м, ширина – 18 м, висота борту – 10 м, швидкість – 15,3 вузлів, ГД: 6ДКРН 45/120-7, 1×3970 кВт. ДЕС: 3 ДДГ×8ЧН25/34 потужністю по 500 кВт, АДГ 1×6Ч15/18 потужністю 100 кВт. Об'єм рефрижераторних трюмів – 4×6650 м^3, температура – (–28)°С, (–8)°С.

Останні 20 років лідируючі позиції у морських перевезеннях займають контейнерні судна (рис. 1.9) Це судна з підвищеними швидкісними та маневреними властивостями, які можуть перевозити до 24 тис. TEU.

Спеціальна інформація! Місткість контейнерних суден визначається у TEU (Twenty feet equivalent unit) – одиницях, еквівалентних 20-футовому за довжиною

контейнеру. Позначення FEU (forty feet equivalent unit) відповідає 40-футовому контейнеру. Ширина всіх морських контейнерів є незмінною – 8 футів, стандартна висота встановлена також у 8 футів. 40-футовий контейнер з розмірами 2438×2438×12 192 мм має вантажопідйомність до 30 т, 20-футовий з розмірами 2438×2438×6096 мм має вантажопідйомність до 18 т.

До 10 % від загальної чисельності контейнерів на судні є рефрижераторними, які підключаються до суднової електромережі, вони мають і автономні холодильні установки.

Конструкція контейнерів передбачає можливість введення автоматизованих пристроїв захоплення вантажопідйомних механізмів, зчеплення контейнерів між собою або постановку на них наступного ярусу контейнерів, кріплення до палуби судна нижнього ярусу контейнерів або установку контейнерів для перевезення по суші на спеціальних автомобілях. Штабелювання контейнерів відбувається не більше ніж у 9 ярусів.

Швидкість контейнерних суден до 2010-х років доходила до 26 вузлів, сучасні контейнеровози мають швидкість до 22 вузлів.

На склад суднової енергетичної установки контейнеровозів впливає три фактори:

– висока швидкість ходу, яка потребує застосування головного двигуна значної потужності;

– необхідність забезпечення електроенергією на борту судна рефконтейнерів (потужність автономної холодильної установки одного контейнера становить 7–10 кВт);

– для підвищення маневреності більшість контейнеровозів обладнуються підрулюючими пристроями (до трьох), потужність електроприводу одного пристрою становить не менше 1–3 тис. кВт.

Стає зрозумілим, чому потужність суднової електростанції контейнеровозів може доходити до 20 МВт, а потужність ГД – до 40–60 МВт. На початку 2000-х рр. на контейнеровозі «Emma Maersk» був установлений найпотужніший у світі двигун – дизель потужністю 80 МВт.

Комплектація СЕУ сучасних контейнерних суден

1. Контейнерне судно «CMA CGM Jacques». Вантажомісткість – 285 000 т, довжина – 399 м, швидкість – 22 вузли. Судно призначене для перевезення 23112 TEU, 13 328 – на палубі, 9784 – у трюмах. Із загальної чисельності 2200 контейнерів є рефрижераторними. ГД: 1×WinGD 12X92DF потужністю 63 480 кВт. ДЕС: 2×Wartsila 9L34DF потужністю по 4500 кВт та 4×Wartsila 8L34DF потужністю по 4000 кВт. ДКУ: 1 ДК Aalborg OL паропродуктивністю 14,65 т/год, 1 УК Aalborg XC-2V паропродуктивністю 5,73 т/год. Рушійний комплекс: ГФК діаметром 10,1 м, 2 НПП×430 кН упору.

Розрахунковий коефіцієнт енергоефективності судна (Attained EEDI) становить 6,035 г CO_2/ТМ.



а



б



в

Рис. 1.9. Контейнерні судна:
а – «Senator» на 2000 TEU; ***б*** – «Emma Maersk» на 11 000 TEU; ***в*** – фідерний контейнеровоз «Jork Ruler» на 250 TEU

Нормативний коефіцієнт енергоефективності контейнерних суден (Required EEDI) – 13,2 гCO_2/ТМ.

2. Контейнерне судно «VKMTC SEOUL». Довжина – 196 м, ширина – 32,5 м, висота борту – 16,8 м, дедвейт – 37 200 т, швидкість – 18 вузлів. Судно перевозить 2540 TEU, 1600 – на палубі, 940 – у трюмах. Рефрижераторні трейлери з контейнерами: 13 – на палубі, 11 – у трюмі. ГД: Hyundai MAN B&W 1×7S60ME-C10,5 (Tier II) потужністю 116 700 кВт. ДЕС: 3 HHI Engine & Machinery, 3×8H21/32 потужністю по 1700 кВт. ДКУ: КК Kangrim HI паропродуктивністю 2 т/год/1,05 т/год.

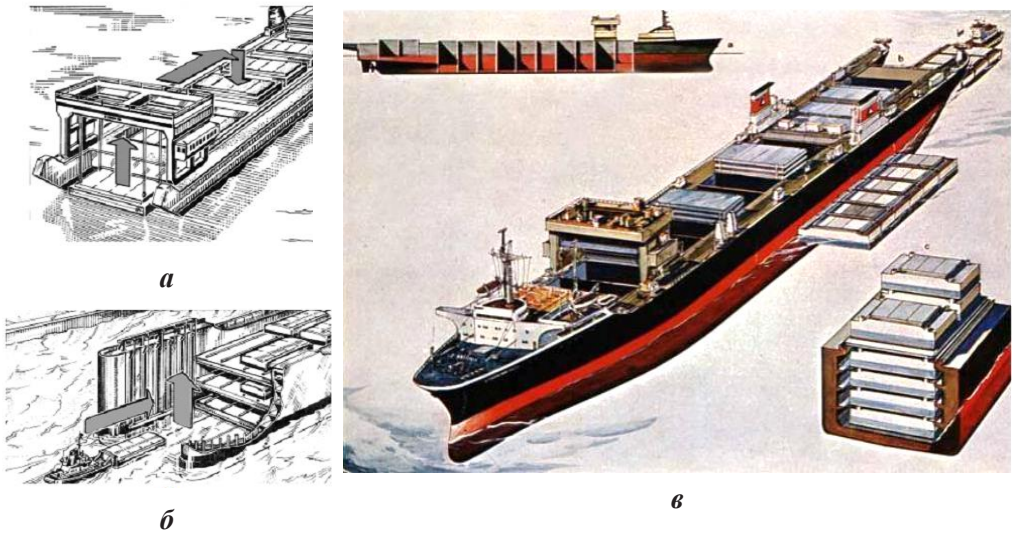
Рушійний комплекс: 1 ГФК Ø 7,2м, НПП 1×1150 кВт. Розрахунковий EEDI судна: 13,46 г CO_2/ТМ, нормативний EEDI: 18,91 г CO_2/ТМ.

3. Контейнерне судно «DEL MONTE». Довжина судна – 192 м, ширина – 30 м, висота борту – 15,3 м, дедвейт – 27 800 т, швидкість 21,5 – вузлів. Судно призначено для перевезення виключно рефрижераторних контейнерів – 634 FEU. ГД: MAN 1×8S60ME-C10,5 (Tier II). ДЕС: 2 ДДГ×6ДК-28Е потужністю по 1850 кВт, 2 ДДГ×8ДК-28Е потужністю по 2650 кВт. Рушійний комплекс: 1 ГФК, 1 НПП×1000 кВт. Attained EEDI – 18,24 г CO_2/ТМ, Required EEDI – 20,05 г CO_2/ТМ.

4. Фідерне контейнерне судно «STADT GOTHA». Довжина судна – 166,1 м, ширина – 25,0 м, висота борту – 14 м, дедвейт – 18 400 т. Судно призначене для перевезення контейнерів, розвантажених у великих портах з магістральних контейнеровозів на спеціальних терміналах до портів призначення. Судно перевозить 1284 TEU, з них 812 на палубі, 472 – у трюмах. ГД: 1×MAN 8L58/64 CD потужністю 11 400 кВт. ДЕС: 4 ДДГ Wartsila 9L20, 4×1655 кВт. ДКУ: 1 КК паропродуктивністю 2,5 т/год. Рушійний комплекс: 1 ГРК, 1 НПП×800 кВт.

Ліхтеровози – це суховантажні судна для перевезення вантажів у ліхтерах – баржах вантажопідйомністю до 1000 т. Найбільшого поширення у світовому морському флоті, отримали ліхтеровози типу LASH (Lighter a board the ship), місткістю 49–89 ліхтерів вантажопідйомністю до 370 т (рис. 1.10,***в***). Для здійснення вантажних операцій з ліхтерами на судні встановлені козлові крани вантажопідйомністю до 500 т [1].

Ліхтери встановлюються краном, що переміщується вздовж судна, у трюмах у декілька ярусів. Ліхтеровози типу Sea Bee (морська бджола) являють собою багатопалубні судна без поперечних перебірок у межах вантажного приміщення, призначені для перевезення ліхтерів вантажопідйомністю 1000–1100 т (рис. 1.10,***а***, ***б***).



а ***б*** ***в***

Рис. 1.10. Ліхтеровози:
а, б – судно типу Sea Bee, транспортування баржі до ліфту і далі по судну;
в – ліхтровоз типу LASH при заміні барж

Під час розвантаження ліхтерів їх заводять між стінками звису корми, де встановлений підйомник з майданчиком, який на тросах опускається під воду. Після підйому ліхтерів до рівня однієї з палуб їх перевозять уздовж неї на платформах до місця установлення, де ліхтери переміщуються гідродомкратами на фіксуючі палубні конструкції.

Зважаючи на технології завантаження обох типів ліхтерів, суднова допоміжна електростанція повинна забезпечувати роботу потужних суднових завантажувальних пристроїв.

Комплектація СЕУ сучасних ліхтеровозів

1. Ліхтеровоз «Олексій Косигін» типу LASH. Вантажомісткість – 36 640 т. Довжина – 263 м, ширина – 32,3 м, висота – 16 м, швидкість – 17,5 вузлів. Кількість ліхтерів довжиною 18,75 м, шириною 9,5 з осадкою 2,55 м та вантажопідйомністю по 370 т становить 32 од. або 1500 TEU. Судно оснащено 500-тонним краном козлового типу для обробки ліхтерів. ГД: 2 малообертових двигуна 7ДКРН80/160 по 12 300 кВт.

У 1996 р. «Олексій Косигін» був проданий американській компанії «Waterman ship» і отримав назву «Atlantis Forest».

2. Ліхтеровоз «Сєвморпуть» типу LASH з АЕУ. Водотоннажність – 61 880 т, вантажомісткість: 74 ліхтери водотоннажністю по 400 т або 1330 контейнерів TEU, довжина судна – 260 м, ширина – 32 м, висота борту – 18,3 м, швидкість на чистій воді – 20,8 вузлів, швидкість у суцільному льодовому полі товщиною 1 м – 12 вузлів. Потужність атомного ГТЗА 6840М5 складає 29 400 кВт. ДЕС: 3 ДПТГ×1700 кВт, 2 ДДГ×600 кВт, 1 АДГ×200 кВт. ДКУ: котел аварійного ходу (у випадку виходу з ладу атомної паровиробної установки) паропродуктивністю 50 т/год за тиску пари 2,5 МПа і температури пари 360 °С. Судно оснащене козловим краном вантажопідйомністю 500 т з двома контейнерними приставками вантажопідйомністю 38,5 т. Рушійний комплекс: ГРК діаметром 6,7 м у нерухомій насадці.

1.3.2. Наливні транспортні судна

Загальний дедвейт танкерів складає більше 40 % стандартного дедвейту світового транспортного флоту [1].

Особливі вимоги до складу СЕУ танкерів (рис 1.11):

– висока потужність, необхідна для забезпечення роботи вантажних насосів, які здійснюють розвантаження танкерів;

– необхідність постійного підігріву вантажу під час його транспортування танкером з метою забезпечення належної в'язкості для стабільного вивантаження;

– операції швартування танкерів типу «Shuttle» у відкритому океані до розташованих над нафтовими свердловинами суден типу FPSO потребують наявності на них системи динамічного позиціонування DP3, що приводить до потреби використання декількох підрулюючих пристроїв потужністю по 1–2 тис. кВт. Це суттєво збільшує навантаження на ДЕС.

Підігрів вантажу відбувається виключно за допомогою пари, тому продуктивність парових котлів на танкерах є достатньо високою – 30–80 т/год. Привід вантажних насосів може бути паровим, у іншому випадку – потужність допоміжної електростанції повинна бути збільшеною на величину потрібної потужності електричних приводів вантажних засобів. Головні двигуни танкерів – малообертові двигуни внутрішнього згоряння.



а



б



в

Рис. 1.11. Танкери:
а – танкер «Victoria» дедвейт 1380 т;
б – танкер-продуктовоз «Stena Paris» дедвейт 65 125 т; ***в*** – «Stena Arctica» – танкер льодового класу типу «Aframax», DW = 117 100 т

Комплектація СЕУ сучасних танкерів

1. Танкер «MAERSK SARA». Дедвейт – 323 000 т, оснащений головним двигуном 6S90ME-C потужністю 29 000 кВт, суднова електростанція: 2 ДДГ по 1250 кВт. Котельна установка: два ДК «Aalborg» паропродуктивністю 45 т/год. Привід вантажних насосів: 3×5500 м^3/год, паротурбінний. Рушійний комплекс: 1 ГФК.

2. Танкер типу VLCC «FUJISAN MARU». Дедвейт – 313 000 т, довжина – 338 м, ширина – 60 м, висота борту – 21 м, швидкість ходу – 15 вузлів. ГД: 1 MAN B&W 7G80ME-C9 потужністю 24 700 кВт. ДЕС: 3 ДДГ Daihatsu по 1400 кВт, ДКУ: 2 ДК, 1×MHI паропродуктивністю 80 т/год, тиск пари – 1,96 МПа, 1×Osaka паропродуктивністю 1,6 т/год, тиск пари – 0,59 МПа. Привід трьох вантажних насосів паротурбінний. Рушійний комплекс: 1 ГРК. Система EGSE (Exhaust Gas Scrubbing Equipment) застосовується для ГД і ДДГ.

3. Танкер «Pegasus Voyager». Дедвейт – 155 720 т, довжина – 275 м, ширина – 48 м, висота борту – 23,7 м, швидкість ходу – 15 вузлів. ГД: 1 MAN B&W 6G70ME-C9,2 потужністю 17 110 кВт. ДЕС:1 ВГ Doosan DiG140×2500 кВт, 3 ДДГ Doosan Engine: 2×6L21/31x1160кВт, 1×8L27/38x2500кВт, 1 ДТГ STX Engine×400 кВт. ДКУ: 5 ДК: 2×Mission OL50×50 т/год, 2×Mission XW-S50×50 т/год, 1×Mission OC-TC1×1,6 т/год. Привід трьох вантажних насосів продуктивністю по 6600 $м^3$/год – паротурбінний. Рушійний комплекс: 1ГФК Ø 8,4 м, 2НПП×1200 кВт.

4. Танкер типу «Shuttle TOVE KNUTSEN». Дедвейт – 153 000 т, довжина – 278 м, ширина – 48 м, висота борту – 17,4 м, швидкість ходу – 14,5 вузлів. ГД: 1×B&W 6G70ME-C10,5 потужністю 16 190 кВт. ДЕС: HHI-HIMSEN 2×9H32 по 4320 кВт, 3×7H32/40 потужністю по 3360 кВт. ДКУ: ДК Kangrim 1x50 т/год, КК Kangrim 1×25т/год/1,4т/год, 3 вантажні насоси продуктивністю 4000 $м^3$/год, облаштовані електричним приводом. Рушійний комплекс: 1 ГРК Ø 8,7 м, 3 НПП:1×3100 кВт типу Azipod, 2×3100 кВт тунельного типу; 2 КПП:1×2200 кВт типу Azipod, 1×2200 кВт тунельного типу. Розрахунковий EEDI – 3,00 г CO_2/ТМ, нормативний – 3,24 г CO_2/ТМ.

5. Танкер-продуктовоз «SOLAR SHARNA». Дедвейт – 25 000 т, довжина – 169 м, ширина – 26 м, висота борту – 15,6 м, швидкість ходу – 14,5 вузлів. ГД: Hyundai-MAN B&W 1x6S46-B8,5 потужністю 7000 кВт. ДЕС: 3 ДДГ HHI 6H21/32×1050 кВт. ДКУ: 1 ДК Alfa Laval×18 т/год, 12 вантажних насосів продуктивністю 375 $м^3$/год, облаштовані електричним приводом. Рушійний комплекс: 1 ГФК Ø 5,8 м. Розрахунковий EEDI – 6,99 гCO_2/ТМ. Нормативний EEDI – 7,83 г CO_2 /ТМ.

Судна газовози – спеціалізовані судна, призначені для перевезення газів у зрідженому стані (рис. 1.12). Гази, що перевозяться цими суднами поділяються на наступні типи: зріджений природний (ЗПГ або LNG – Liquefied Natural Gas) та зріджений нафтовий газ (ЗНГ або LPG – Liquefied Petroleum Gas). Перевезення газів на суднах доцільно лише у зрідженому стані, так як об'єм природного газу при цьому зменшується у 600 разів, а нафтових у 200–300 разів.



а ***б***

Рис. 1.12. Газовози:
а – LNG «Gas de France Energy» на 75 000 м^3; ***б*** – LNG із вкладними танками

Природний газ приводиться до зрідженого стану за низької температури (–162 °С), перевезення його повинно здійснюватися в умовах глибокого охолодження. Судна для перевезення зрідженого природного газу носять назву *газовозів LNG*. Нафтові гази зріджуються підвищенням їх тиску до 2 МПа, або охолодженням до (–48 °С) за атмосферного тиску, або комбінацією обох способів. Судна для їх перевезення називаються *газовозами LPG.*

Для роботи теплових двигунів енергетичних установок газовозів зазвичай застосовується газ, що випаровується з вантажних танків під час його транспортування.

Вантажомісткість газовозів становить від 1000 до 200 000 м^3, швидкість – 16–20 вузлів, енергетична установка дизельна або паротурбінна.

Комплектація СЕУ сучасних газовозів

1. «Asia Vision» газовоз LNG. Вантажомісткість – 160 000 м^3, довжина – 275 м, ширина – 43 м, висота борту – 26,4 м, швидкість ходу – 14,5 вузлів. Застосована єдина електроенергетична установка. Головний двигун: 3×5850 кВт. Допоміжна котельна установка складається з двох котлів Alfa Laval продуктивністю по 5 т/год.

2. «Seishu Maru» газовоз LNG. Вантажомісткість – 136 740 м^3, довжина – 288 м, ширина – 49 м, висота борту – 26 м, швидкість ходу – 19,5 вузлів. Головний двигун: паротурбінний агрегат виробництва Mitsubishi Heavy Industries типу Frame A-49M потужністю 25 000 кВт. ДДГ: 1×Yanmar 8EY26LW потужністю 2300 кВт. Допоміжна котельна установка: 2 котла MSR-ZE паропродуктивністю по 45 т/год.

3. «Atlantic Gas» газовоз LPG. Вантажомісткість – 22 000 м^3, довжина – 159 м, ширина – 26 м, висота борту – 17,4 м, швидкість – 19 вузлів. Головний двигун: 6S50ME-C8,2 потужністю 7310 кВт. Допоміжна суднова

електростанція: 3×6L23/30H потужністю по 910 кВт. ДКУ: комбінований котел «Kangrim» паропродуктивністю 2 т/год/1 т/год.

4. «Colorado LNG». Вантажомісткість – 160 000 м^3, довжина – 294 м, ширина – 44 м, висота борту – 33 м, швидкість ходу – 20 вузлів. Застосована єдина електроенергетична установка. Головні двигуни: 4×Wartsila 9L50DF потужністю по 8775 кВт. Два головні пропульсивні електродвигуни по 13 600 кВт, підсумовуючий редуктор вихідною потужністю 26 250 кВт. ДКУ: два ДК Aalborg по 6,5 т/год та 2 УК паропродуктивністю по 2 т/год.

5. «Fuel LNG Bellina» бункерувальник LNG. Вантажомісткість – 7500 м^3, довжина – 119,5 м, ширина – 19,5 м, висота борту – 9,5 м, швидкість – 11 вузлів. Вантажні насоси 4×250 м^3/год з електричним приводом. ГД: Wartsila, 8L20DF потужністю 1000 кВт, W8L20DF потужністю 1100 кВт. Тип СЕУ – дизель-електрична. Рушійний комплекс: НПП 1×480 кВт, КПП 2×1000 кВт. Дійсний EEDI 17,7 г CO_2/ТМ.

1.3.3. Пасажирські судна

Серед широкої номенклатури суден для пасажирських перевезень найбільш поширеними є круїзні судна та пороми [1]. Пасажиромісткість круїзних суден багато в чому залежить від районів їх експлуатації і складає від 200–300 до 6000 осіб. Для таких суден характерна швидкість 20–22 вузли, потужність енергетичної установки, яка у більшості суден є єдиною електроенергетичною, досягає 120 000 кВт. Енергетична установка виконується з двома або трьома лініями валопроводу. Пропульсивна потужність складає 60–70 % від загальної потужності СЕУ. Широкого застосування на круїзних суднах набули рушійні комплекси «Azipod».

Комплектація СЕУ сучасних круїзних суден

1. «Queen Mary II», побудовано у 2004 р. Цьому судну надано статус RMS (Royal Mail Ship – «королівське поштове судно»). Під час розквіту трансатлантичного судноплавства цей статус мали найбільш швидкісні та надійні лайнери, які перевозили пошту по контракту з поштовою службою Великобританії (Royal Mail). Валова місткість – 150 000 т, довжина – 345 м, ширина – 41 м, висота – 72 м, осадка – 10 м, швидкість – 30 вузлів, пасажиромісткість – 2620 чол., чисельність екіпажу – 1300 осіб. Потужність енергетичної установки – 117 200 кВт, з якої на пропульсивні цілі витрачається 86 000 кВт. Енергетична установка складається із чотирьох дизелів Wartsila 16V46C потужністю по 16 800 кВт з чотирма електрогенераторами та двох ГТД GE LM2500 потужністю 25 000 кВт з двома електрогенераторами. Судно оснащено двома нерухомо встановленими та двома рухомими рушійними електродвигунами типу «Azipod» потужністю по 21,5 МВт. Маневреність судна забезпечують 3 НПП та 4 КПГ.



а



б



в

Рис. 1.13. Круїзні лайнери – найдосконаліші творіння сучасного суднобудування:
а – «Norwegian Gem»; ***б*** – «Queen Mary II»; ***в*** – «Grand Princess»

2. «Oasis of the Seas». Валова місткість – 225 280 т, пасажиромісткість – 6360 осіб, екіпаж – 2160 осіб. Енергетична установка складається із шести головних дизельних двигунів компанії «Wartsila»: 3×12V46D сумарною потужністю 96 800 кВт. Три гвинторульові комплекси «Azipod» потужністю по 20 МВт забезпечують судну швидкість 22 вузли. Маневреність судна забезпечується чотирма носовими підрулюючими пристроями потужністю по 5500 кВт. ДКУ: 2 ДК «Aalborg» паропродуктивністю по 20 т/год.

3. Круїзне судно «Scarlet Lady». Водотоннажність – 100 000 т, довжина – 277 м, ширина – 38 м, висота борту – 11,24 м, швидкість – 20 вузлів. Кількість пасажирів – 3212 осіб, екіпаж – 1095 осіб. ГД: 2×Wartsila 8L46DF, 2×Wartsila 12V46 потужністю відповідно 9600 та 14 400 кВт. Тип СЕУ – ДЕЕУ. ДКУ: 2 ДК SaacKe, 2×12 т/год, 2 УК SaacKe, 2×3,7 т/год. 2 УК SaacKe 2×2, 5т/год. Рушійний комплекс: 2×ГФК Ø5,7м, НПП 3×2500 кВт. Система «Exhaust – gas scrubbing equipment» застосована для ГД. Розрахунковий EEDI – 10,7 г CO_2/ТМ, нормативний EEDI – 13,58 г CO_2/ТМ.

Для поєднання залізничних та шосейних шляхів, розділених морями, протоками та затоками, існують спеціалізовані судна – морські пороми, які залежно від поєднуваних шляхів поділяються на *автомобільні та залізничні.*

Автомобільно-пасажирські пороми подібні до пасажирських суден, але відрізняються від них наявністю у середній частині гаражних приміщень для транспорту (рис. 1.14). Завантаження автомобілів відбувається по судновим відкритим апарелям. До поромів відносяться і «човникові» судна, на яких вантажні роботи здійснюються як з носа, так і з корми. Такі судна облаштовані кормовими й носовими ГРК, що дозволяє здійснювати колові рейси без розворотів у портах. Вони носять назву «Double ended» – судна подвійної дії. Для підвищення маневрених якостей пороми обладнуються підрулюючими пристроями, для підвищення рівня життєпридатності – потужними вентиляційними системами, які забезпечують 20–30-кратний обмін повітря на годину. Водотоннажність таких поромів 2–8 тис. т, вони беруть до 200 автомобілів і до 2000 пасажирів, швидкість їх сягає 20 вузлів.



а



б



в

Рис. 1.14. Автомобільно-пасажирські пороми:
а – «Alakos» типу «Double ended»;
б – «Stena Traveller»; ***в*** – «Iron Aven»

Комплектація СЕУ сучасних автомобільно-пасажирських поромів

1. «Tokitae». Водотоннажність – 4400 т, довжина – 110 м, ширина – 25 м, висота борту – 75 м, швидкість – 17 вузлів. Чисельність пасажирів – 1500 осіб, кількість автомобілів на двох вантажних палубах – 144. Головний двигун – два дизеля EMD 12-710 по 2240 кВт, ДЕС: 3 ДДГ DD Series 60 по 300 кВт.

2. «Sunflower Pearl». Водотоннажність – 20 000 т, довжина – 165 м, ширина – 27 м, висота борту – 14 м, швидкість – 23 вузли, кількість пасажирів – 748, автомобілів – 75, трейлерів – 147. Головні двигуни: 2×12 PC2-68 по 9000 кВт. ДЕС: 2 ВГ – 1380 та 1800 кВт, 2 ДДГ Daihatsu 8 DK20

по 1260 кВт. ДКУ: 1 ДК×4т/год; 2УКх2 т/год. Рушійний комплекс: 1 ГГ, 1 НПП×1260 кВт, 3 КПП×550 кВт.

3. «Armorique». Водотоннажність – 28 500 т, довжина – 168 м, ширина – 27 м, висота борту – 10,3 м, швидкість – 23 вузли. ГД: 2×MaK 12VM43C по 12 000 кВт. ДЕС: 2 ВГ по 2850 кВт, 3 ДДГ Wartsila 6L20C по 1200 кВт. Рушійний комплекс: 2 ГГ, НПП 2×1200 кВт, КПП 1×900 кВт.

4. «Color Superspeed». Дедвейт – 5425 т, довжина – 212,7 м, ширина – 25,8 м, висота борту – 14,8 м, швидкість – 27 вузлів. Кількість пасажирів – 1928 осіб, кількість автомобілів – 500 од. Головні двигуни: Wartsila 4×9L46 потужністю по 9600 кожен. ДЕС: 4 ДДГ Wartsila 6L32CR, 4×3000 кВт. ДКУ: 2 ДК Aalborg паропродуктивністю по 6 т/год. Рушійний комплекс: 2 ГГ, 2 НПП×2400 кВт, 1 КПП×1200 кВт.

Наприкінці 80-х на початку 90-х рр. минулого століття були введені до експлуатації *швидкісні автомобільно-пасажирські пороми* (ШАПП), до того ж показники їх застосування були настільки високими, що це привело до суттєвого зростання їх чисельності (рис. 1.15).



а ***б***

Рис. 1.15. Високошвидкісні автомобільно-пасажирські пороми:
а – «Bajamar Express» (швидкість 37,5 вузлів); ***б*** – «The Cotai Strip» (45 вузлів)

Дедвейт сучасних швидкісних автомобільно-пасажирських поромів становить 1000–2000 т, довжина – 60–120 м, швидкість – 35–50 вузлів. Вони виготовляються як однокорпусними, так і катамаранного типу. Особливістю ШАПП є значна потужність СЕУ для досягнення високих швидкісних характеристик.

Комплектація СЕУ сучасних автомобільно-пасажирських поромів

1. «The Grand Canal Shoppes». Катамаранний корпус, довжина – 48 м, ширина – 12 м, висота – 3,8 м, DW – 70 т, швидкість – 42 вузли, кількість пасажирів – 411 осіб. ГД: 4×MTU16V4000M70, 4×2320 кВт. Потужність

головних двигунів через редуктори VLJ 930 передається чотирьом водометним рушіям KaMeWa 63S11.

2. «Red Jet 6». Корпус катамаранного типу, довжина – 41 м, ширина – 11 м, висота борту – 3 м, водотоннажність – 132 т, швидкість – 38 вузлів, пасажирів – 279 осіб. ГД 4×10V2000M72 MTU, 4×900 кВт. ДЕС: ДДГ Perkins Sabre потужністю 63 кВт, потужність головних двигунів через чотири редуктори ZF3030D передається чотирьом водометним рушіям MJP 500 DRB.

3. «Villum Clausen». Корпус катамаранного типу, довжина – 86,6 м, ширина – 24 м, осадка – 32 м, дедвейт – 485 т, швидкість – 41 вузол. Головні двигуни ГТД 2×GE LM2500 сумарною потужністю 36 000 кВт.

4. «SSCE». Корпус тримаранного типу, довжина – 155 м, ширина – 32,2 м, осадка – 1,5 м, дедвейт – 1500 т, швидкість – 42 вузли. Дизель-газотурбінна установка CODAG у складі ГТД: 2×GE LM2500 та ДВЗ: 2×MTU 16V1163, сумарною потужністю 54 000 кВт.

1.3.4. Промислові судна

Промислові судна призначенні для добування, переробки та транспортування риби та морепродуктів. Вони поділяються на *добувні, добувно-переробні, переробні та обслуговуючі* [1].

Добувні судна розділяються як за знаряддям лову (сейнери, траулери, ярусні судна), так і за об'єктами промислу (рибо-, крабо-, креветко-, кальмаролови, для збирання водоростей тощо).

Сейнери – це риболовні судна, які ведуть ловлю «гаманцевим» неводом. Для цього використовується таке обладнання, як лебідка для вибирання сіткового тралу та машина для вибирання неводу. Водотоннажність сейнерів знаходиться в діапазоні 50–500 т, довжина – 18–35 м, потужність енергетичної установки (ДРА з ВОД) – 100–500 кВт, швидкість – 8–12 вузлів.

Траулери належать до найбільш поширених суден для лову тралом (сітковим мішкоподібним риболовецьким знаряддям) донних та пелагічних (що водяться у серединних шарах морів та океанів) риб, кальмарів, креветок. Вони поділяються на три групи: малі (довжина – 15–30 м, водотоннажність – 150–300 т), середні (довжина – 30–55 м, водотоннажність – 300–2000 т) та великі (довжина складає вище 55 м, водотоннажність – 2000–5000 т). Останні утворюють групу великих морозильних риболовних траулерів (ВМРТ).

На початку 70-х років минулого століття для автономного промислу у віддалених районах Світового океану були створені особливо потужні та великі траулери – супертраулери довжиною до 130 м, водотоннажністю до 10 тис. т, швидкістю 12–17 вузлів, за дальності плавання 6–8 тис. миль.

Вони обладнувались ваєрними лебідками з тяговим зусиллям 160–200 кН, канатоємністю 3–5 км, рефрижераторними трюмами до 3,5 тис. м^3 [1].

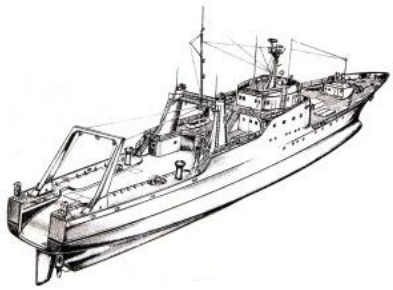
Залежно від характеру процесу тралення розрізняють *траулери з боковою схемою тралення*, які здійснюють спуск та підйом трала з борту та *траулери з кормовою схемою тралення*, коли операцію з тралом здійснюють за допомогою кормового сліпа (рис. 1.16, 1.17). Сліп – це повздовжня похила дільниця верхньої палуби у кормовій частині промислового судна, яка входить під поверхню води та обмежується боковими стінками.





а ***б***

Рис. 1.16. Траулери з боковою схемою тралення:
а – «HD-30»; ***б*** – судно «Emerald Gratia» для лову молюсків





а ***б***

Рис. 1.17. Траулери з кормовим траленням:
а – середній риболовний траулер (вигляд на сліп та робочу палубу);
б **–** середній риболовний морозильний траулер «Лазурний»

Потужність енергетичних установок великих траулерів може доходити до 5000 кВт, зважаючи на велику частину потужності, необхідну для забезпечення роботи трюмного обладнання. Для таких енергетичних установок типовим є застосування достатньо потужних валогенераторів.

Добувно-переробні судна – це промислові судна, які, окрім вилову об'єктів водного промислу, забезпечують переробку улову в готову продукцію або напівфабрикати. Це траулери-рибозаводи, консервні,

посольно-свіжові траулери (рис. 1.18). До речі, усі ВМРТ, окрім вилову риби, виготовляють морожену продукцію, пресерви, консерви.

До *переробних суден* відносяться промислові судна, що переробляють на готову продукцію об'єкти водного промислу, які приймають від добувних суден у вигляді натурального продукту – сировини або напівфабрикату. Такі судна обладнуються рефрижераторними трюмами великої ємності, вони несуть на собі запаси палива, провізії, промислового спорядження для забезпечення потреб флотилій добувних суден.

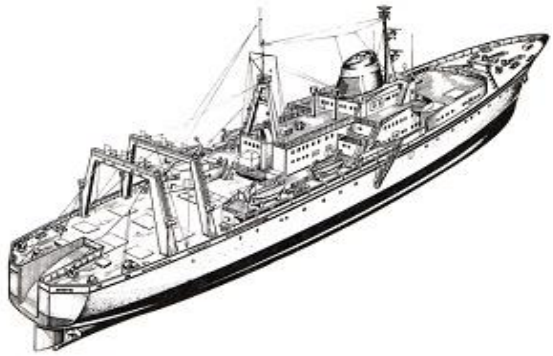


Рис. 1.18. Траулер-рибозавод

До переробних суден належать промислові плавучі бази різного призначення: універсальні, консервні, краборибообробні, виробничі рефрижератори.

Як головні двигуни на плавучих базах застосовуються малообертові та середньообертові двигуни, але існують і поодинокі приклади застосування парових турбін: на плавучій базі «Восток», яка створювалася як носій тунцеловних ботів, установлені парові ГТЗА ТС-1 [1].

Водотоннажність промислових плавучих баз – 2–40 тис. т, довжина – 70–225 м, потужність – СЕУ 5–20 тис. кВт, швидкість – 11–20 вузлів.

До обслуговуючих промислових суден належать: приймально-транспортні, пошукові, науково-промислові та інші судна.

Комплектація СЕУ сучасних промислових суден

1. Траулер з кормовим траленням «Holmoy». Довжина – 69,7 м, ширина – 16 м, висота – 9,25 м. Водотоннажність – 4300 т, швидкість – 17,8 вузлів. Головний двигун: Bergen B33/45L9P потужністю 5400 кВт, ВГ потужністю 2200 кВт. Рушійний комплекс: 1 ГРК Ø3,9 м у насадці, НПП 1×590 кВт.

2. ВМРТ типу «Пулковський меридіан». Довжина – 104 м, ширина – 16 м, висота – 10,2 м, водотоннажність – 5720 т, швидкість

руху – 14,3 вузли, температура в рефрижераторних трюмах (–28 °С). Головний двигун: 2×6РС2-5, 2×2580 кВт, 2 ВГ по 1500 кВт, ДЕС: 3 ДДГ×200 кВт, 1 АДГ×100 кВт. Рушійний комплекс: ГРК у насадці.

3. Рибопромислова база «Восток» водотоннажністю 43 400 т. Була носієм 14 тунцеловних ботів водотоннажністю по 70 т, які забезпечували вилов тунця промисловими знаряддями ярусного типу. Після облову певного району океану боти підіймали на борт і переміщували разом з базою на нову промислову дільницю. Два головні паротурбозубчасті агрегати ТС-1 потужністю по 9600 кВт забезпечували швидкість 18,5 вузлів. Допоміжна електростанція складалась з чотирьох паротурбогенераторів по 1500 кВт, двох стоянкових дизель-генераторів 6ЧН 31,8/33 по 750 кВт, двох аварійних дизель-генераторів 6ЧН15/18 потужністю по 110 кВт.

4. Приймально-транспортний рефрижератор «Frio Antarctic». Дедвейт – 4910 т, довжина – 126 м, ширина – 18 м, висота борту – 10 м, швидкість – 14 вузлів, ГД:1×6ДКРН 45/120-7 потужністю 3970 кВт. ДЕС:3 ДДГ 8ЧН25/34 по 500 кВт, 1 АДГ 6ЧН15/18 потужністю 100 кВт. Об'єм рефрижераторних трюмів – 4×6650 м^3, температура: –28 °С, –8 °С, +3 °С.

5. Траулер з кормовим траленням «Sunderoy». Довжина – 77,2 м, ширина – 17 м, висота борту – 6,5 м, водотоннажність – 5570 т, швидкість – 16 вузлів. Головний двигун: Bergen 333 45V12 потужністю 7200 кВт.

Валогенератор / двигун – B5V560LC6 потужністю 2950/2000 кВт. Допоміжний ДГ потужністю 550 кВт. Рушійний комплекс: ГРК Ø4,2м у насадці, НПП 1×640 кВт.

6. Судно для вилову та обробки морських гребінців «Lady Comeau III». Довжина – 49,7 м, ширина – 12 м, висота борту – 5,4 м, водотоннажність – 1530 т, швидкість – 11 вузлів. ГД: 1×МаК 6М25Е потужністю 2100 кВт. Рушійний комплекс: 1 ГРК Ø3,2м у насадці. Рефрижераторний трюм 504 м^3, температура (–30 °С).

1.3.5. Службово-допоміжні судна

Службово-допоміжні судна – це судна, призначені для матеріально технічного забезпечення флоту та служб, які організовують його експлуатацію. Вони поділяються на *обслуговуючі* та *службові.* До обслуговуючих належать криголами, буксирні, рятувальні, пожежні судна, судна навігаційного забезпечення (гідрографічні та лоцмейстерські), лоцманські, суднопідйомні судна та плавучі маяки.

Як головний двигун на криголамах застосовуються СОД та парові турбіни, комбіновані дизель-газотурбінні установки, завжди з електричною передачею на ГРК. Сучасні криголами обладнують 2–3 кормовими або двома кормовими та двома носовими гребними гвинтами. Поширення

набуло використання на криголамах ГРК «Azipod». Для криголамів перспективним є застосування АЕУ [1].

Водотоннажність найбільших сучасних криголамів з АЕУ (рис. 1.19) складає 25 000 т, сумарна потужність головних парових турбін – 55 МВт.



Рис. 1.19. Криголам з атомною енергетичною установкою «Арктика»

Буксирні судна (буксири) забезпечують переміщення несамохідних або самохідних суден (у яких відсутня самостійна хода) та інших плавучих об'єктів. За призначенням вони поділяються на три групи: *транспортувальні*, що забезпечують рух несамохідних суден, доків, ПБУ; *буксири-кантувальники*, які допомагають самохідним суднам переміщуватись в умовах стиснених акваторій портів та у вузькостях; *буксири-рятувальники*, які забезпечують буксирування аварійних суден і мають обладнання для відкачування води з відсіків пошкоджених об'єктів, боротьби з пожежами, проведення екстреного ремонту, відновлювальних робіт [1].

За районом плавання буксири поділяються на *океанські*, *морські*, *рейдові*, *озерні* та *річкові*, за способом переміщення на *буксири-кантувальники* (такі, що тягнуть) та на *штовхачі* (такі, що штовхають, переміщують баржі перед собою) (рис. 1.20, 1.21).

Комплектація СЕУ криголамів

1. Криголам USCGC «Polar Star». Водотоннажність – 13 000 т, довжина – 122 м, ширина – 24,5 м, висота борту – 9,4 м, швидкість – 18 вузлів на чистій воді, 3 вузли за товщини льоду – 2 м.

Тип енергетичної установки CODLOG, автономність 28 200 миль за швидкості 13 вузлів, 16 000 миль за 18 вузлів. Головні двигуни: 6 дизельних двигунів 16V51DF потужністю по 2200 кВт, які приводять три генератори електричного струму; три ГТД FT4A-12 потужністю по 19 000 кВт, які працюють на 3 електрогенератора. Рушійний комплекс: 3 ГРК.





а ***б***

Рис. 1.20. Буксирні судна:
а – буксир-кантувальник «SMT Panama»; ***б*** – океанський буксир «Romulo»



Рис. 1.21. Буксир-штовхач «Melin R. Todd»

2. Криголам проєкту 1052 «Арктика». Водотоннажність – 33 450 т, довжина – 147,9 м, ширина – 30 м, висота борту – 17 м, швидкість на чистій воді – 18,6 вузлів, 2 вузи – за товщини льоду 3 м. Головна енергетична установка – атомна. Два ядерні реактори ОК-900А потужністю по 171 МВт забезпечують роботу 2 парових ГТЗА потужністю по 20 000 кВт, які приводять три ГФК.

3. Криголам «Laura Bassi». Водотоннажність – 5455 т, довжина – 80 м, ширина – 17 м, висота борту – 9 м, швидкість – 14 вузлів, автономність – 40 000 миль, 130 діб.

Енергетична установка: ДЕЕУ. ГД: 2 Bergen Diesel по 2550 кВт. 1 КПП на 850 кВт та КПП «Azimuth» на 850 кВт.

4. Криголам «RP James Clark Ross» (з 2021 р. – «Ноосфера»). Водотоннажність – 7767 т, довжина – 99,0 м, ширина – 18,5 м, висота борту – 9 м, швидкість – 12 вузлів, автономність – 57 днів. Енергетична установка – дизель-електрична. Рушійний комплекс: 1 ГРК потужністю

7300 кВт, азимутальний носовий та кормовий підрулюючі пристрої з упором 10 та 4 т.

5. Криголам науково-дослідне судно «Azaon». Валова місткість – 9071 т, дедвейт – 6000 т, довжина – 110 м, ширина – 19 м, висота борту – 9,9 м, швидкість руху – 12 вузлів. Тип СЕУ – ДЕЕУ. ГД: 4×7L32/40 – двигуни STX/MAN потужністю по 2400 кВт. ДКУ: 2 ДК Kangrim – 2×2,5 т/год. Рушійний комплекс: 2 ГРК «AZIPOD» 2×2500 кВт, НПП 2×1200 кВт.

Комплектація СЕУ сучасних морських буксирів

Потужність ЕУ океанських буксирів може перевищувати 20 МВт, швидкість більшості морських буксирів становить 12–15 вузлів (рятувальників до 20 вузлів), тягове зусилля – від 10 до 250 т. До складу СЕУ буксирних суден входять середньо- та високообертові дизелі з реверс-редукторними або електричними передачами. Рушії – ГГ фіксованого або регульованого кроку. Поширення на буксирах набули повноповоротні гвинторульові колонки [1].

1. Буксир «Luisa Neri». Водотоннажність – 815 т, довжина – 32,7 м, ширина – 12,8 м, висота – 5,35 м, швидкість – 14,3 вузли. Тягове зусилля – 80,8 т. ГД: 2×3516C HD Caterpillar, 2×5050 кВт. Рушійний комплекс: 2 ГРК фірми «Роллс-Ройс».

2. Гібридний буксир «NOORDZEE». Особливістю даного проєкту є те, що надмірна електрична потужність, яка може утворюватися під час руху судна, скидається на електричну батарею, що забезпечує як можливість рухатись малим ходом, так і загальносуднові потреби на ходу та в порту. Водотоннажність – 590 т, довжина – 28,6 м, ширина – 10 м, висота борту – 4,6 м, швидкість: 13,2 вузли (головні двигуни), 8,7 вузлів (валогенератор), 4 вузли (батареї – тільки протягом однієї години). Тягове зусилля: 61 т – під час руху вперед, 56,5 т – під час руху назад. Тип СЕУ: гібридна. Головний двигун: 2×MTU16V4000M63R1 потужністю по 1840 кВт. Валогенератор: 2×460 кВт. Рушійний комплекс: 2 ГРК азимутального типу.

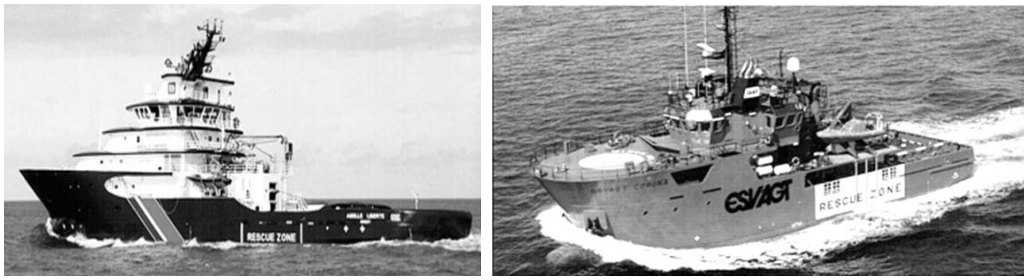
3. Буксир «Sea Power». Зі зменшеним рівнем шуму та вібрації. Водотоннажність – 2204 т, довжина – 43 м, ширина – 14,3 м, висота борту – 8 м, швидкість ходу – 12 вузлів (сервісна), 15 вузлів (максимальна). Тип установки – ДЕУ. ГД: Wartsila W8L32, 2×4640 кВт. ДЕС: 2 ВГ Marathon 433 PSL6216 потужністю по 250 кВт, 3 ДДГ John Deere 6690SFM85 3×250 кВт. Рушійний комплекс: 2 ГРК по 2474 кВт.

4. Буксир-штовхач «Зубр». Водотоннажність – 2400 т, довжина – 51,6 м, ширина – 11,6 м, висота борту – 3,3 м, швидкість – 14 вузлів, тягове зусилля – 25 т. Тип СЕУ: ДЕУ. ГД: 6ЧН18/22, 2×883 кВт. ДЕС: 2 ДДГ×150 кВт, стоянковий ДГ: 6Ч12/14, 1×150 кВт.

5. Буксир «DON INDA». Один з найпотужніших буксирів з тяговим зусиллям 250 т. Буксир оснащений трьома водопінними стволами, до його складу входить танк місткістю 1730 м^3 для прийняття емульсії палива з водою під час ліквідації розливу палива. Довжина – 80 м, ширина – 15,25 м, висота – 8,25 м, швидкість – 17,5 вузлів. Тип СЕУ: ДЕУ. ГД: 4×Bergen B32/40×4000 кВт. По два двигуна працюють на один гребний гвинт. До вихідного вала двигуна з кожної пари приєднаний пожежний насос. ДЕС: 2 ДДГ потужністю по 736 кВт. Пропульсивний комплекс: дві ГРК із Z-подібною передачею потужності 2 КПП, 4 НПП азимутального типу.

Рятувальні судна поділяються на *універсальні* та *спеціалізовані. Універсальні рятувальні судна* призначені для виконання всіх можливих різновидів аварійно-рятувальних робіт: буксирування та зняття з мілини, гасіння пожеж, ліквідація пробоїн та відкачування води, зняття людей із судна, що гине. Ці судна обладнуються потужним буксирним пристроєм, відливними та протипожежними засобами, водолазним та глибоководним обладнанням і спорядженням (рис. 1.22). Усі такі судна забезпечуються системами динамічного позиціонування для утримання судна на місці проведення робіт. Водотоннажність універсальних рятувальних суден складає 1000–10 000 т, швидкість – 17–20 вузлів, енергетична установка – ДРЕУ або ДЕЕУ.

Спеціалізовані рятувальні судна – це рятувальні буксири та судна для рятування підводних човнів [1].



а ***б***

Рис. 1.22. Рятувальні судна:
а – «Abeille Liberty» – рятувальне судно з тяговим зусиллям 200 т;
б – «Esvagt Corona» – рятувальне судно з дизель-електричною енергетичною установкою

Пожежні судна призначені для боротьби з пожежами на суднах, берегових спорудах, морських бурових установках. Ліквідація пожежі забезпечується водяними пожежними системами з насосами продуктивністю до 10 тис. м^3/год води, пожежними лафетними стволами з довжиною

струменя до 200 м. Привід таких насосів здійснюється автономно від спеціальних дизелів, або за рахунок відбору потужності від ГД [1].

Водотоннажність таких суден до 2000 т, швидкість – 12–20 вузлів, енергетична установка – дизельна двовальна із СОД.

Комплектація СЕУ рятувальних суден

1. Рятувальне судно «Abeille Liberty». Водотоннажність – 3249 т, довжина – 89 м, ширина – 16,5 м, висота борту – 8 м, швидкість ходу – 19,9 вузлів. Упор під час буксирування – 200 т. Тип головної СЕУ: ДЕЕУ. ГД: 4×4000 кВт. ДЕС: ДДГ 3×615 кВт. Рушійний комплекс: 2 ГРК, НПП 2×885 кВт, КПП 2×515 кВт.

2. Рятувальне судно «Nordic». Водотоннажність – 3374 т, довжина – 78 м, ширина – 16,4 м, осадка – 6,6 м. Тип СЕУ: ДЕЕУ. ГД:2×MTU 20V8000 M7IL потужністю по 8000 кВт.

3. Рятувальне судно «Esvagt Corona». Водотоннажність – 937 т, довжина – 44 м, ширина – 11,5 м, висота борту – 6 м. Тип ДЕУ: ДРУ із Z-подібною передачею. ГД: Caterpillar 3412C, 4×500 кВт. Рушійний комплекс: 2 ГРК, НПП 1×300 кВт.

4. Рятувальне судно «Ігор Бєлоусов». Водотоннажність – 5310 т, довжина – 105,1 м, ширина – 12,2 м, висота борту – 10,1 м, швидкість ходу – 15 вузлів. Тип СЕУ: ДЕЕУ. Склад: 4 ДГ ДГВА-1680 по 1680 кВт, 2 ДГ ДГВА 1080 по 540 кВт, два гребні електродвигуна Schorch 2×2400 кВт. Рушійний комплекс 2 гвинторульові колонки «Aquamaster US 305 FP», 2 НПП×580 кВт.

5. Рятувальне судно «USNS Grapple». Водотоннажність – 3317 т, довжина – 78 м, ширина – 16 м, висота борту – 5,2 м, швидкість – 15 вузлів. ГД: 4 Caterpillar 399 потужністю по 3100 кВт. Рушійний комплекс 2 ГРК, тягове зусилля 68 т. Судно оснащено вантажними системами вантажопідйомністю до 150 т, системами пожежогасіння з трьома стволами продуктивністю по 1000 л/хв, глибоководним обладнанням «Scuba», для водолазних робіт на глибинах до 90 м, барокамерами, пілотуємим підводними апаратом.

6. Пожежне судно «Protector». Водотоннажність – 587 т, довжина – 32,9 м, ширина – 10,7 м, висота борту – 4,4 м, швидкість ходу – 13 вузлів. Тип СЕУ: ДЕУ. ГД: 2 Caterpillar 3512C по 1500 кВт. ДЕС: 1 ДДГ CAT C7,2 потужністю 150 кВт. Привід пожежних насосів здійснюється від головних двигунів та допоміжного двигуна CAT C12. Особливістю даного проєкту є велика потужність семи пожежних насосів та моніторів (найбільший монітор 54 т/хв). Загальна продуктивність системи пожежогасіння складає 186 т/хв. Пропульсивний комплекс: 2 ГРК.

До обслуговуючих суден відносяться також *лоцмейстерські судна* – для установлення, зняття та обслуговування навігаційного обладнання на водних шляхах. Їх водотоннажність складає 2–5 тис. т, потужність ДЕУ становить 500–2000 кВт. Лоцмейстерські судна можуть забезпечувати оперативне лоцманське обслуговування транспортних суден у портах та акваторіях.

Лоцманське судно – це плавуча, самохідна станція з необхідними судновими запасами, житловими та службовими приміщеннями для лоцманів (20–30 осіб), які на ній чергують, представників портових органів влади (рис. 1.23). Водотоннажність таких суден до 1000 т, найбільш поширена ДЕУ або ДРУ з ГРК. Автономність до 2000 миль.



Рис. 1.23. Лоцманське судно

Лоцманські катери безпосередньо обслуговують транспортні судна на зовнішньому рейді за дальності проводки до 15 миль.

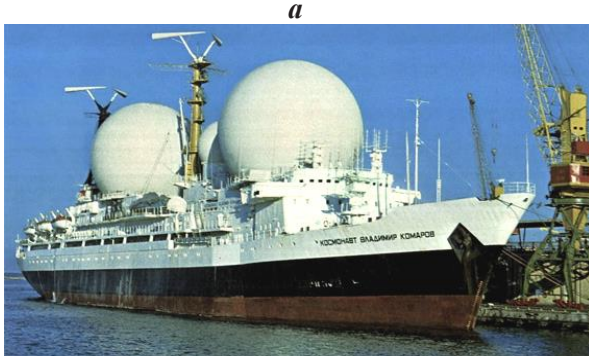
Велику групу службових суден утворюють науково-дослідницькі (НДС), медико-санітарні та навчальні судна (рис. 1.24). Основним призначенням НДС є проведення наукових експедицій з метою здійснення фундаментальних та прикладних досліджень у водному середовищі, в атмосфері та космічному просторі [1].

Усесвітньо відомі НДС «Glomar Challenger», «Oceanographer», «Parsthern», «Calypso», «Академік Вавілов», «Космонавт Юрій Гагарін», підводні науково-дослідні апарати (НДА) «Deap Jeap», «Ben Franklin», «Alvin», «Paisis», «Archimed», «Мир», «Сєвєр».

НДС оснащені потужним комплексом апаратури для проведення наукових досліджень. Потужність енергетичної установки може доходити до 20 000 кВт, переважний тип СЕУ – ДЕЕУ. Усі НДС і науково-дослідні апарати обладнані системами динамічного позиціонування, до складу яких входять підрулюючі пристрої з електричним приводом.



а



б

Рис. 1.24. Науково-дослідницькі судна:
а – «Космонавт Юрій Гагарін»; ***б*** – «Космонавт Володимир Комаров»

1.3.6. Судна технічного флоту

Призначені для технічного обслуговування суден, портового господарства, водних шляхів та забезпечення комплексу робіт з освоєння Світового океану.

До першої групи суден технічного флоту відносяться плавучі крани, доки, майстерні, днопоглиблювальні судна, судна для очищення акваторії та інші судна для технічного обслуговування.

Плавучі крани – це підйомні крани, установлені на понтонах, вони призначені для навантажувально-розвантажувальних, суднопідйомних, піротехнічних та інших робіт. Морські та річкові крани бувають як самохідними (швидкість до 8 вузлів), так і несамохідними (рис. 1.25).

Вантажопідйомність універсальних плавучих кранів, зайнятих на масових вантажних роботах досягає 1000 т, виліт стріли від борту становить 25–30 м, висота підйому гака над рівнем води до 60 м.

Вантажопідйомність поворотних кранів, що використовуються під час монтажу стаціонарних споруджень на морських родовищах нафти й газу та неповоротних вантажних кранів, становить 3000–5000 т, виліт стріли

до 35 м, висота підйому гака до 110 м. На плавучих кранах використовуються ДЕЕУ, як рушії – гвинторульові поворотні колонки, крильчасті рушії [1].



Рис. 1.25. Плавучий кран

Плавучий док (рис. 1.26) призначений для підйому з води судна, яке знаходиться на плаву, для подальшого ремонту, транспортування або спуску його на воду.





а ***б***

Рис. 1.26. Плавучі доки:
а **–** з вантажопідйомністю 25 000 т; ***б*** **–** з вантажопідйомністю 8500 т

Основним елементом конструкції плавучого дока є понтони, розділені переборками на баластні відсіки. На понтоні розташовані баластні насоси, призначені для закачування та відкачування забортної води у відсіки дока, або з них. Під час закачування води понтон занурюється, а відкачування – виринає з води. Палуба понтона – стапель-палуба обладнується

доковими опорними пристроями для розміщення судна, обводи яких відповідають його обводам. Після занурення дока судно заводиться між водотоннажними баштами і встановлюється над опорними пристроями. Під час відкачування води з баластних відсіків док випливає до контакту опорних пристроїв з днищем судна.

Вантажопідйомність плавучих доків досягає 100 тис. т, довжина – до 300 м, ширина стапель-палуби – до 60 м. Приводом баластних насосів є дизель-генератори потужністю до 500 кВт, які забезпечують енергією всі загальні докові потреби [1].

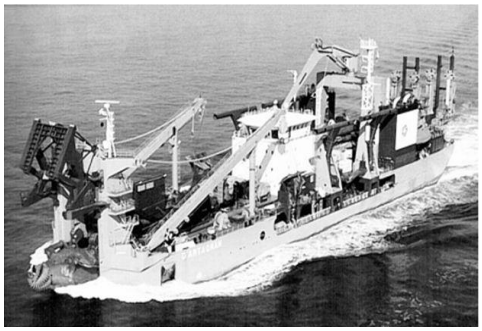
Днопоглиблювальні судна (ДПС) призначені для підтримання певних глибин річкових морських фарватерів та акваторії портів, а також для використання під час будівництва гідротехнічних споруд (рис. 1.27). Залежно від способів відділення та підйому ґрунту ДПС поділяються на *рефулерні (землесоси)* та *землечерпальні (земснаряди)*. Основними елементами ДПС є металевий понтон з надбудовою, у якому розміщена енергетична установка, робочий орган, засоби транспортування ґрунту до місця звалища та службово-допоміжні приміщення.



а



б



в

Рис. 1.27. Днопоглиблювальні судна:
а – «Niko Nikoladze» – самовідвізний земснаряд; ***б*** – землесос з механічним розпушувачем; ***в*** – землесос «D'Arragnian» для роботи на глибинах до 35 м

Робочим органом земснарядів є рама із черпаками на нескінченому, пластинчастому ланцюгу, які опускаються у воду через проріз у носовій та кормовій частині судна. Піднятий черпаками ґрунт зливається до ґрунтового колодязя та через спеціальний лоток потрапляє на судно, що відвозить ґрунт, або до трюму, звідки грунт, змішаний з водою, подається потужними насосами до транспортувального плавучого пульпопроводу. На відносно легких ґрунтах застосовують *землесосні судна* без розпушувача або з механічними чи гідравлічними розпушувачами, які через всмоктувач засмоктують ґрунт до трубопроводу, поєднаного з відцентровим насосом. По плавучому трубопроводу – рефулеру – суміш ґрунту з водою подається насосом до місця звалища на відстань до 600 м від судна.

Ерліфт є одним із різновидів землесосів. На ДПС, що працює за цією технологією, всмоктування ґрунту відбувається внаслідок підведення до всмоктувальної труби стисненого повітря, яке захоплює за собою пульпу. Продуктивність земснарядів до 1500 м³/год, землесосів – до 5000 м³/год, ерліфтів – до 7000 м³/год, глибинне черпання (всмоктування) до 40 м. ДПС обладнуються виключно ДЕЕУ із СОД.

Кабелеукладальні судна (КУС) прокладають, ремонтують та обслуговують морські й океанські лінії зв'язку та електропостачання. Прокладання і підйом кабелю забезпечуються кабельними машинами лебідкового типу та багатошківними з електроприводами вантажопідйомністю до 30 т.

КУС обладнуються водолазними станціями, підводним телебаченням, пристроями для зрощування кабелів. Водотоннажність таких суден складає 2–20 тис. т, швидкість – до 15 вузлів, під час прокладання кабелю – до 8 вузлів. На цих суднах застосовуються переважно ДЕЕУ з потужними електростанціями.

Комплектація енергетичних установок сучасних КУС

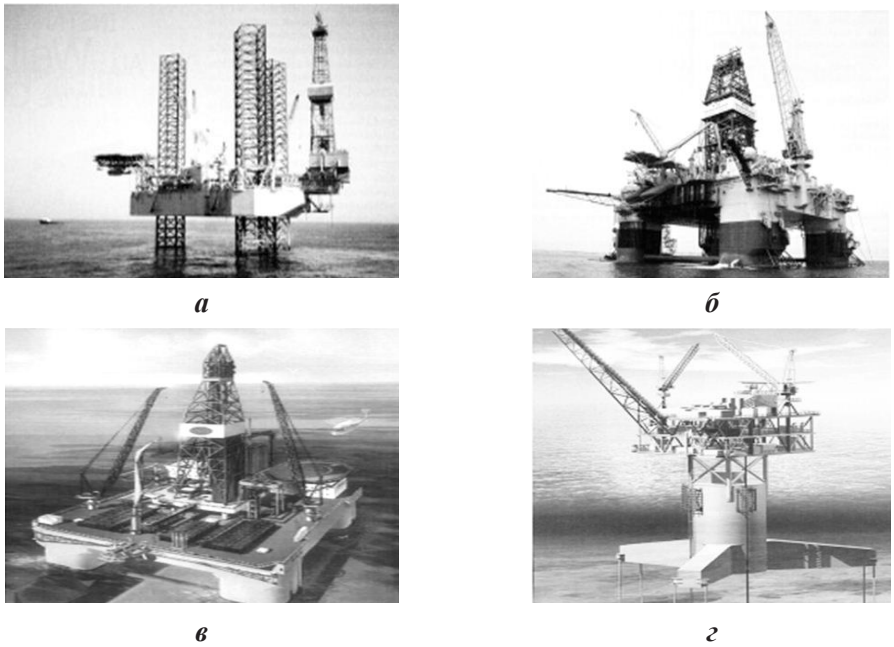
1. Кабелеукладальне судно «Pierre de Fermat». Призначене для укладання та ремонту підводних кабелів, включно скловолоконних для телекомунікаційного сектора та енергетичних кабелів (зокрема, міжвітрових з'єднань для офшорних електростанцій). Виконує всі необхідні операції та роботи з укладання кабелю, включно огляд або інспекцію ґрунту, нарізання траншей. Дедвейт судна – 40 000 т, довжина – 400,1 м, ширина – 21,5 м, висота борту – 8,8 м, швидкість – 15 вузлів, тягове зусилля – 80 т. Максимальне кабельне навантаження 2300 т. Тип СЕУ: ДЕЕУ. ГД: 4CAT3516C-НД×2250 кВт. ДДГ: 1 CAT×715 кВт. Пропульсивний комплекс: два гвинторульові комплекси типу «Azipod», потужністю по 2500 кВт, НПП 3×880 кВт (один азимутальний, два тунельні).

До суден технічного флоту, призначених для забезпечення робіт з освоєння Світового океану належать: плавучі бурові установки, бурові судна, кранові судна, судна для обслуговування бурових установок, судна для забезпечення підводних технічних робіт, плавучі електростанції, трубоукладальні судна, судна для видобування корисних копалин.

Плавучі бурові установки (ПБУ) призначені для проведення бурових робіт на водних акваторіях, вони мають водотоннажні конструкції для забезпечення плавучості та остійності. Існують наступні види ПБУ: *занурені, напівзанурені та самопідйомні* (рис 1.28.).

Занурена плавуча бурова установка (ЗПБУ) занурюється на точці буріння до осадки, за якої нижній корпус опирається на дно. У разі переміщення ЗПБУ на іншу точку буріння з нижнього корпусу відкачують баласт і установка спливає. Експлуатуються ЗПБУ на глибинах 15–50 м.

Напівзанурена плавуча бурова установка (НПБУ) під час буріння знаходиться на плаву. До її складу входять: водотоннажні понтони різної конфігурації, розташовані нижче від рівня води, та надводний корпус з виробничими та житловими приміщеннями, що закріплюються на стабілізуючих колонах, які забезпечують остійність установки.



а ***б*** ***в*** ***г***

Рис. 1.28. Плавучі бурові установки:
а – «Global Santa Fe» – самопідйомна бурова платформа; ***б*** – «Driller II» – напівзанурена суперглибоководна бурова платформа; ***в*** – «D80» – напівзанурена бурова платформа; ***г*** – «Marco Polo» – напівзанурена платформа з натяжними зв'язками

Кількість понтонів – до п'яти. Вишка розташовується у центрі НПБУ. Над точкою буріння платформа утримується завдяки системі динамічного позиціонування, яка забезпечує можливість буріння за висоти хвиль до 8 м. Іноді НПБУ облаштовуються рушієм для поліпшення маневрених якостей під час перегону. Такі установки забезпечують буріння свердловин за глибини моря до 3000 м. Енергозабезпечення НПБУ здійснюється за допомогою ДГ.

Самопідйомна плавуча бурова установка (СПБУ) у робочому стані підіймається над поверхнею моря на колонах, що вдавлюються у ґрунт. Основними елементами СПБУ є водотоннажний корпус-понтон, три або чотири опорні колони, бурова вишка та підйомні механізми. У корпусі розташовані приміщення для устаткування, запасів, житлові приміщення. З використанням СПБУ ведуть розвідувальне буріння на глибинах 15–120 м. Енергетична установка СПБУ – ДЕЕУ.

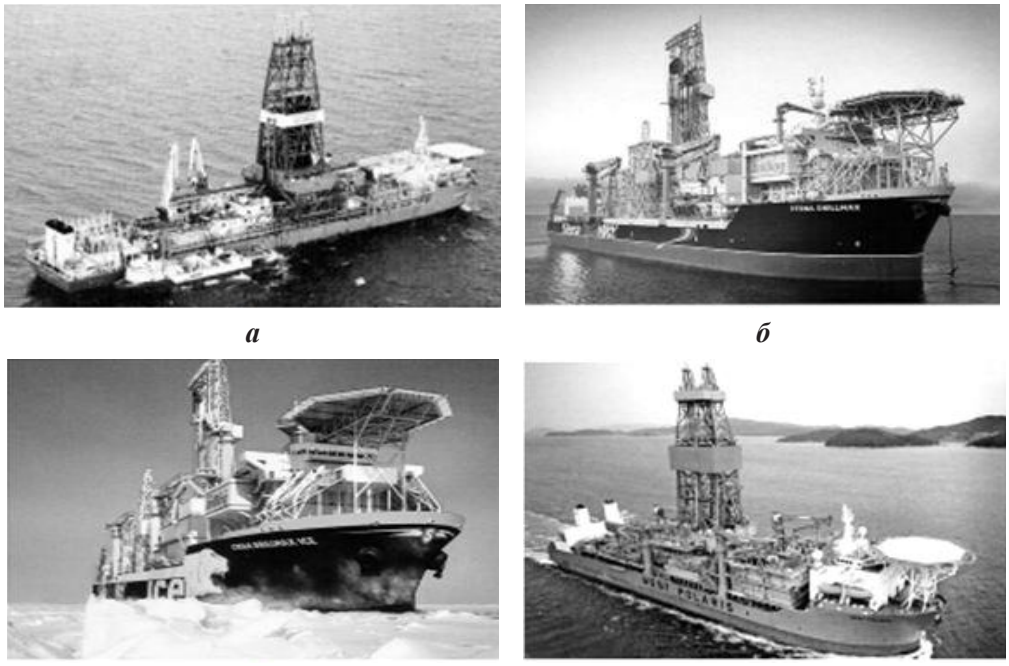
Бурові судна призначені для буріння пошуково-розвідувальних свердловин на значних глибинах (до 9000 м). За архітектурно-конструктивним типом бурові судна – це однокорпусні судна з носовою та кормовою надбудовами та буровою вишкою, розташованою посередині судна (рис. 1.29). Усі бурові судна облаштовуються системами динамічного позиціонування з використанням підрулюючих пристроїв, потужність енергетичної установки – 17…50 тис. кВт (найчастіше це ДЕЕУ з СОД).

Комплектація енергетичних установок сучасних бурових суден

1. Бурове судно «West Polaris». Призначене для буріння розвідувальних свердловин глибиною до 9000 м за висоти хвиль 5,8 м та швидкості вітру 50 вузлів. Витримує хвилі висотою до 11,4 м та вітрове навантаження швидкістю 50 вузлів. Бурові операції здійснюються через буровий колодязь розмірами 25,6×12,48 м. Водотоннажність – 96 400 т, довжина – 228 м, ширина – 42 м, висота борту – 19 м, швидкість – 11,5 вузлів. Тип СЕУ: ДЕЕУ. ГД: Wartsila 16V32 6×7680 кВт. Пропульсивний комплекс: 6 гвинторульових комплексів «Azipod» по 4500 кВт.

2. Бурове судно «Deepwater Ascard». Призначене для буріння розвідувальних свердловин глибиною до 12 000 м за глибини води до 3700 м. Водотоннажність – 103 000 т, довжина – 238 м, ширина – 42 м, висота борту – 19 м, швидкість – 12,6 вузлів. Тип СЕУ: ДЕЕУ. ГД: HHI EMD 14H32/40V 6×7000 кВт. Пропульсивний комплекс: 6 гвинторульових комплексів типу «Azipod» з гвинтами регульованого кроку Ø 4,1 м × 5500 кВт.

Кранові судна – це самохідні судна технічного флоту, оснащені одним або декількома підйомним кранами, призначені для доставки та монтажу обладнання на морські родовища нафти та газу, монтажу корпусу стаціонарних бурових платформ, для виконання гідротехнічних та інших робіт на морських акваторіях.



а *б*

в *г*

Рис. 1.29. Бурові судна:
а **–** «Discovery Enterprise»; ***б*** – «Stena Drillmax»; ***в*** – «Stena Drillmax Ice»; ***г*** – «West Polaris»

На відміну від плавучих кранів, кранові судна (рис. 1.30) мають значні площі для перевезення великовагового та великогабаритного устаткування на верхніх палубах, вони мають більш високу мореплавність. ДЕЕУ забезпечує їх перехід та роботу на нафтогазових родовищах. Вантажопідйомність кранового судна доходить до 5 тис. т, швидкість 12–15 вузлів, виліт стріли до 40 м, висота підйому гаку від рівня води до 90 м, потужність ДЕЕУ із СОД – до 30 000 кВт [1].

Комплектація енергетичної установки сучасного кранового судна

1. Кранове судно «Oleg Strashnov». Дедвейт – 50 870 т, довжина – 189 м, ширина – 52,5 м, висота борту – 19,2 м, швидкість ходу – 14,4 вузли. Вантажопідйомність – 32 000 т. ГД: Wartsila 6×9L32 потужністю по 4500 кВт. На судні застосована єдина електроенергетична установка, ДЕС відсутня. ДКУ: 1 КК Green Shazhov паропродуктивністю 3,2 т/год. Рушійний комплекс: 2 ГЕД по 5500 кВт з 2 ГРК.

Судна забезпечення підводно-технічних робіт оснащені комплексом обладнання для тривалого перебування водолазів під водою (рис. 1.31). До спеціального обладнання належать декомпресійні камери зі

шлюзовими відсіками, водолазний ковпак або транспортувальна камера, шахти у центральній частині судна для їх спуску і підйому, потужні вантажні пристрої.



а ***б***

Рис. 1.30. Кранові судна:
а – з вантажопідйомністю 5000 т; ***б*** – з вантажопідйомністю 25 000 т



а ***б***

Рис. 1.31. Судна забезпечення підводно-технічних робіт:
а – «Superior Offshore»; ***б –*** «Helix Energy»

Утримання судна в точці проведення підводно-технічних робіт забезпечується системою динамічного позиціонування або системою якорів. Такі судна можуть використовуватися для постачання морських об'єктів, буксирування або перевезення обладнання.

Судна постачання та обслуговування бурових платформ типу PSV (Platform Supply Vessel) призначені для доставки на ПБУ та трубоукладальні судна обсадних труб, цементу, бурового розчину, палива, води та забезпечення їх нормального функціонування (рис. 1.32). Такі судна поділяються на *спеціалізовані* – для перевезення вантажів та *універсальні*, призначені також для буксирування різних споруд, завезення та підйому якорів, доставки у район нафтогазодобування вахтових бурових бригад.

Водотоннажність більшості спеціалізованих суден постачання становить 1000–5000 т, потужність енергетичної установки до 5000 кВт, універсальних суден, відповідно, до 2000 т та до 6000 кВт [1].



а ***б***

Рис. 1.32. Судна обслуговування бурових платформ:
а – «North Ocean 103»; ***б*** – «Bourbon Apsara»

В останні 10–15 років поширення набули плавучі споруди, призначені для накопичування та первинної переробки нафти й газу, які видобуваються з експлуатаційних свердловин морських родовищ.

Це такі типи суден:

FPSO (Floating Production Storage and Offloading Vessel) – судно для переробки, зберігання і перевантаження нафти й газу (рис. 1.33).



Рис. 1.33. Судно типу FPSO «Petrojarl 1»

FSRU (Floating Storage Regasification Unite) – судно для зберігання і регазифікації природного газу, плавучий регазифікаційний термінал.

FSO (Floating Storage and Offloading) – судно для зберігання і перевантаження нафти й газу.

FPDSO (Floating Production Drilling Storage And Offloading Vessel) – судно для буріння, зберігання і перевантаження нафти й газу [26].

Такі судна мають значну водотоннажність, їх енергетичні установки повинні мати велику потужність для забезпечення енергією нафтогазових установок та комплексів, розміщених на їх борту. До складу СЕУ можуть входити дизельні двигуни, ГТД та ПТА [1].

Комплектація СЕУ та спеціалізованого обладнання суден постачання та обслуговування бурових платформ

1. Судно для завезення якорів «Loke Viking». Водотоннажність – 8000 т, довжина – 85,2 м, ширина – 22 м, висота борту – 9,6 м, швидкість – 17 вузлів. Тип СЕУ: ДЕУ. ГД: Caterpillar 2×6M32+2×8M32 потужністю, відповідно, по 3000 кВт та по 4000 кВт. ДЕС: 2×Leroy, 2×2700 кВт; 2×Cat C32, 2×780 кВт; 1×Volvo D16, 1×500 кВт. Рушійний комплекс: 2 ГРК, 2×7000 кВт; НПП 3×830 кВт, КПП 2×830 кВт.

2. Судно забезпечення глибоководних робіт «Far Sleipner». Водотоннажність – 20 000 т, довжина – 142,6 м, ширина – 25 м, висота борту – 11,4 м, швидкість – 15 вузлів. Тип СЕУ: ДЕЕУ. ГД: Bergen, 4×40L9ACD, 4×4190 кВт. 2 стоянкових ДГ по 974 кВт. ДКУ: 2 термо-масляних ДК по 872 кВт.

Рушійний комплекс: гвинторульовий комплекс «Azipod», НПП тунельного типу 3×1900 кВт; КПП висувного типу 2 × 2500 кВт.

3. Судно забезпечення бурових платформ «North Ocean 103». Водотоннажність – 16 000 т, довжина – 137 м, ширина – 27 м, висота борту – 9,7 м, швидкість ходу – 15,5 вузлів. Тип СЕУ: ДЕЕУ. ГД: Wartsila 4×9R32, 4×3300 кВт. ДДГ 1×600 кВт.

Рушійний комплекс: КПП 2×3500 кВт типу «Azipod», 2×1500 кВт висувного типу; НПП 1×1500 кВт, тунельного типу.

4. Судно типу FSRU «Excelerate Experience». Водотоннажність – 132 900 т, довжина – 294 м, ширина – 46,4 м, висота борту – 26,5 м, швидкість ходу – 18 вузлів, вантажомісткість LNG – 173 400 м^3, розміщена на борту регазифікаційна установка може видавати 28 млн м^3 на добу; вантажні насоси 8×1800 м^3/год.

Тип СЕУ: ДЕЕУ. ГД: Wartsila 2×12V50DF, 2×11 700 кВт, 2×6L50DF, 2×5850 кВт. ГГЕД: 2×HXC 1000j/8, 2×10 870 кВт. Пропульсивний комплекс: 2 ГРК.

5. Багатофункціональне судно забезпечення офшорних суден «Harvey Stone». Призначене для постачання суден FPSO, бурових платформ,

завезення якорів, буксирування аварійних офшорних суден. Водотоннажність – 3750 т, довжина – 64,8 м, ширина – 18 м, висота борту – 7,8 м, швидкість ходу – 14 вузлів (9 вузлів – економічний хід).

Тип СЕУ: гібридна ДЕЕУ. ГД: 2 GE 12V250MDC, 2×3495 кВт. ДЕС: 2 ВГ (ЕД)×1000 кВт, 2 ДДГ×350 кВт, 1 АДГ Cummins QS87×120 кВт.

Рушійний комплекс: 2 ГРК, НПП 2×610 кВт.

Трубоукладальні судна (ТУС) забезпечують прокладання підводних трубопровідних магістралей, призначених для транспортування рідких та газоподібних речовин під дією перепаду тисків на ділянках трубопроводу (рис. 1.34).

Такі судна широко застосовуються під час освоєння нафтогазових родовищ для прокладання трубопроводів діаметром до 1,22 м на глибинах до 3 км. Найбільшого поширення набули дві технології укладання труб на морському дні: S-lay та J-lay.



а



б

Рис. 1.34. Трубоукладальні судна:
а – «Seven Oceans»; ***б*** – «Seven Seas»

Спеціальна інформація! За технологією S-lay зварювання окремих секцій труб проводиться на палубі судна, причому роботи можуть проводитися на декількох зварювальних постах одночасно. Потім за допомогою напрямної конструкції – стінгера труби опускають із судна через трубний колодязь. Під дією власної ваги труба опускається на дно, утворюючи опуклу криву. Перед зустріччю з морським дном труба вигинається у протилежний бік, утворюючи увігнуту криву. Такі технології використовуються на відносно невеликих (до 2 км) глибинах.

Відповідно до J-lay технології укладальна труба на судні знаходиться у вертикальному стані у трубоукладній башті, так і входить на глибину, згинаючись і переходячи до горизонтального положення. Труба послідовно нарощується шляхом підварювання до неї наступних трубних секцій. Таке укладання дозволяє уникнути надмірного натягу внаслідок двійного перегину, а також суттєво зменшує напруження, які виникають у трубному комплексі. Проте, на відміну від S-lay технології, нарощування труб відбувається виключно послідовно, шляхом зварювання труби, що укладається, з наступним відрізком тільки на одному зварювальному посту.

Трубопроводи відносно невеликого (до 250 мм) діаметра можуть укладатися барабанним методом, який передбачає облаштування судна барабаном, діаметром до 36 м, на який намотується на березі гнучкий сталевий трубопровід.

З урахуванням специфіки функціонування ТУС усі вони облаштовані системами динамічного позиціонування, до складу яких входять підрулюючі пристрої різних типів і кількості. На таких суднах застосовуються майже виключно ДЕЕУ з СОД [1].

Комплектація енергетичних установок сучасних ТУС

1. Трубоукладальне судно «Ceona Amazon». Судно призначене для укладання трубопроводів на глибинах до 3000 м у складних умовах, має значні можливості для складування труб на борту судна, може перевозити та зберігати до 9000 т труб, 5500 т гнучких. На верхній палубі і між палубами можуть розміщуватися 8500 т жорстких труб. Судно облаштоване двома глибоководними кранами вантажопідйомністю по 400 т, та 570-тонною трубоукладальною баштою. Труби, що укладаються, надходять у шахту розміром 7,9×14,3 м. Водотоннажність судна – 47 000 т, довжина – 199 м, ширина – 32 м, висота борту – 14,7 м, швидкість – 12 вузлів (під час укладання труб – 2 вузли).

Тип СЕУ: ДЕЕУ. ГД: 2×MAN Diesel&Turbo 9L32/44 CR+4×8L32/44CR потужністю, відповідно, 5040 кВт та 4480 кВт кожний. ДКУ: ДК Aalborg паропродуктивністю 1,5 т/год. Пропульсивний комплекс: 3 ГРК Ø3,8 м; 3 КПП типу «Azipod» потужністю по 3500 кВт; НПП: 1×1800 кВт, 3×2400 кВт, висувного типу.

2. Судно для укладання гнучких труб із застосуванням J-lay технологій «Seven Seas». Труби на судні розташовані у трьох касетах: дві діаметром

16 м (по 2000 т труб у кожній) та одній діаметром 24 м (3000 т труб). Допоміжне обладнання – 2 натяжника по 181 т, лебідка на 113 т, крани по 400 та 20 т. Довжина судна – 151 м, ширина – 28,4 м, висота борту – 12,5 м. Повна водотоннажність – 24 200 т, швидкість – 14 вузлів. Тип СЕУ: ДЕЕУ. ГД: Wartsila 7L32, 6×3360 кВт.

Пропульсивний комплекс: 3 КПП азимутального типу з ГРК по 2950 кВт; 2 НПП (висувних, азимутального типу) з ГРК по 2400 кВт; 1 НПП (тунельного типу) з ГРК 2200 кВт. ДКУ: 2 ДК Aalborg по 3 т/год.

3. Найбільше у світі трубоукладальне судно «Pioneering Spirit» (до 2016 р. – «Pieter Shelte»). Призначене для монтажу, демонтажу бурових платформ і прокладання підводних трубопроводів діаметром від 2 до 68 дюймів. Довжина – 382 м, ширина – 123,8 м, висота борту – 30 м. Повна водотоннажність – 968 700 т, швидкість – 12 вузлів. Вантажопідйомність під час монтажу ПБУ – 48 000 т.

Тип СЕУ: ДЕЕУ. ГД: MAN Diesel&Turbo 8×20V32/44CR по 11 120 кВт, 1×9L32/44CR потужністю 5040 кВт. ДКУ: 2 Termal Oil Heater GESAB по 6000 кВт. Пропульсивний комплекс: гвинторульові комплекси Rolls-Royce 12×5500 кВт.

Історична інформація! Трубоукладальне судно «Pioneering Spirit» було побудовано на верфі «Daewoo Mangalia Heavy Industries» у Південній Кореї у 2014 році. Остаточна добудова судна відбувалась у Роттердамі (Нідерланди).

Едвард Хеерема, власник судна, вирішив назвати його на честь свого батька Пітера Шельте Хеерема. Назва «Pieter Shelte» викликала хвилю обурення у суспільстві, зокрема, серед англійських та голландських євреїв, тому що Пітер Хеерема у часи Другої світової війни обіймав високу посаду в нацистській Германії, був визнаний військовим злочинцем і осуджений до тюремного ув'язнення.

У зв'язку із цим назва судна у 2016 році була змінена на теперішню, яка відображає інноваційні технології у побудові та експлуатації офшорних бурових платформ і шельфових конструкцій.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. *Надайте визначення суднової енергетичної установки.*
2. *З яких елементів складається СЕУ?*
3. *Які види енергії виробляються та споживаються на судні?*
4. *Охарактеризуйте призначення головної СЕУ. Наведіть її склад.*
5. *Зробіть аналіз призначення та складу допоміжних СЕУ.*
6. *Від чого залежить потужність допоміжної суднової електростанції?*
7. *Охарактеризуйте потужність СЕС різних типів судна.*
8. *Охарактеризуйте склад допоміжної котельної установки.*
9. *Надайте визначення системи СЕУ*
10. *Проаналізуйте склад системи СЕУ.*
11. *Які типи систем забезпечують функціонування СЕУ?*
12. *Наведіть призначення системи стисненого повітря.*
13. *Наведіть призначення конденсатно-живильної системи.*
14. *Назвіть типи палива, що застосовують у СЕУ.*
15. *На яких суднах переважно застосовують газоподібне паливо?*
16. *Надайте визначення гібридної СЕУ.*
17. *Яка перевага суден, енергетична установка яких використовує виключно електричну енергію з власних джерел для руху судна та для покриття загальносуднових потреб?*
18. *Охарактеризуйте стан застосування АЕУ на суднах.*
19. *Скільки валопроводів застосовується на сучасних суднах?*
20. *Розгляньте типи рушіїв, що застосовуються на суднах.*
21. *Де переважно застосовуються крильчасті рушії?*
22. *Який тип рушія застосовується на судні на повітряній подушці?*
23. *Наведіть типи теплових двигунів, які застосовуються як головні на сучасних суднах.*
24. *Надайте визначення комбінованої енергетичної установки (КЕУ).*
25. *Наведіть приклади КЕУ з термодинамічно зв'язаними циклами.*
26. *Скільки валопроводів застосовується на пасажирських суднах?*
27. *Скільки головних двигунів може входити до складу СЕУ?*
28. *Назвіть основні типи теплових двигунів, які застосовуються на морських суднах.*
29. *Які типи дизелів використовуються на морських суднах?*
30. *На які групи поділяються суднові передачі?*
31. *У чому полягає призначення головної передачі?*
32. *Які типи передач набули поширення на суднах?*
33. *У чому спільність та відмінність редукторів і мультиплікаторів?*
34. *З яких елементів складається електрична передача?*
35. *Дайте визначення реверса судна.*
36. *Які умови здійснення реверсу рушієм?*
37. *Як здійснюється реверс парових турбін?*

38. *Як здійснюється реверс електричною передачею?*
39. *Які умови здійснення реверсу механічною передачею?*
40. *На які класи поділяються судна за рівнем автоматизації?*
41. *Надайте характеристику умов використання ЕУ на суднах з різним рівнем автоматизації.*
42. *На які типи поділяються морські судна за призначенням?*
43. *Надайте характеристику споживання енергії на УСВС і склад їх ЕУ.*
44. *Які потреби в енергії характерні для рефрижераторних суден?*
45. *Надайте характеристику TEU та FEU, як одиниць виміру місткості контейнерних суден.*
46. *Які фактори впливають на склад ЕУ контейнеровозів?*
47. *Надайте характеристику комплектації та сумарної потужності ДЕС сучасного магістрального контейнерного судна.*
48. *Охарактеризуйте основні типи морських ліхтеровозів.*
49. *Особливість енергетичної установки ліхтеровоза «Сєвморпуть».*
50. *Наведіть основні вимоги до складу СЕУ танкерів.*
51. *У чому особливість ДКУ танкерів і з чим вона пов'язана?*
52. *Які типи вантажів перевозять судна-газовози?*
53. *У яких умовах перевозяться зріджені природні та нафтові гази?*
54. *Які типи головних двигунів застосовуються у СЕУ газовозів?*
55. *Назвіть основні характеристики круїзних суден.*
56. *Яку частину загальної потужності ЕУ круїзних суден складає пропульсивна потужність?*
57. *Надайте характеристику ЕУ круїзного судна «Oasis of the Seas».*
58. *Особливості енергетичних установок швидкісних поромів.*
59. *Назвіть типи суден, які відносяться до промислових.*
60. *Надайте характеристику великих морських траулерів.*
61. *Аргументуйте застосування валогенераторів у складі енергетичних установок великих траулерів.*
62. *Склад енергетичної установки рибопромислової бази «Восток».*
63. *Назвіть основні типи буксирних суден за призначенням.*
64. *Особливості СЕУ гібридних буксирів на прикладі «NOORDZEE».*
65. *Які особливості комплектації ЕУ науково-дослідних суден?*
66. *Наведіть характеристики сучасних плавучих доків.*
67. *Основні характеристики ЕУ судна укладальника кабелю.*
68. *Назвіть основні типи плавучих бурових установок.*
69. *Як забезпечується позиціонування бурового судна відносно свердловини?*
70. *Надайте основні характеристики кранових суден.*
71. *Назвіть основні типи плавучих споруд, призначених для накопичування та первинної переробки нафти й газу, які видобуваються з експлуатаційних морських свердловин.*
72. *Дайте загальну характеристику трубоукладальних суден.*
73. *Особливості комплектації ТУС «Pioneering Spirit».*

ГЛАВА 2. ПЕРЕТВОРЕННЯ І ПЕРЕДАЧА ЕНЕРГІЇ В СЕУ

2.1. Потоки енергії в суднових енергетичних установках

Джерелом будь-якого виду енергії, що виробляється СЕУ, є паливо одного чи декількох видів, необхідну кількість якого для здійснення рейсу судна беруть у вигляді запасів.

Процеси, пов'язані з перетворенням енергії палива на енергію, необхідну для приводу рушія, відбуваються в наступних елементах СЕУ:

– *у генераторі робочого тіла*, у якому хімічна енергія палива перетворюється на теплову; у ньому може також відбуватися стиснення та нагрівання робочого тіла;

– *у тепловому двигуні*, що перетворює теплову енергію на механічну;

– *у головній передачі*, необхідній для перетворення обертального моменту теплового двигуна;

– *у валопроводі*, який передає потужність двигуна рушію;

– *у рушії*, що використовує передану потужність для руху судна.

Здійснення процесів перетворення і передачі енергії у перелічених вище елементах головної енергетичної установки судна пов'язане з енергетичними втратами, які їх супроводжують. На рис. 2.1 наведена узагальнена схема перетворення та передачі енергії у головній енергетичній установці.

Серед існуючих типів СЕУ тільки до складу паротурбінної установки входить генератор робочого тіла у вигляді окремого елемента СЕУ – котла, у СЕУ з ДВЗ у робочих циліндрах двигуна одночасно відбуваються процеси, які відповідають робочим процесам і генератора робочого тіла, і теплового двигуна; у ГТУ функції генератора робочого тіла виконують компресор, камера згоряння та турбіна, потужність якої використовується на привід компресора. Сукупність компресора, камери згоряння та турбіни, що приводить компресор, утворює газогенератор. До його складу можуть входити один або два компресори, одна чи дві турбіни.

Ураховуючи те, що витрати на паливо для суднової енергетичної установки складають до 70 % усіх витрат на експлуатацію судна, то центральною задачею суднової енергетики є підвищення ефективності СЕУ, тобто зростання співвідношення корисної потужності, виробленої СЕУ, до витрат на її досягнення. Визначаючи ефективність, СЕУ може розглядатися як підсистема судна, тобто як єдиний автономний комплекс

(рис. 2.2,***а***), у якому відбувається перетворення енергії палива з метою отримання корисного ефекту. Разом із цим СЕУ може бути представленою, як це і є в дійсності, сукупністю окремих комплексів у вигляді головних та допоміжних установок і систем, що їх обслуговують, які можуть бути автономними один відносно одного (рис. 2.2,***б***) або мати горизонтальні зв'язки між собою (рис. 2.2,***в***) залежно від прийнятої схеми СЕУ. Ці горизонтальні зв'язки мають місце в разі встановлення утилізаційного котла на газоході головного двигуна, коли за рахунок втрат теплоти з відхідними газами, що супроводжують отримання механічної енергії, утворюється теплова енергія (на рисунку лінія зв'язку між М та Т). Надалі теплова енергія може використовуватися безпосередньо для підігрівання, випаровування робочих середовищ, опалення суднових приміщень або в паровій турбіні може бути перетворена на механічну, чи в паротурбогенераторі – на електричну (на рисунку лінія зв'язку між Т та Е). У разі застосування валогенератора, який відбирає частку механічної енергії, утворюється електрична енергія – лінія зв'язку між М та Е тощо.

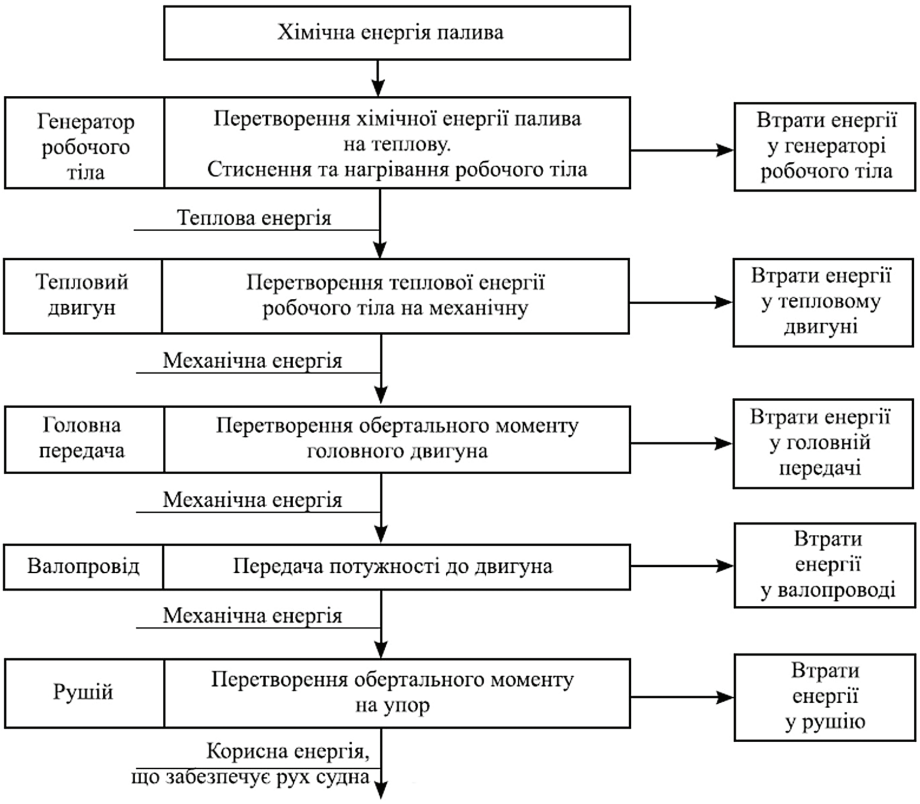


Рис. 2.1. Схема перетворення та передачі енергії у головній судновій енергетичній установці

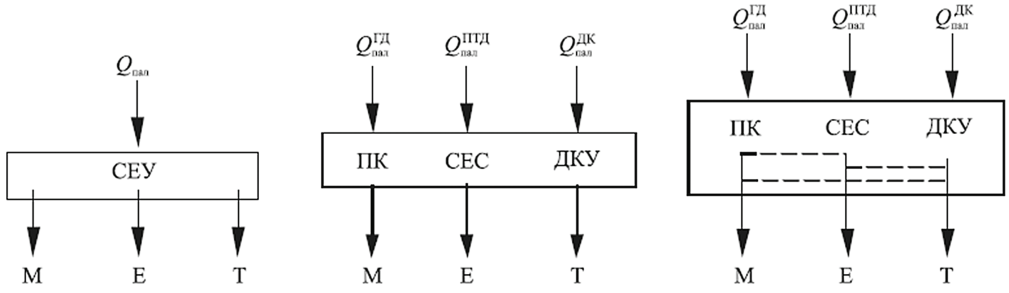
Мірою оцінки ефективності СЕУ є ККД суднової енергетичної установки та коефіцієнт використання теплоти в СЕУ.

Ефективний коефіцієнт корисної дії СЕУ:

$$\eta_e^{\text{СЕУ}} = \frac{\text{М} + \text{Е}}{Q_{\text{пал}}}.$$

Коефіцієнт використання теплоти:

$$\eta_{\text{в.т}}^{\text{СЕУ}} = \frac{\text{М} + \text{Е} + \text{Т}}{Q_{\text{пал}}}.$$



а ***б*** ***в***

Рис. 2.2. Структурні схеми перетворення енергії в судновій енергетичній установці:

ДКУ – допоміжна котельна установка; $Q_{\text{пал}}$ – кількість теплоти, що виділилася під час згоряння палива; М, Е, Т – корисний ефект від згоряння палива (відповідно механічна, електрична та теплова енергія); індекси ГД, ПТД, ДК належать до головного двигуна, первинного теплового двигуна, що приводить електрогенератор, і допоміжного котла

Одним з основних способів підвищення ефективності СЕУ, разом з удосконаленням процесів виробництва й передачі енергії в елементах ГЕУ є утилізація – використання частини теплових втрат, які супроводжують усі процеси передачі й перетворення енергії для забезпечення суднових споживачів різними видами енергії. На сучасних морських суднах з дизельними енергетичними установками (ДЕУ) широко застосовується утилізація теплоти відпрацьованих газів і охолоджуючої води. Це пояснюється тим, що до 45 % теплоти, яка виділяється під час згоряння палива, відводиться саме відхідними газами та охолоджуючою водою.

Утилізація теплоти може бути здійснена у всіх типах СЕУ, вона дозволяє довести ККД до 45…47 %, а коефіцієнт використання теплоти – до 80 %. Утилізована теплота може забезпечувати теплопостачання судна (обігрівання приміщень, отримання гарячої води для побутових та

виробничих цілей і т. д.), кондиціювання повітря, роботу водоопріснювальних і холодильних установок, вироблення електроенергії у турбогенераторах, отримання додаткової потужності, яка може підводитися до валопроводу тощо. Найбільшого поширення на сучасних суднах набули утилізаційні котли, які працюють на теплоті відхідних газів, та водоопріснювальні установки вакуумного типу, що використовують теплоту охолоджуючої води. Здійснення утилізації теплоти можливе як у головній, так і у допоміжній СЕУ – у судновій електростанції. Утилізація теплоти ГЕУ практично може забезпечити роботу всіх суднових споживачів без додаткових витрат палива.

Ефект від застосування утилізації теплоти тим більший, чим менший ККД головного пристрою у складі СЕУ, який перетворює хімічну енергію палива (головного двигуна – ДВЗ, ГТД, головного котла), і навпаки.

Утилізація теплоти суттєво впливає на склад і компонування СЕУ. На рис. 2.3. наведена схема утилізації теплоти суднової дизельної енергетичної установки з валогенератором (ВГ), утилізаційною паровою турбіною і утилізаційною силовою газовою турбіною [3].

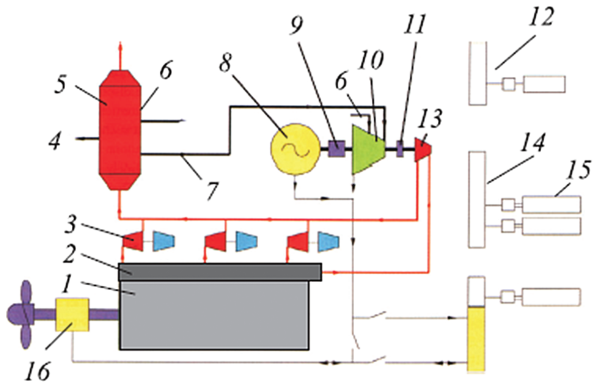


Рис. 2.3. Принципова схема утилізації теплоти суднової дизельної енергетичної установки:
1 – ГД; *2* – колектор відхідних газів ГД; *3* – турбонагнітачі; *4* – пара для загальносуднових потреб; *5* – УК; *6* – пара низького тиску; *7* – перегріта пара високого тиску; *8* – електрогенератор утилізаційної ПТ; *9* – редуктор утилізаційної турбіни; *10* – утилізаційна ПТ; *11* – редуктор силової утилізаційної турбіни з обгінною муфтою; *12*, *15* – аварійний та допоміжний ДГ відповідно; *13* – утилізаційна силова газова турбіна; *14* – ГРЩ; *16* – ВГ

Типова структурно-функціональна схема СЕУ транспортного судна, що складається з ПК, СЕС та котельної установки, у яких хімічна енергія палива перетворюється на відповідні види енергії, наведена на рис. 2.4.

Тут передбачене використання енергії охолоджувальної води ГД для роботи вакуумної опріснювальної установки й теплоти відхідних газів ГД для отримання пари в УК.

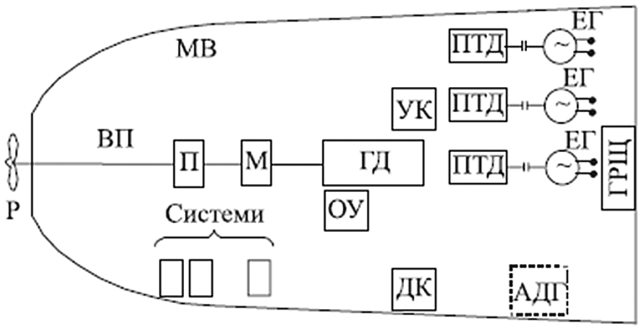


Рис. 2.4. Структурно-функціональна схема СЕУ транспортного судна:
М – муфта; П – передача; Р – рушій; ПТД – первинний тепловий двигун;
ЕГ – електрогенератор; ДК – допоміжний котел; ОУ – опріснювальна установка;
АДГ – аварійний дизель-генератор

Оцінювати ефективність роботи СЕУ взагалі немає сенсу, адже судно має декілька експлуатаційних режимів, на яких енергетичне обладнання, що входить до складу комплексів, працює по-різному, а може взагалі не використовуватися. Наприклад, якщо до складу СЕС входить три дизель-генератори, то на окремих режимах можуть працювати один, два або три агрегати; на стоянках головний двигун не працює, отже, не працюють утилізаційний котел, опріснювальна вакуумна установка, а будуть працювати ДК та СЕС.

До експлуатаційних режимів СЕУ транспортного судна належать: ходовий режим, стоянковий з вантажними операціями, стоянковий без вантажних операцій, аварійний режим. Для пасажирського судна характерні стоянкові режими СЕУ з пасажирами або без них.

Визначаючи ефективність роботи СЕУ на кожному з експлуатаційних режимів, розробляють таблицю режимів роботи з позначенням елементів указаних комплексів, що використовуються на цих режимах (табл. 2.1). Нижче наведено приклад оформлення такої таблиці відповідно до СЕУ з комплектацією, наведеною на рис. 2.4. Розглянемо перетворення енергії палива у пропульсивному комплексі, судновій електростанції та котельній установці (рис. 2.5).

У складі пропульсивних комплексів сучасних суден як головний двигун найбільшого поширення набув ДВЗ унаслідок найбільшої економічності порівняно з іншими тепловими двигунами, тому в подальшому

розглядається схема процесу перетворення енергії у пропульсивному комплексі саме з ДВЗ як головного.

Таблиця 2.1. **Режими роботи елементів СЕУ**

Обладнання	Режими				Примітки
	Ходовий	Стоянка з вантажними операціями	Стоянка без вантажних операцій	Аварійний	
ГД (1)	+	–	–	–	
ДГ (3)	–	+2	+1	–	Резерв 1ДГ
ДК (1)	–	+	+	–	
УК (1)	+	–	–	–	
ОУ (1)	+	–	–	–	
ВГ (1)	+	–	–	–	
АДГ (1)	–	–	–	+	

*Знак «+» позначає включення в роботу на данному режимі елемента СЕУ, число біля знака показує кількість задіяних елементів; знак «–» позначає виключення того чи іншого елемента з роботи.

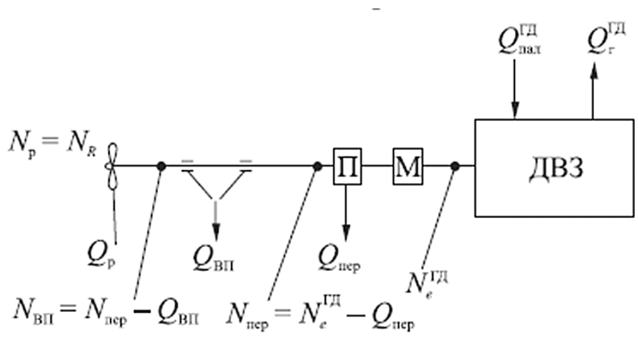


Рис. 2.5. Схема процесів перетворення енергії в пропульсивному комплексі

Під час спалювання палива у двигуні виділяється теплота $Q_{\text{пал}}^{\text{ГД}}$, яка забезпечує вироблення корисної потужності на фланці головного двигуна – ефективної потужності $N_e^{\text{ГД}}$. Цей процес супроводжується втратами теплоти у ДВЗ $Q_{\text{ГД}}$: це втрати теплоти з продуктами згоряння, охолоджуючою водою, маслом, під час охолодження наддувного повітря, залишкові втрати. Значення $Q_{\text{ГД}}$ для сучасних двигунів становить 50…54 % від $Q_{\text{пал}}^{\text{ГД}}$.

Від головного двигуна потужність передається через муфту, суднову передачу та валопровід, у яких також існують втрати вже механічної енергії, що перетворюються на теплову: $Q_{\text{пер}}$ і $Q_{\text{ВП}}$. Таким чином, до рушія підводиться потужність

$$N_{\text{ВП}} = N_e^{\text{ГД}} - Q_{\text{пер}} - Q_{\text{ВП}}.$$

Втрати енергії на рушії $Q_{\text{р}}$ визначаються величиною пропульсивного коефіцієнта η.

Корисним ефектом функціонування пропульсивного комплексу, який має місце в результаті спалювання палива в ГД, є потужність $N_{\text{р}}$, що перетворюється на упор

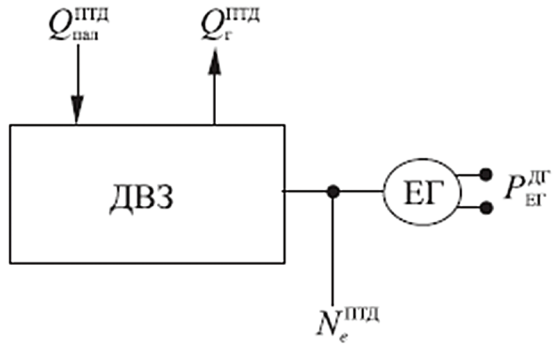
$$N_R = N_e^{\text{ГД}} - Q_{\text{пер}} - Q_{\text{ВП}} - Q_{\text{р}}.$$

Втрати енергії у муфтах ураховуються тільки в разі використання муфт ковзання, для муфт всіх інших типів втратами енергії нехтують.

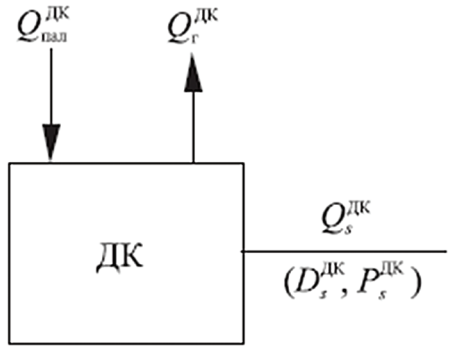
Коефіцієнт корисної дії пропульсивного комплексу:

$$\eta_e^{\text{ПК}} = \frac{N_R}{Q_{\text{пал}}^{\text{ГД}}}.$$

Схеми перетворення теплоти для допоміжних енергетичних установок наведені на рис. 2.6.



а



б

Рис. 2.6. Схема процесів перетворення теплоти в судновій електростанції (***а***) та допоміжній котельній установці (***б***)

Як первинні теплові двигуни для приводу енергогенератора можуть використовуватися ДВЗ, ПТ, ГТД, найчастіше це ДВЗ.

Перетворення механічної енергії $N_e^{\text{ТД}}$ яку розвиває первинний тепловий двигун, на електричну $P_{\text{ЕГ}}$, що виробляє генератор електричного струму, здійснюється з витратами $Q_{\text{ЕГ}}$, які враховуються у ККД електрогенератора:

$$\eta_{\text{ЕГ}} = \frac{P_{\text{ЕГ}}}{N_e^{\text{ТД}}} = \frac{N_e^{\text{ТД}} - Q_{\text{ЕГ}}}{N_e^{\text{ТД}}}.$$

У допоміжному котлі (рис. 2.10,*б*) виробляється пара у кількості $D_s^{\text{ДК}}$ з тиском $P_s^{\text{ДК}}$ МПа.

Теплота, що виділяється під час згоряння палива у ДК, $Q_{\text{пал}}^{\text{ДК}}$ розподіляється на теплоту, витрачену на отримання пари $D_s^{\text{ДК}}$ у допоміжному котлі, та на теплові втрати $D^{\text{ДК}}$.

$$Q_{\text{пал}}^{\text{ДК}} = D_s^{\text{ДК}} + D^{\text{ДК}}.$$

Коефіцієнт використання теплоти у ДК:

$$\eta^{\text{ДК}} = \frac{D_s^{\text{ДК}}}{Q_{\text{пал}}^{\text{ДК}}}.$$

Розглядаючи процеси перетворення теплоти відхідних газів ГД на теплову енергію – енергію пари в УК, коефіцієнт використання теплоти визначається наступним чином:

$$\eta^{\text{УК}} = \frac{Q_s^{\text{УК}}}{Q_г^{\text{УК}}}.$$

де $Q_s^{УК}$ кількість теплоти, витраченої для отримання насиченої пари;

$Q_{\text{г}}^{\text{УК}}$ кількість теплоти, що може бути передана від газів живильній воді.

Розглянемо перетворення енергії у СЕУ конкретного складу. На рис. 2.7 наведена схема перетворення енергії на ходовому режимі для СЕУ великого морозильного траулера [40]. Головна установка одновальна, дизельна, двомашинна 2×2880 кВт з відбором потужності на валогенератор потужністю 800 кВт. На ходовому режимі передбачається робота двох дизель-генераторів з трьох, що входять до складу СЕУ, потужність кожного 820 кВт, двох утилізаційних котлів, розміщених на газоходах головних двигунів, двох утилізаційних опріснювальних установок. На схемі конкретизовані складові теплових втрат головного двигуна $Q^{\text{ГД}}$: $Q_{\text{пр.в}}^{\text{ГД}}$ втрати з прісною водою; $Q_{\text{н.пов}}^{\text{ГД}}$ втрати, пов'язані з охолодженням

наддувного повітря; $Q_{\text{м}}^{\text{ГД}}$ втрати теплоти з маслом; $Q_{\text{г}}^{\text{ГД}}$ втрати з відхідними газами; $Q_{зал}^{ГД}$ залишкові втрати; $Q_{\text{від}}^{\text{ГД}}$ втрати з відхідними газами УК; $Q_{\text{пр.в}}$ втрати з прісною водою, що покидає ОУ; $Q_{\text{s}}^{\text{ОУ}}$с теплота, витрачена на кипіння морської води та утворення пари в ОУ

$$\left(\eta_{\text{ВГ}}^{\text{СЕУ}}\right)_{\text{х.р}} = \frac{N_R + P_{\text{ЕГ}}^{\text{ВГ}} + 2Q_s^{\text{УК}} + 2Q_s^{\text{ОУ}} + 2P_{\text{ЕГ}}^{\text{ДГ}}}{2Q_{\text{пал}}^{\text{ГД}} + 2Q_{\text{пал}}^{\text{ДГ}}}.$$

де $Q_s^{УК}$ кількість теплоти, витраченої для отримання пари в УК;

УК, $D_s^{УК}$ паропродуктивність і тиск пари в УК;

$Q_{\text{МП}}$ втрати в мультиплікаторі.

Коефіцієнт корисної дії ПК наведеного вище складу визначається як

$$\eta_e^{\text{ПК}} = \frac{N_R + P_{\text{ВГ}}^{\text{ВГ}}}{2Q_{\text{пал}}^{\text{ГД}}}.$$

Коефіцієнт корисної дії СЕУ на ходовому режимі:

$$\left(\eta_{\text{e}}^{\text{СЕУ}}\right)_{\text{х.р}} = \frac{N_R + P_{\text{ЕГ}}^{\text{ВГ}} + 2P_{\text{ЕГ}}^{\text{ДГ}}}{2Q_{\text{пал}}^{\text{ГД}} + 2Q_{\text{пал}}^{\text{ДГ}}}.$$

Коефіцієнт використання теплоти в СЕУ на ходовому режимі:

$$\left(\eta_{\text{ВГ}}^{\text{СЕУ}}\right)_{\text{х.р}} = \frac{N_R + P_{\text{ЕГ}}^{\text{ВГ}} + 2Q_s^{\text{УК}} + 2Q_s^{\text{ОУ}} + 2P_{\text{ЕГ}}^{\text{ДГ}}}{2Q_{\text{пал}}^{\text{ГД}} + 2Q_{\text{пал}}^{\text{ДГ}}}.$$

Наочним графічним способом зображення потоків енергії в СЕУ є теплові діаграми. Відповідно до розглянутого складу СЕУ теплова діаграма розподілу потоків енергії наведена на рис. 2.8 [41].

Аналогічні теплові діаграми будуються і для інших режимів роботи СЕУ. Аналіз таких діаграм надає можливість визначити ефективність та перспективи використання резервів вторинної теплоти з метою підвищення ефективності СЕУ.

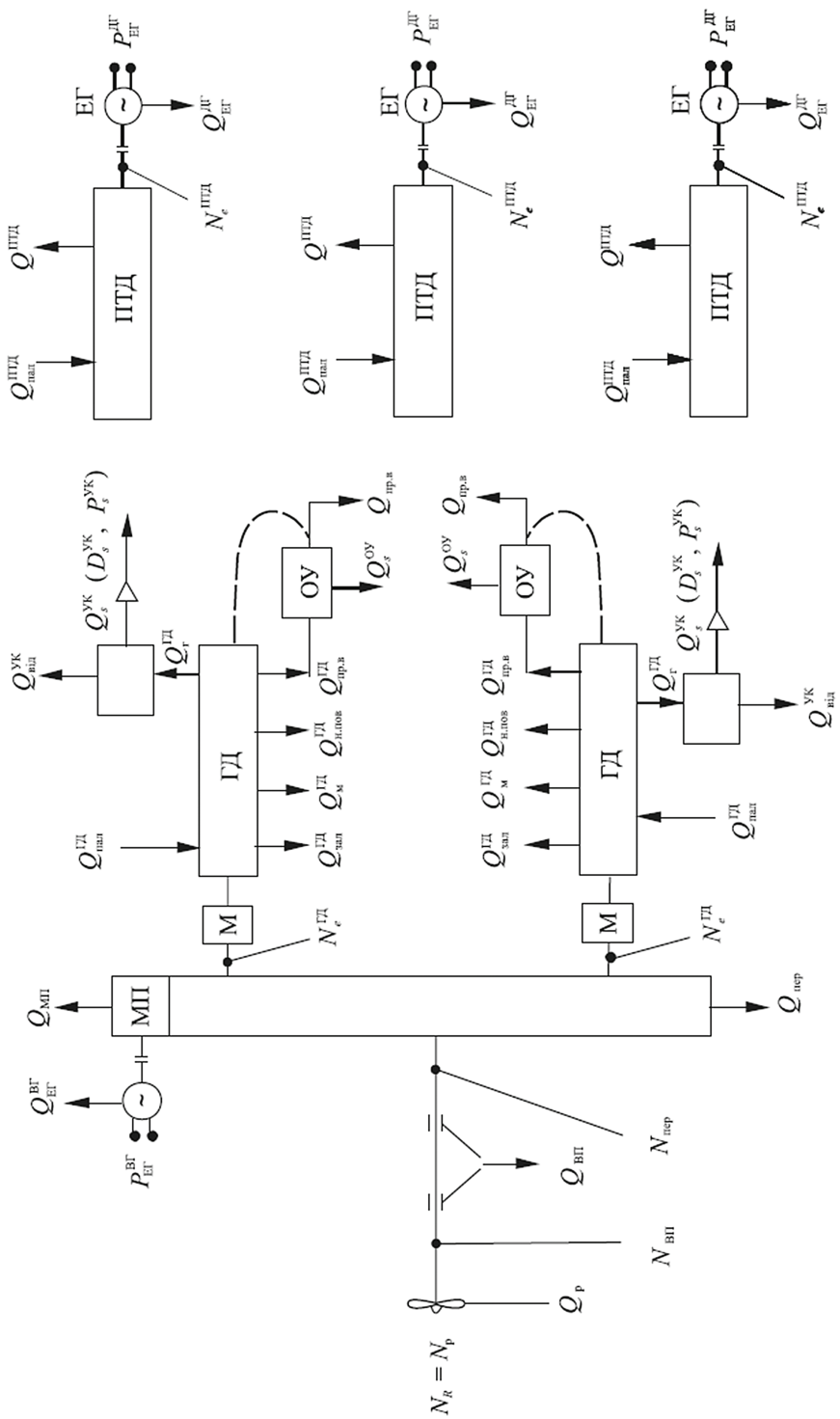


Рис. 2.7. Схема розподілу потоків енергії в СЕУ на ходовому режимі роботи

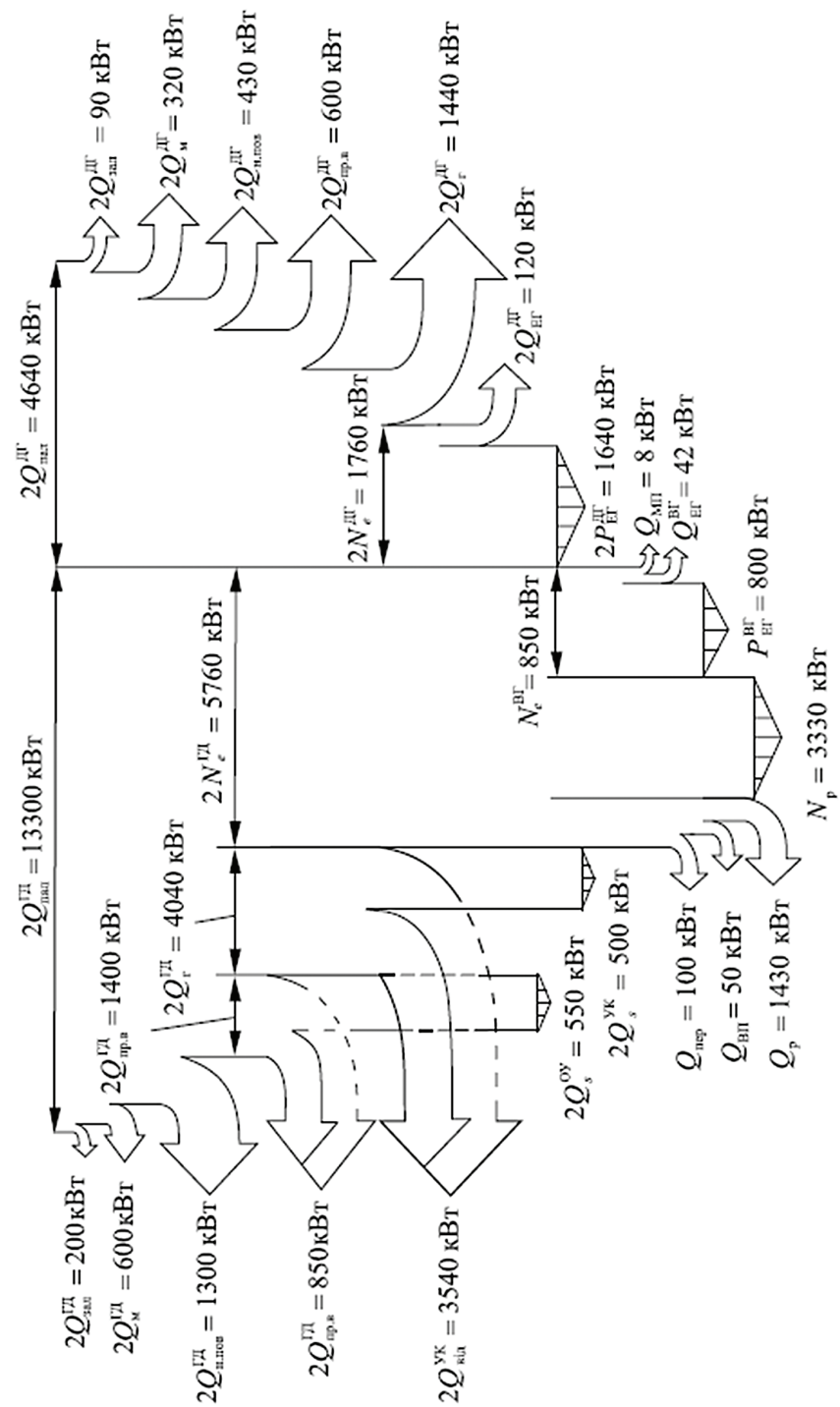


Рис. 2.8. Потоки теплоти в суднові енергетичній установці на ходовому режимі

2.2. Судновий валопровід

До числа важливих елементів пропульсивного комплексу належить валопровід, який підводить потужність до рушія, сприймає упор, створений гребним гвинтом, і передає його через головний упорний підшипник корпусу судна. Основними елементами валопроводу (рис. 2.9) [25, 27] є наступні:

вали, що передають обертальний момент рушію і сприймають упор, який він розвиває (до таких валів належать гребні, проміжні, упорний, про-ставковий), разом зі з'єднаннями валів;

ГУП, який сприймає упор та передає його корпусу судна;

дейдвудний пристрій, що забезпечує ущільнення валопроводу в місці виходу його з корпусу судна й одночасно є опорою валопроводу;

проміжні підшипники ВП, які є його опорами на відстані між дейдвудним пристроєм та ГУП;

перебіркове ущільнення, яке забезпечує ущільнення валопроводу в місці його проходу через водонепроникну перебірку;

системи змащення, охолодження дедвуйдного пристрою та опорних підшипників.

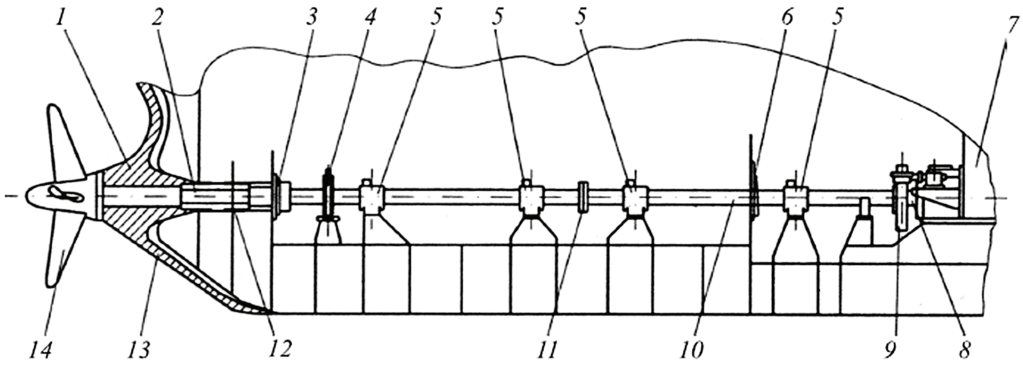


Рис. 2.9. Конструктивна схема валопроводу:
1 – яблуко ахтерштевня; *2* – гребний вал; *3* – дейдвудний сальник; *4* – гальмо; *5* – опорні підшипники; *6* – перебірковий сальник; *7* – кормова частина головного двигуна; *8* – упорний вал; *9* – валоповоротний пристрій; *10* – проміжний вал; *11* – з'єднання валів; *12* – дейдвудна труба; *13* – ахтерштевень; *14* – гребний гвинт

Прокручування валопроводу під час стоянки судна забезпечується валоповоротним пристроєм. Для гальмування валопроводу в разі його ремонту або буксирування судна, коли не допускається обертання гвинта, використовується гальмовий або стопорний пристрій. Гальмовий пристрій

установлюється найчастіше на фланцевому з'єднанні, яке у цьому випадку має збільшений діаметр. Гальмовий пристрій вмикається при зупиненому судні, він не використовується для зупинки вала [25].

У разі застосування ГРК поворот лопатей гребного гвинта забезпечується механізмом зміни кроку, який найчастіше має гідравлічний привід, убудований у лінію ВП. На валопроводах можуть установлюватися датчик тахометра для вимірювання частоти обертання та пристрій для визначення потужності – торсіометр.

Під час розміщення ВП на судні повинні бути забезпечені його надійна робота, безпека обслуговування, вільний нагляд за станом його окремих елементів, зручність монтажу та ремонту. Кількість опорних підшипників визначається довжиною відсіків, відстанню між водонепроникними перебірками. Підшипники розташовуються у місцях, доступних для їх обслуговування.

Під час побудови судна, у технологічних цілях, до складу валопроводу можуть включатися монтажні підшипники, які за нормальної експлуатації від'єднуються від валів. Склад та розміри суднового ВП залежать від потужності, частоти обертання ГД та його розташування на судні. На більшості транспортних суден використовується кормове розміщення МВ, у цьому випадку до складу валопроводу входить разом з гребним валом тільки один проміжний вал.

На сьогодні максимальна потужність, яка передається валопроводом, досягає 80 МВт (контейнеровоз «Emma Maersk»), діаметр гребного вала, виготовленого з маловуглецевих або легованих сталей, – 1400 мм. Відносна маса суднового ВП з гребним гвинтом (по відношенню до загальної маси енергетичної установки) складає 5…18 %, відносна вартість – 7…9 %. На рис. 2.10 наведено загальне розташування валопроводу одногвинтового судна на прикладі балкера «Харитон Греку» (дедвейт $D_W = 52\,450$ т, довжина $L = 201{,}6$ м, осадка $T = 12{,}3$ м, головний двигун 8L60MC, ефективна потужність $N_e = 15\,360$ кВт, частота обертання $n = 123$ хв$^{-1}$) [26].

У дейдвудних пристроях застосовуються підшипники з неметалевих матеріалів зі змащенням забортною водою чи металеві дейдвудні підшипники, які змащуються маслом. На судні «Харитон Греку» застосовано підшипник з масляним змащенням. Для змащення дейдвудних підшипників використовується агрегат, що складається з двох насосів, один з яких резервний, та охолодник масла. Напірна масляна цистерна розташована на 2 м вище від вантажної ватерлінії, вона разом з насосом забезпечує роботу гравітаційної системи змащення дейдвудного підшипника. Завдяки такому розташуванню напірної цистерни (вище від площини максимального занурення судна) забезпечується надійне

змащення дейдвудного підшипника та виключається проникнення води до дейдвудного пристрою, у якому масло знаходиться під тиском, вищим за тиск забортної води [25].

Гребний та проміжний вали валопроводу судна «Харитон Греку» – суцільного перерізу, дейдвудна труба – сталева, дейдвудний підшипник – чавунний, залитий бабітом. З'єднання гребного гвинта з гребним валом – безшпонкове з використанням гідропресової посадки. Підтримання проміжного вала та сприйняття радіальних навантажень забезпечується двома опорними підшипниками. Головний упорний підшипник розміщений у кормовій частині фундаментної рами ГД.

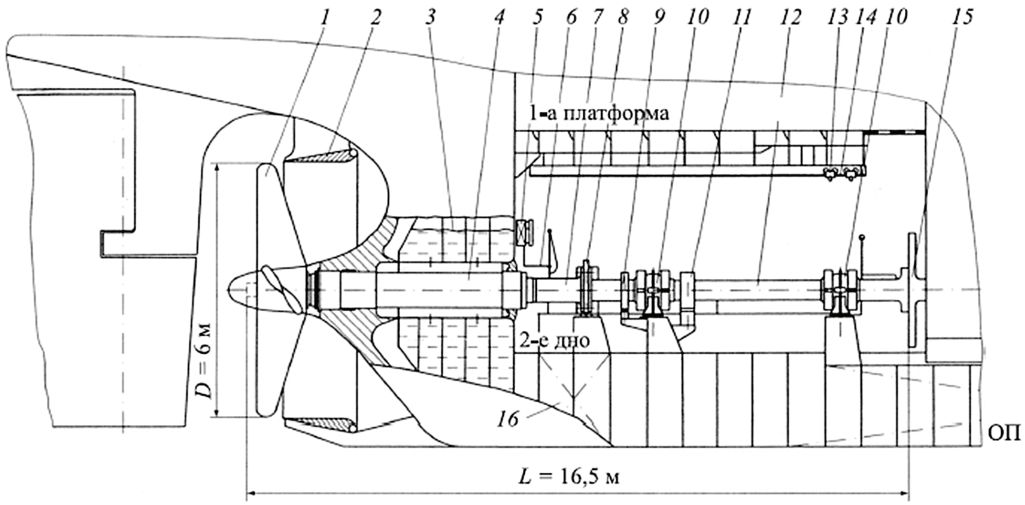


Рис. 2.10. Валопровід з масляним змащенням дейдвудного підшипника судна «Харитон Греку»:

1 – гребний гвинт; *2* – напрямна насадка; *3* – мінімальний рівень води в ахтерпіку; *4* – дейдвудний пристрій; *5* – цистерна охолодження носового ущільнення; *6* – масляний трубопровід; *7* – гребний вал; *8* – гальмо із черв'ячним редуктором; *9* – датчик тахометра; *10* – опорний підшипник; *11* – контактно-щітковий пристрій; *12* – проміжний вал; *13* – вантажопідйомний візок; *14* – монорейка; *15* – вихідний вал ГД; *16* – цистерна зливу масла з дейдвудного пристрою

Загалом на сучасних суднах з прямою передачею потужності на гвинт, ГУП як окремий елемент валопроводу не застосовується, він включається, як і у даному випадку, до конструкції ГД. Вимірювання частоти обертання здійснюється за допомогою дистанційного електричного тахометра, який отримує імпульси від датчика, установленого на валопроводі. На фланцевому з'єднанні гребного та проміжного валів розташований стрічковий гальмовий пристрій із черв'ячною передачею.

Важливим елементом дейдвудних пристроїв, до складу яких входять підшипники зі змащенням маслом, є ущільнення, що повинні забезпечувати надійну герметизацію, виключаючи протікання масла з кормового та носового торців дейдвуда. Більшість ущільнень забезпечують герметизацію за допомогою гумових манжет різного виконання.

Типовий варіант дейдвудного ущільнення з гідравлічним затвором наведений на рис. 2.11. Це ущільнення складається з двох блоків: кормового і носового. Кормовий блок закріплюється на торці дейдвудної труби у місці виходу гребного вала, він запобігає потраплянню забортної води у дейдвудний пристрій і масла – із пристрою за борт. Цей блок складається з рознімного корпусу, втулки з антикорозійного матеріалу та чотирьох гумових ущільнювальних манжет. Носовий блок установлюється в місці виходу гребного вала у МВ на торці дейдвудної труби. Він складається з рознімного корпусу, втулки та двох гумових ущільнювальних манжет. Змащення та охолодження поверхонь тертя забезпечується маслом, яке підводиться у простір між манжетами.

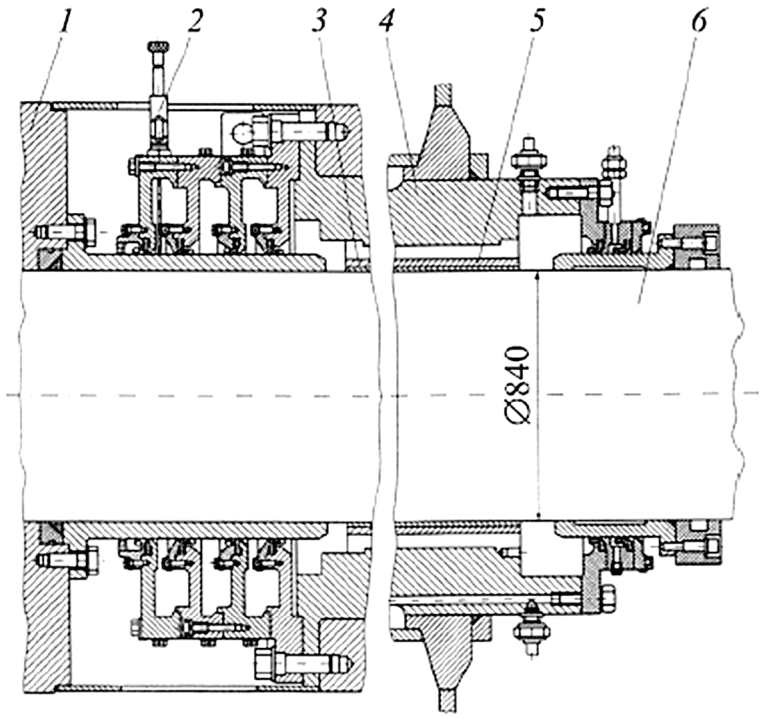


Рис. 2.11. Дейдвудне ущільнення «Нептун»:
1 – маточина гвинта; *2* – прилад для вимірювання осідання гребного вала; *3* – кормовий дейдвудний підшипник; *4* – дейдвудна труба; *5* – носовий дейдвудний підшипник; *6* – гребний вал

2.3. Передачі суднових енергетичних установок

Передачі СЕУ поділяються на *головні*, призначені для передачі енергії від головних двигунів до рушіїв, та *допоміжні*, призначені для передачі енергії від допоміжних двигунів (дизелів, турбін, електродвигунів) до машин і механізмів допоміжного призначення (електрогенераторів, компресорів, насосів тощо).

Усі суднові передачі, що знайшли застосування в СЕУ, поділяються на наступні (рис. 2.12):

прямі (безпосередні);

механічні (редукторні);

гідравлічні (із застосуванням гідромуфт і гідротрансформаторів; гідравлічного насоса, який приводиться двигуном, та гідромотора, що працює на гребний гвинт);

електричні (дизель- або турбоелектричні установки з головними дизель- або турбогенераторами і гребними електродвигунами (ГЕД));

комбіновані (змішані).

Прямі передачі використовуються головним чином з малообертовими дизелями при $n_{дв} = 60…250$ хв$^{-1}$, разом із цим вони знайшли обмежене застосування на річкових суднах, риболовних траулерах і буксирах, на яких установлені СОД з $n_{дв} = 275…400$ хв$^{-1}$ [26, 69]. Можливі варіанти пропульсивного комплексу, а саме:

вихідний фланець реверсивного дизеля жорстко або еластично з'єднаний через валопровід з ГФК;

вихідний фланець нереверсивного дизеля з'єднаний через валопровід з ГРК.

Широке застосування дизельних установок з МОД і прямою передачею на транспортному флоті (судна з такими установками складають близько 60 % від загальної кількості суден водотоннажністю вище 2 тис. т), що пояснюється цілою низкою їх позитивних якостей: високим ККД передачі, конструктивною простотою та високою надійністю передачі, високою екологічністю головних дизелів, високим ресурсом, низькими експлуатаційними витратами на обслуговування [27].

У той же час дизельним установкам з прямими передачами притаманні такі недоліки, як гірші, порівняно з іншими установками й передачами, масогабаритні показники, складність приводу допоміжних механізмів, знижена живучість.

Механічні передачі являють собою зубчасті передачі з постійним передаточним числом (передаточне число $i = n_1/n_2$, де n_1 і n_2 – частоти обертання відповідно вхідного та вихідного валів).

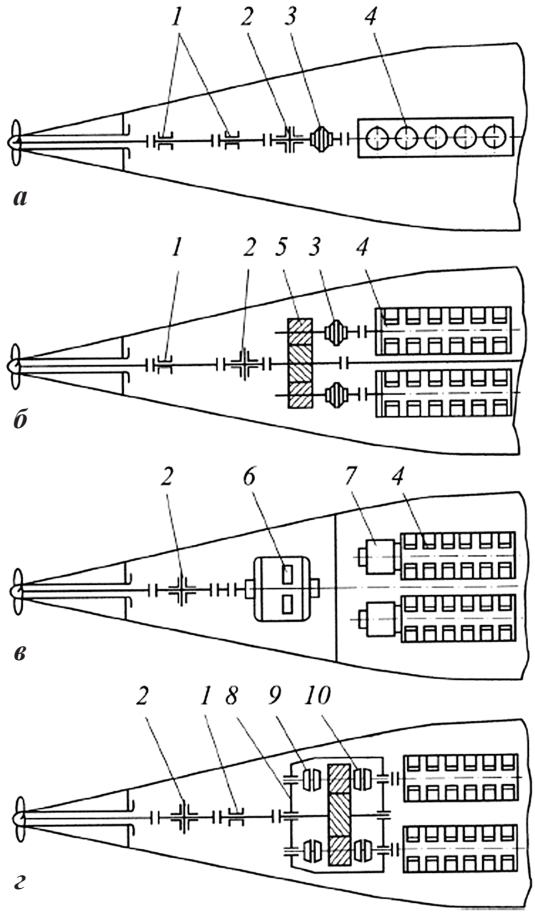


Рис. 2.12. Схема дизельних установок з різними передачами потужності:
а **–** пряма; ***б*** **–** механічна; ***в*** **–** електрична; *г* – гідравлічна;
1, *2* – опорний та упорний підшипники відповідно; *3* – муфта; *4* – ГД;
5 – редуктор; *6* – ГЕД; *7* – електрогенератор; *8* – реверсивна гідропередача;
9, *10* – гідротрансформатори відповідно заднього й переднього ходів

Сучасні зубчасті передачі досягли високого ступеня досконалості. Їм притаманні помірні маси і габарити, високий (96…98 %) ККД і значний ресурс роботи, який відповідає ресурсу найдосконаліших двигунів або навіть перевищує його.

Зубчасті передачі, що знижують частоту обертання, називаються *редукторами*, такі, що підвищують, – *мультиплікаторами*.

За допомогою редуктора на суднах може здійснюватися привід гребного гвинта від одного або декількох головних двигунів, привід двох гвинтів від одного двигуна, а також привід різних допоміжних механізмів: електрогенераторів, насосів тощо.

Зубчасті передачі редукторів складаються з ведучих шестерень, які обертаються двигуном, і веденого зубчастого колеса, що обертає валопровід або привідний механізм. Діаметр зубчастих коліс сягає 4,5 м, модуль – 10.

Типи і конструкції суднових редукторів різноманітні. Вони виконуються одноступеневими (при $i \leq 15$, тому що при більших передаточних числах колесо має великі розміри) або багатоступеневими (найчастіше, у складі сучасних СЕУ, двоступеневими) – при передаточних числах до 30…50.

За кінематичними схемами двоступеневі зубчасті передачі поділяються на два основні типи: *зубчасті передачі ланцюгового типу* і *зубчасті передачі гніздового типу.*

У двоступеневих редукторах ланцюгового типу (рис. 2.13,***а***) перший і другий ступені передач розташовуються ланцюжком один за одним. Колеса першого ступеня в редукторах гніздового типу розміщуються в осьовому проміжку між зубчастими вінцями головного колеса (рис. 2.13,***б***). У світовій практиці застосовуються обидва типи, але зубчасті передачі ланцюгового типу більш поширені.

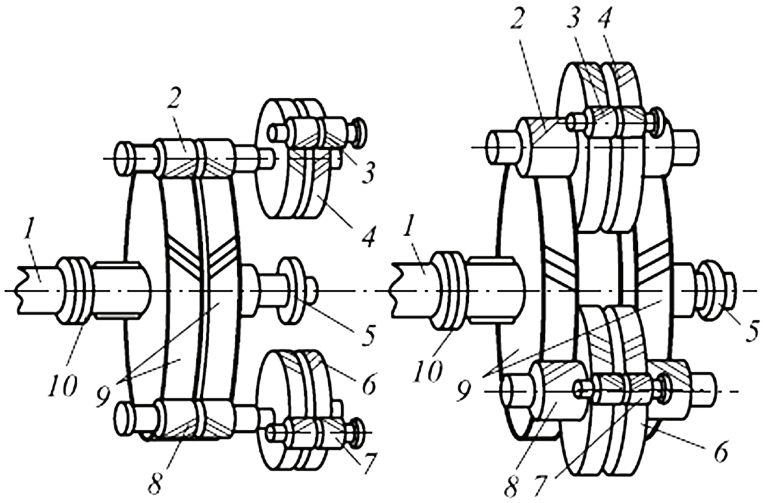


Рис. 2.13. Двоступеневі редуктори:
1 – ВП; *2*, *8* і *3*,*7* – ведучі шестерні відповідно другого та першого ступенів;
4, *6* – ведені колеса першого ступеня; *5* – гребінь ГУП;
9 – ведене зубчасте колесо редуктора; *10* – фланець

Намагання зменшити деформацію шестерень *2* першого ступеня зубчастої передачі привело до створення передач із *роздвоєнням потужності* (рис. 2.14). У такій передачі кожна з ведучих шестерень першого ступеня

передає обертальний момент не одному, а двом веденим колесам *1*. Число ведучих шестерень *3* другого ступеня, які обертають зубчасте колесо *4*, становить чотири. Роздвоєння потужності дозволяє зменшити розміри шестерень і коліс, уся передача загалом стає більш компактною. Передачі з роздвоєнням потужності широко розповсюджені в сучасній судновій практиці.

Вище наведені зубчасті передачі називаються передачами *перебірного типу*. У турбозубчастих агрегатах значної потужності знайшли застосування двоступеневі редуктори, до складу яких входить і передача *планетарного типу*. Маса й габарити таких редукторів на 30 % менші, вартість на 20 % нижче і ККД на 0,2…0,5 % вище, ніж у зубчастих передач інших типів [1, 27].

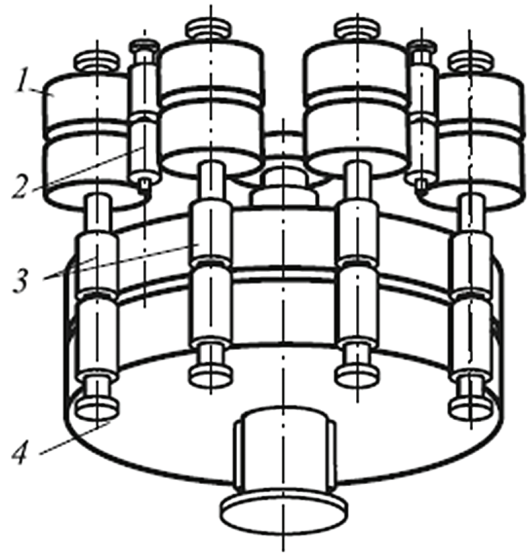
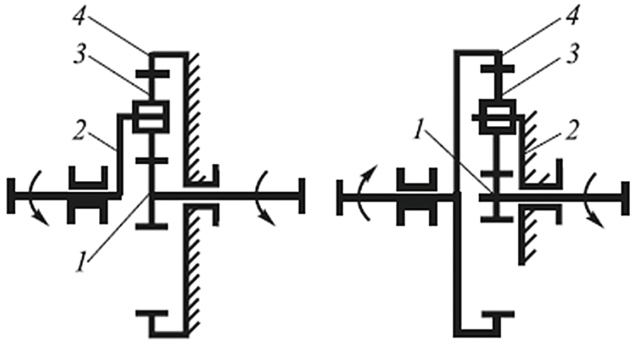


Рис. 2.14. Зубчаста передача з роздвоєнням потужності

Схеми планетарних редукторів наведені на рис. 2.15. Загальна позитивна особливість таких передач – співвісність вала двигуна і валопроводу. Планетарна передача складається з трьох основних елементів: центральної сонячної шестірні *1*, насадженої на ведучий вал, епіциклу – колеса *4* з внутрішнім зачепленням – і водила *2*, що має вісь, на якій обертаються зубчасті шестерні *3* (сателіти). Передача зазвичай виконується за однією з двох схем: з нерухомим епіциклом (рис. 2.15,***а***) або з нерухомим водилом (рис. 2.15,***б***). У складі редуктора можуть застосовуватися і диференціальні ступені – це модифікація планетарного ступеня, у якому всі ланки знаходяться в обертанні й передають потужності.



а *б*

Рис. 2.15. Кінематичні схеми планетарних передач:
а – з нерухомим епіциклом; ***б*** – з нерухомим водилом

У редукторах перебірного типу зазвичай застосовуються циліндричні косозубі передачі. Унаслідок похилого розташування зубців довжина їх збільшується, значно зростає кількість зубців, що одночасно знаходяться у зачепленні, завдяки чому досягається безперервне і плавне входження зубців у це зачеплення. Для зрівноважування осьового зусилля, створюваного похилими зубцями, робоча поверхня циліндричних зубчастих коліс і шестерень складається з двох однакових зубчастих вінців, які розташовані поряд та мають нахили зубців, спрямовані у протилежні боки. Разом із циліндричними передачами до складу редуктора енергетичної установки суден з динамічним принципом підтримання (СДПП) – на підводних крилах (СПК) і на повітряній подушці (СПП) – входять конічні передачі, призначенням яких є забезпечення приводу нагнітачів і повітряних гвинтів СПП, і рушіїв СПК.

Зубчасті колеса складаються з вала, зубчастих вінців і середньої частини, яка з'єднує вал з вінцями. Найчастіше зубчасті вінці виготовляються окремо й насаджуються на середню частину колеса. Для заготовки вінців використовується якісна вуглецева або легована сталь.

Шестерні виконують у вигляді довгих валів із центральним свердлінням, призначеним для зменшення маси й контролю якості. Матеріал шестерні має більшу міцність і твердість, ніж матеріал зубчастих вінців колеса, тому що за один і той же час роботи зубчастої передачі кожен зубець шестірні знаходиться у зачепленні в декілька разів довше, ніж кожен зубець колеса. Найбільш поширений матеріал для виготовлення шестерень – високолегована сталь.

Захист зубчастої передачі від ударних навантажень у редукторах забезпечують *торсіонні* (гнучкі) вали, які проходять через пустотілу шестерню і передають обертальний момент від ротора турбіни цій шестерні.

До місць зачеплення з метою зменшення нагрівання і зношування під тиском 0,15…0,20 МПа подається масло, яке підводиться таким чином, щоб обертовими зубцями воно затягувалося у зачеплення.

Зубчасті колеса розміщуються в закритому корпусі, який виконується рознімним за горизонталлю, верхня і нижня його частини з'єднуються між собою фланцями на болтах.

Корпус редуктора виконують зварним з листової сталі, у ньому розміщуються підшипники шестерні й вала колеса.

Перебірні редуктори одномашинних агрегатів виконуються одноступеневими, їх передаточне число не перевищує 7…10. Типова конструкція одноступеневого редуктора зі зміщенням ведучого та веденого валів у вертикальній площині наведена на рис. 2.16.

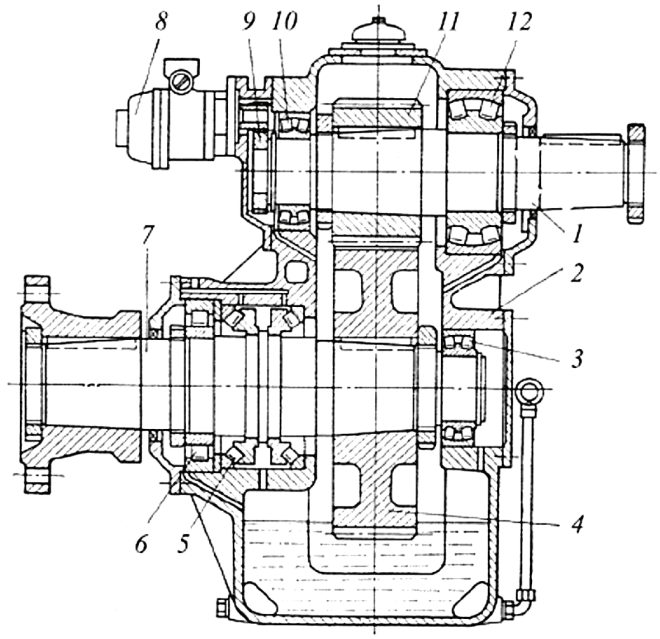


Рис. 2.16. Одноступеневий редуктор з розташуванням валів /у вертикальній площині:

1, *7* – відповідно ведучий та ведений вали; *2* – корпус; *3*, *5*, *6*, *10*, *12* – опорно-упорні підшипники; *4*, *11* – колесо й шестерня відповідно; *8* – масляний насос; *9* – привід масляного насоса

У разі необхідності забезпечення співвісного розташування двигуна та валопроводу, навіть у випадку, коли за потрібним передаточним числом можливе застосування одноступеневого редуктора, використовують двоступеневі конструкції редукторів (рис. 2.17).

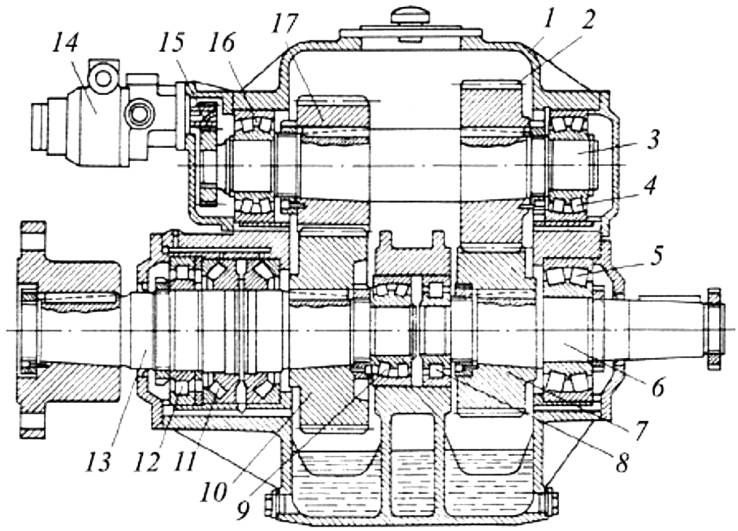


Рис. 2.17. Двоступеневий редуктор зі співвісними входом та виходом:
1 – корпус; *2*, *10* – колеса; *3*, *6*, *13* – проміжний, ведучий і ведений вали відповідно; *4*, *5*, *8*, *9*, *11*, *12*, *16* – опорно-упорні підшипники; *7*, *17* – шестерні; *14* – масляний насос; *15* – привід насоса

До складу ГТЗА танкерів типу «Крим» входить редуктор із триступеневою планетарно-перебірною передачею. Конструкцією редуктора передбачені розділення обертального моменту кожної з двох турбін (ТВТ та ТНТ) агрегата на три потоки й підсумовування на великому зубчастому колесі шести потоків обертального моменту (рис. 2.18, 2.19).

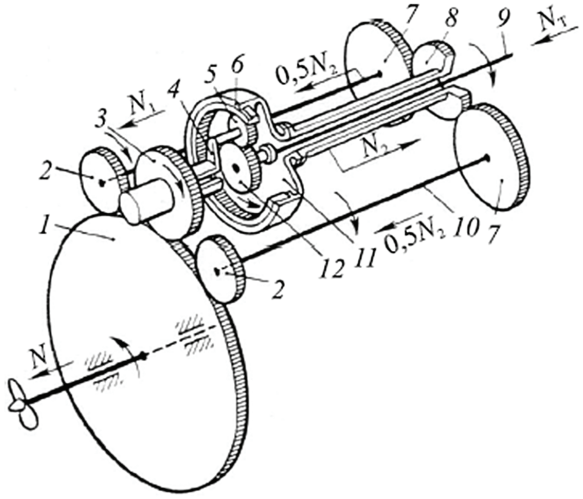


Рис. 2.18. Схема планетарно-перебірного редуктора головного турбозубчастого агрегата танкера «Крим»

Потужність кожної турбіни $N_т$ через торсіонний вал *9* підводиться до сонячної шестерні *12* диференціального ступеня *11*, у якому вона поділяється на два нерівні потоки N_1 та N_2. Перший потік потужності через сателіти *5* і водило *4* (у ступені їх чотири), жорстко закріплене на фланці центральної шестірні *3*, підводиться до колеса *1* третього ступеня. Другий потік потужності N_2 через вінець внутрішнього зачеплення епіциклу *6* спрямовується до центральної шестерні *8* другого ступеня, у якій він роздвоюється на два рівних потоки 0,5 N_2, що через ведені колеса *7*, торсіонні вали *10* та ведучі шестерні *2* також підводяться до колеса *1* третього ступеня. Кожна зі шестерень *2* та *3* передає однаковий обертальний момент. Такі редуктори мають менші масу й габарити порівняно з перебірними редукторами. Загальний вигляд планетарно-перебірного редуктора наведено на рис. 2.19.

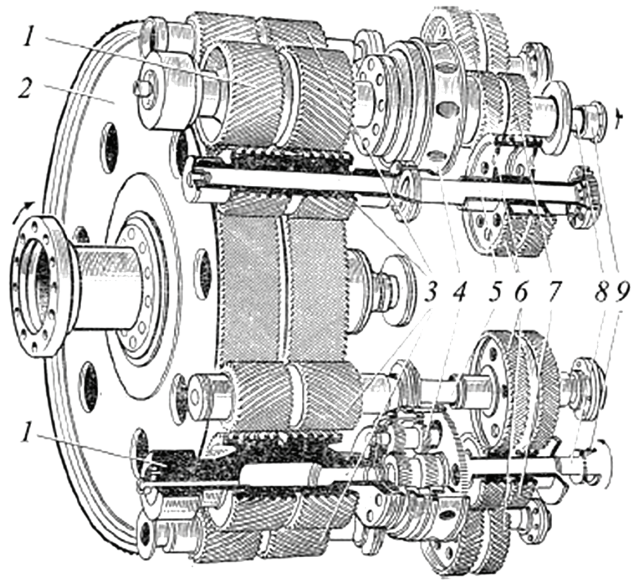


Рис. 2.19. Загальний вигляд планетарно-перебірного редуктора головного турбозубчастого агрегата танкера «Крим»:
1, *3* – шестерні третього перебірного ступеня; *2* – ведене головне зубчасте колесо; *4* – диференціал (перший планетарний ступінь редуктора); *5*, *8* – торсіонні вали; *6* – колесо другого перебірного ступеня; *7* – шестірня другого ступеня; *9* – зубчастий вінець

Конструкції редукторів енергетичних установок сучасних суден різноманітні. Їх особливості пов'язані з типом судна, типом та складом СЕУ. На рис. 2.20 [1] наведена кінематична схема редуктора СЕУ суден з горизонтальною обробкою вантажу (ролкерів) типу «Капітан Смірнов».

Енергетична установка М25 цих суден є газопаротурбінною: головний двигун – ГТД, на відхідних газах цього двигуна працює утилізаційний котел, пара з якого поступає на утилізаційну парову турбіну. Редуктор підсумовує потужність ГТД (14 000 кВт) і ПТ (3200 кВт) та передає її валопроводу.

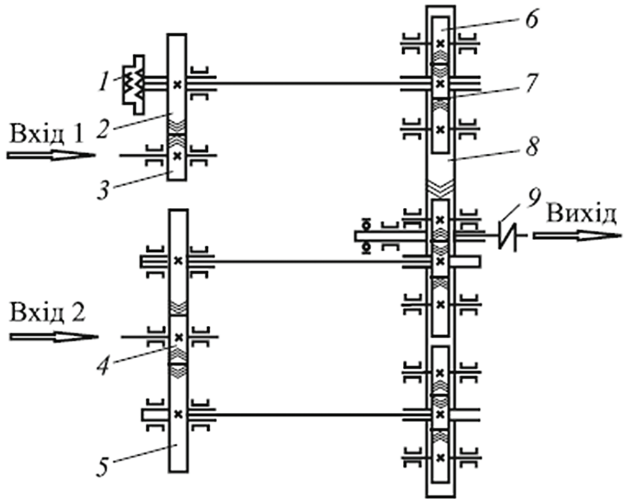


Рис. 2.20. Нереверсивний підсумовувальний редуктор:
1 – муфта кулачково-фрикційна; *2*, *5* і *3*, *4*, *7* – шестерні ведені й ведучі відповідно; *6* – шестірня проміжна; *8* – колесо ведене; *9* – муфта пружна

Редуктор – нереверсивний, двоступеневий, перебірного типу. Вхід 2 – від ГТД, з подальшим роздвоєнням потужності на дві ведені шестерні, вхід 1 – від утилізаційної ПТ. За допомогою кулачково-фрикційної муфти відбувається підключення утилізаційної ПТ до силової схеми редуктора. Маса редуктора – 55 т, габарити – 4,6×3,6×4,0 м.

Редуктор газотурбінної енергетичної установки СПК «Циклон» наведений на рис. 2.21. Редуктор кутовий з роздвоєнням потужності на першому ступені й підсумовуванні її на другому. Перший ступінь – високошвидкісна гіперболоїдна двопотокова зубчаста передача. Другий ступінь – циліндрична двопотокова косозуба передача. Кут між осями вхідного й вихідного валів редуктора складає 10° у вертикальній площині, що дозволяє компонувати енергетичну установку з одностороннім підведенням і відведенням потужності від редуктора. Редуктор передбачає можливість додаткового підключення ще одного двигуна на загальний валопровід.

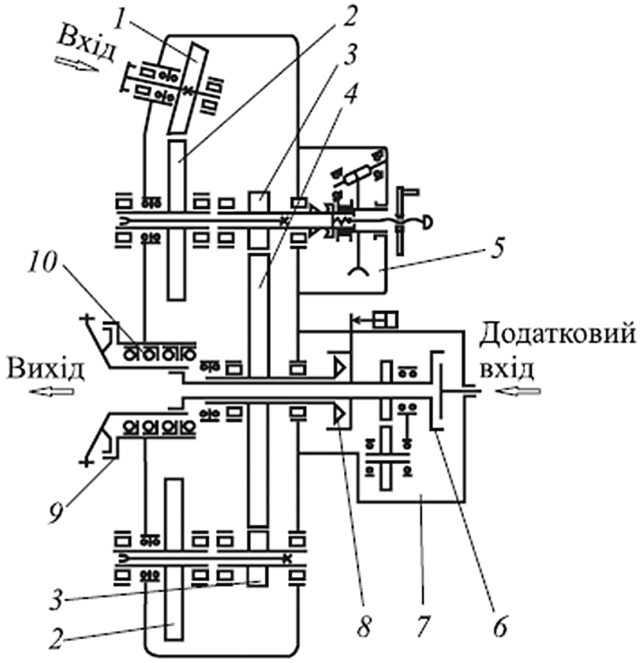


Рис. 2.21. Редуктор енергетичної установки судна на підводних крилах:
1, *3* – шестерні ведучі; *2*, *4* – колеса ведені; *5*, *9* – валоповоротний та стопорний пристрої відповідно; *6*, *8* – відповідно муфта зубчаста й така, що вмикається дистанційно; *7* – маслоагрегат; *10* – підшипник упорний

Редуктори суден і кораблів на повітряній подушці у разі застосування одного головного двигуна являють собою комплекс, що складається з трьох редукторних агрегатів: роздавального редуктора, який забезпечує розподіл потужності ГД на повітряний гвинт і вентилятор, що нагнітає повітря під днище, редуктора повітряного гвинта й редуктора вентилятора. Редуктор роздавальний (рис. 2.22) є циліндрично-конічним з двома потоками потужності у конічних передачах. Редуктор повітряного гвинта (рис. 2.23) [1] – циліндрично-конічний з двома потоками потужності у конічних передачах і підсумовуванням потужності співвісної та планетарної циліндричних передач. Редуктор вентилятора (рис. 2.24) – конічно-циліндричний. Конічна передача – співвісна, чотирипотокова (псевдопланетарна).

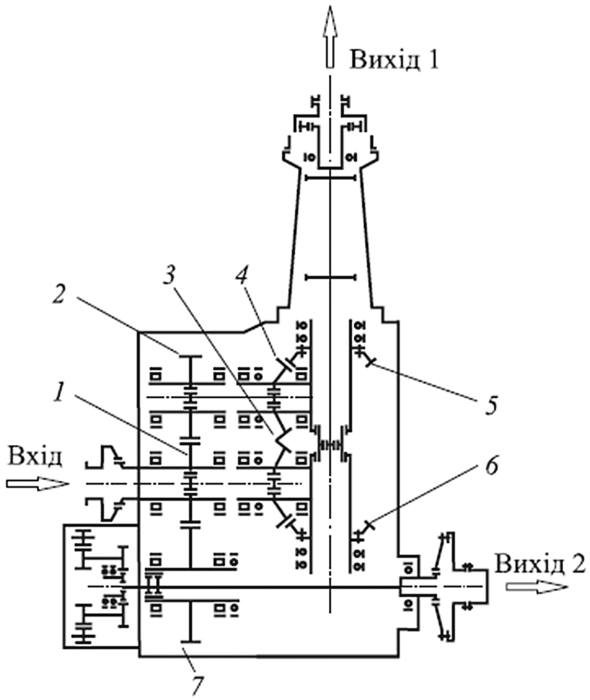


Рис. 2.22. Роздавальний редуктор редукторного комплексу суднової енергетичної установки судна на повітряній подушці:
1 і *2*, *7* – ведуча та ведені шестерні відповідно; *3* – шестерня конічна; *4* – шестерня ведуча конічна; *5*, *6* – колеса конічні

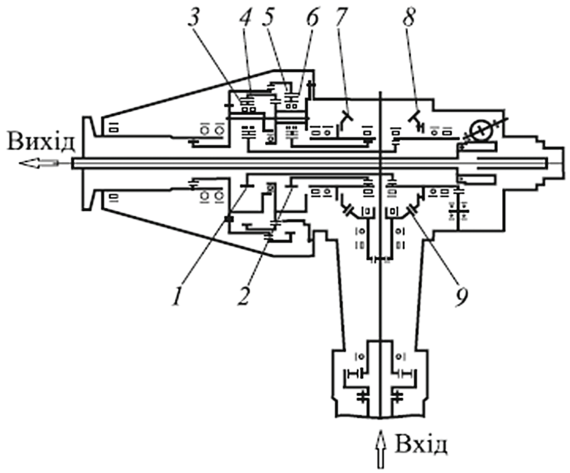


Рис. 2.23. Редуктор повітряного гвинта редукторного комплексу суднової енергетичної установки судна на повітряній подушці:
1, *2* і *5* – ведучі та ведена шестерні; *3*, *4*, *6*, *9* – сателітна, нерухома, проміжна й конічна шестерні відповідно; *7*, *8* – колеса конічні

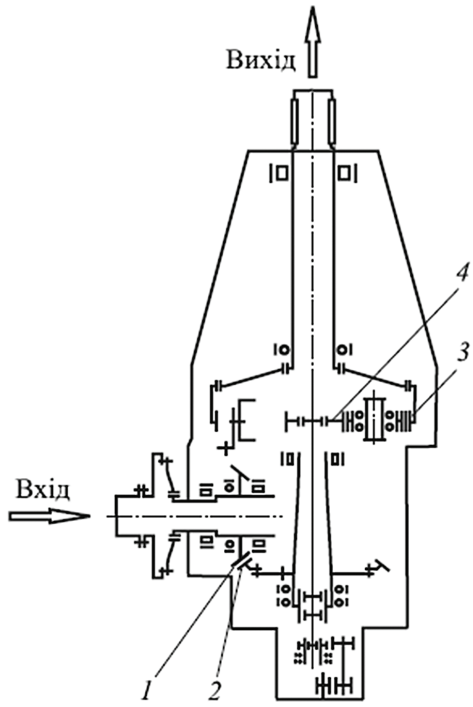


Рис. 2.24. Редуктор вентилятора редукторного комплексу ЕУ судна на повітряній подушці:
1 – шестерня ведуча конічна; *2* – колесо ведене;
3, *4* – ведена й ведуча шестерні відповідно

Особливості будови реверсивного редуктора можна представити на прикладі редуктора, призначеного для підсумовування потужності двох ГТД потужністю до 18 000 кВт кожен (рис. 2.25) [1]. Такий редуктор був застосований на великому протичовновому кораблі «Комсомолець України», на якому були встановлені два агрегати з двома першими у світі всережимними ГТД потужністю по 13 000 кВт.

Редуктор реверсивний двоступеневий перебірного типу. Реверс редуктора здійснюється за допомогою реверсивного комплексу, що складається з гідродинамічної муфти заднього ходу та фрикційних і кулачкових муфт переднього ходу. Фрикційні муфти призначені для вирівнювання частот обертання кулачкових півмуфт.

Гідравлічні передачі – це сукупність гідравлічних механізмів, за допомогою яких енергія обертання ведучого вала (вала двигуна) передається веденому валу – валопроводу з рушієм. Залежно від принципу дії розрізняють *гідростатичні* й *гідродинамічні* передачі.

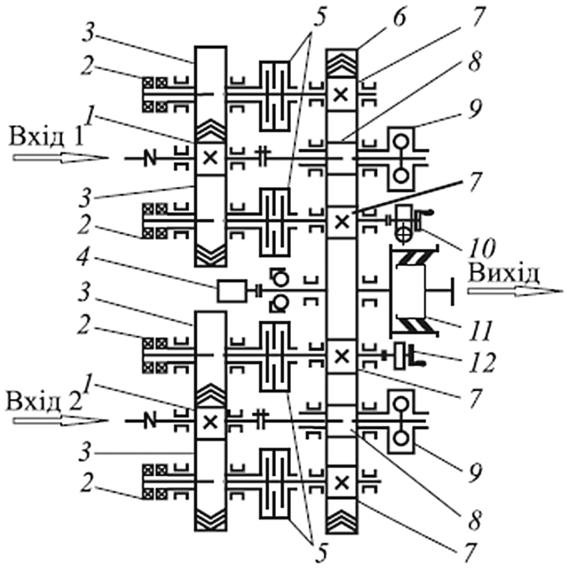


Рис. 2.25. Реверсивний підсумовувальний редуктор:
1, *8* – шестерні ведуча й заднього ходу; *2*, *5*, *11* – кулачкова, фрикційна та звукоізолююча муфти; *3*, *7* – шестерні переборів; *4* – привід масляного насоса; *6* – зубчасте колесо ведене; *9* – гідромуфта заднього ходу;
10, *12* – валоповоротний і стопорний пристрої

У *гідростатичній* передачі енергія обертання вала двигуна в гідравлічному насосі об'ємного типу перетворюється на гідростатичний напір робочої рідини (мінерального масла або спеціальної синтетичної рідини), що по трубопроводу передається до гідравлічного двигуна, у якому перетворюється на енергію обертання рушія. Коефіцієнт корисної дії гідростатичної передачі складає 0,83…0,88. Гідростатичні передачі застосовують для приводу підрулюючих пристроїв, крильчастих рушіїв у головних установках потужністю 1000…2000 кВт на суднах, де потрібне часте маневрування (пороми, малі промислові судна тощо) [1].

У *гідродинамічній* передачі енергія від ведучого вала до веденого передається за рахунок динамічного (швидкісного) напору циркулюючою робочою рідиною (зазвичай маслом). Складовими елементами гідродинамічної передачі є відцентровий насос і гідротурбіна, наближені так, що їх колеса утворюють тороподібну порожнину, заповнену робочою рідиною. Залежно від конструкції гідродинамічні передачі поділяються на *гідродинамічні муфти* (гідромуфти) і *гідродинамічні трансформатори* (гідротрансформатори). Основна відмінність гідротрансформатора від гідромуфти полягає в тому, що у першого між колесами насоса і турбіни розміщений напрямний апарат, який жорстко зв'язаний з корпусом передачі.

На рис. 2.26 наведена схема передачі обертального моменту від вала двигуна *5* до вала гребного гвинта *1* за допомогою *гідротрансформатора*. Двигун приводить у дію робоче колесо *4*, яке надає рідині механічну енергію, збільшуючи момент кількості руху рідини через напрямний апарат *3* до гідравлічної турбіни *2*. В останній відбувається зменшення моменту кількості руху рідини, завдяки чому створюється обертальний момент на валу гребного гвинта. З турбіни рідина знову повертається до насоса. Коефіцієнт корисної дії гідротрансформатора становить 0,88…0,92 [27].

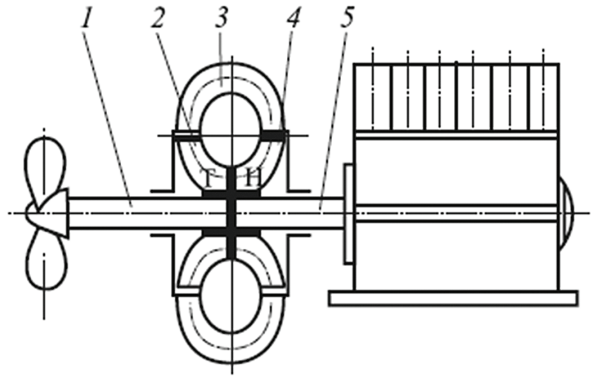


Рис. 2.26. Схема суднової гідродинамічної передачі

Застосування гідротрансформаторів у СЕУ забезпечує:

зміну частоти обертання веденого вала при змінній частоті ведучого вала в 1,2…12,0 разів;

реверс веденого вала;

виключення перевантаження двигуна, практичне усунення крутильних коливань;

швидке реверсування, а також швидке відключення веденого вала від двигуна;

низький рівень шуму.

У той же час виникають труднощі у практичному застосуванні, пов'язані з відносно низьким ККД гідротрансформаторів.

Гідромуфта складається з насосного колеса *2* (рис. 2.27), закріпленого на ведучому валу *1*, турбінного колеса *3*, зв'язаного з веденим валом *7*, і кожуха *8*, який з'єднаний з насосним колесом і охоплює турбінне колесо. Насосне і турбінне колеса – відцентрового типу. Рідина подається до гідромуфти спеціальним насосом по каналу *5* у камеру наповнення *6*, а з неї у робочу порожнину гідромуфти. Через отвори *9*, розташовані на периферії кожуха, рідина безперервно витікає з робочої порожнини в допоміжну порожнину *4*. Стабільність температури забезпечується безперервною

зміною рідини, яка під час циркуляції у робочій порожнині муфти нагрівається за рахунок тертя.

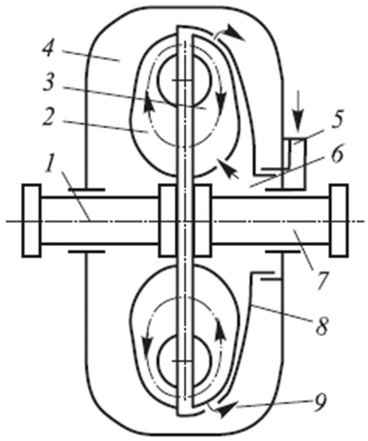


Рис. 2.27. Схема суднової гідродинамічної муфти

Передача енергії від ведучого вала до веденого здійснюється наступним чином: у насосному колесі гідромуфти механічна енергія двигуна перетворюється на енергію потоку рідини; з насосного колеса рідина поступає безпосередньо у турбінне колесо, у якому енергія рідини перетворюється на механічну енергію веденого вала, після чого рідина знову поступає в насосне колесо. Коефіцієнт корисної дії гідромуфти становить 0,96…0,98. Гідромуфти використовують для еластичного зв'язку між двигуном і рушієм, зменшення крутильних коливань, полегшення приєднання та від'єднання рушія від лінії вала.

Електричні передачі. В електричних передачах відбувається подвійне перетворення енергії: механічна енергія ГД перетворюється на електричну в електрогенераторах, електрична енергія по кабельним лініям передається до ГЕД, які перетворюють її на механічну енергію обертання гребного вала і гвинта. Електричні передачі бувають на постійному і змінному струмі, а також комбіновані, а саме: з генераторами змінного струму й електричними двигунами постійного струму [1].

Вони дозволяють використовувати потужність декількох високообертових головних дизель- або турбогенераторів для приводу одного чи декількох малообертових ГЕД. Це підвищує живучість СЕУ, дозволяє застосовувати ВОД і СОД. Завдяки відсутності механічного зв'язку між головними електрогенераторами і ГЕД забезпечується захист первинного (теплового) двигуна від зовнішнього впливу з боку гребного гвинта, а також раціональне розміщення елементів енергетичної установки в корпусі судна.

Можливість використання головних генераторів для живлення інших електроспоживачів судна – ще одна перевага електропередач. Електропередачі на постійному струмі мають високі маневрені якості, найшвидший, порівняно з передачами інших типів, реверс, високі пускові моменти; повне загальмовування ГГ при такій передачі здійснюється протягом 5…16 с, а вибіг судна при його номінальній початковій швидкості не перевищує 6…7 довжин судна. Пропульсивні установки з електропередачами постійного струму легкокеровані.

Електропередачі, особливо на постійному струмі, мають суттєві переваги, але їм притаманні й недоліки: порівняно низький ККД (0,84…0,88 – для постійного струму, 0,88…0,93 – для змінного); великі масогабаритні характеристики; висока вартість електродвигунів і генераторів; машини постійного струму менш надійні, ніж машини змінного струму тощо.

З урахуванням переваг та недоліків електричні передачі постійного струму використовують на суднах, що потребують частої зміни швидкості руху й режимів роботи зі зміною швидкості (криголами, транспортні судна льодового плавання, буксирні судна), а електропередачі змінного струму – на суднах, рушії яких більший проміжок часу працюють на постійних режимах без зміни швидкості, а також на інших суднах у поєднанні з ГРК [1].

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. *У яких елементах СЕУ відбуваються процеси, пов'язані з перетворенням енергії?*
2. *Охарактеризуйте втрати енергії, які мають місце у процесах перетворення енергії в СЕУ.*
3. *Наведіть приклади генераторів робочого тіла в різних типах СЕУ.*
4. *Які елементи входять до складу газогенератора газотурбінного двигуна?*
5. *Сформулюйте центральну задачу суднової енергетики.*
6. *Розгляньте різні варіанти представлення СЕУ під час визначення її ефективності.*
7. *Охарактеризуйте способи підвищення ефективності СЕУ.*
8. *Утилізація яких потоків енергії знайшла найбільше застосування на суднах? Обґрунтуйте відповідь.*
9. *Назвіть шляхи використання утилізованої теплоти на суднах.*
10. *Від чого залежить ефект від застосування утилізації теплоти СЕУ?*
11. *У чому полягають особливості оцінювання ефективності роботи СЕУ?*
12. *Охарактеризуйте експлуатаційні режими роботи СЕУ транспортного судна.*
13. *Охарактеризуйте експлуатаційні режими роботи СЕУ пасажирського судна.*
14. *Які експлуатаційні режими роботи СЕУ характерні для бурових суден?*
15. *Які експлуатаційні режими роботи СЕУ характерні для трубоукладальник суден?*
16. *Назвіть основні втрати енергії, які мають місце у ДВЗ.*
17. *Які втрати енергії мають місце між двигуном внутрішнього згоряння та рушієм?*
18. *Як визначається корисний ефект функціонування пропульсивного комплексу?*
19. *Покажіть, як визначається ККД пропульсивного комплексу.*
20. *Як визначається ККД електрогенератора?*
21. *Чому дорівнює коефіцієнт використання теплоти в допоміжному котлі?*
22. *Як визначається коефіцієнт використання теплоти в утилізаційному котлі?*
23. *Покажіть, як визначається на ходовому режимі ККД СЕУ, у якій на цьому режимі працюють 1ГД, 2ДДГ, 1ДК, 1УК, 1ВГДГ.*
24. *Покажіть, як визначається на ходовому режимі коефіцієнт використання теплоти СЕУ, у якій на цьому режимі працюють 1ГД, 2ДДГ, 1ДК, 1УК і 1 ВГДГ.*
25. *Для завдання 24 побудуйте теплову діаграму розподілу потоків теплоти.*

26. *Сформулюйте призначення суднового валопроводу.*
27. *Назвіть основні елементи, які входять до складу валопроводу.*
28. *Наведіть схему розташування валопроводу. Покажіть на ній підшипники, дейдвудний та спеціальні пристрої.*
29. *Охарактеризуйте призначення основних елементів суднового валопроводу.*
30. *Яким чином забезпечується прокручування валопроводу на стоянках судна?*
31. *Які функції гальмівного пристрою у складі валопроводу?*
32. *Чи використовується гальмовий пристрій для зупинки обертового вала?*
33. *Які принципи закладені у визначення кількості опорних підшипників валопровода та місць для їх розташування?*
34. *Які функції монтажних підшипників у складі суднового валопровода?*
35. *Від чого залежать склад та розміри валопровода?*
36. *Назвіть максимальну потужність, що передається валопроводом, та діаметр гребного вала сучасного судна.*
37. *Які підшипники застосовуються в дейдвудних пристроях?*
38. *Які принципи розташування напірної масляної цистерни для змащення дейдвудних підшипників? Обґрунтуйте прийняте рішення.*
39. *З яких елементів складається дейдвудне ущільнення?*
40. *Як забезпечується змащення та охолодження поверхонь тертя дейдвудних ущільнень?*
41. *Які типи передач знайшли застосування в СЕУ?*
42. *Охарактеризуйте можливі застосування прямих передач.*
43. *Наведіть властивості дизельних установок з МОД із прямою передачею, які сприяють їх широкому застосуванню.*
44. *Який рівень ККД характерний для сучасних зубчастих передач?*
45. *На які типи поділяються двоступеневі зубчасті передачі за кінематичними схемами?*
46. *Обґрунтуйте необхідність роздвоєння потужності в редукторах СЕУ.*
47. *Наведіть схему планетарного редуктора. Які схеми планетарних редукторів застосовуються в СЕУ?*
48. *У чому полягає перевага циліндричних косозубих передач перед прямозубими?*
49. *Як зрівноважуються осьові зусилля, створювані косозубими зубцями?*
50. *Поясніть, яке конструктивне рішення застосовується для захисту зубчастої передачі від ударних навантажень.*
51. *Охарактеризуйте кінематичну схему редуктора ГТЗА танкера типу «Крим».*
52. *Розгляньте особливості редуктора СЕУ суден типу «Капітан Смірнов».*
53. *Охарактеризуйте особливості редуктора газотурбінної установки СПК «Циклон».*

54. *З яких комплексів складаються редуктори СПП?*
55. *Сформулюйте принцип дії гідростатичної передачі.*
56. *Наведіть схему гідродинамічної передачі.*
57. *У чому полягає схожість і відмінність гідравлічних муфт та гідравлічних трансформаторів?*
58. *Які можливості надає застосування гідротрансформаторів у СЕУ?*
59. *Наведіть схему перетворення енергії електричних передач.*
60. *Розгляньте основні типи електричних передач.*
61. *Проаналізуйте переваги електричних передач, які визначають можливість їх поширеного застосування.*
62. *На яких типах суден доцільно використовувати електричні передачі?*

ЧАСТИНА ІІ
ОСНОВНІ ЕТАПИ СТВОРЕННЯ ТА РОЗВИТКУ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

ГЛАВА 1. ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ РУХУ СУДЕН ТЕЧІЙ РІЧОК ТА МОРІВ, МУСКУЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ ЛЮДЕЙ І СВІЙСЬКИХ ТВАРИН, ЕНЕРГІЇ ВІТРУ ТА СОНЦЯ

1.1. Забезпечення руху суден водною течією та за допомогою мускульної енергії

Первісні люди розселялись переважно по берегам річок, озер, близько до океанічного узбережжя. Це було пов'язано багато в чому з можливістю задовольняти свої потреби в їжі: тут люди ловили рибу, сюди приходили на водопій звірі і мисливці полювали на них. Поряд із цим поблизу берега можливо було побудувати житло на палях, щоб до нього не добрались хижаки, які нападали на людей у лісових куренях.

Поштовхом до початку опанування водних шляхів первісними людьми стали стовбури дерев, які пропливали зовсім поруч з ними по воді.

Переміщуватись на колоді було незручно, унаслідок того, що вона переверталась – і люди стали зв'язувати стеблами рослин декілька колод: утворився пліт. Наступним кроком у розвитку транспортних технологій водними шляхами стало видовбування та випалювання стволів дерев та виробництво з отриманих конструкцій човнів. Спочатку люди використовували лише енергію води, що рухається – течію річок та морських течій. Цей метод пересування по воді застосовувався для сплаву заготовленої деревини у вигляді розрізнених колод (так званий мольовий сплав).

Найпростішим та найдавнішим засобом водного транспорту є пліт, що являє собою плавучу споруду у вигляді плоскої платформи, яка складається з декількох плаваючих предметів, зв'язаних між собою або скріплених загальним настилом. Як плаваючі предмети застосовуються колоди, в'язки очерету, посудини, надувні ємності. Перші плоти з'явились у епоху раннього неоліту (VII–IV тис. років до н. е.).

Уже в наші часи норвезький учений Тур Хейердал, намагаючись довести можливість заселення у давні часи островів Тихого океану

мешканцями територій з берегів Південної Америки, побудував у повній відповідності з існуючими у давні часи канонами пліт з бальсового дерева і здійснив плавання на ньому лише за допомогою потужних течій на відстані біля 8000 км.

Історична довідка

Тур Хейердал – видатний норвезький учений-етнограф, археолог, мандрівник, у 1938 році закінчив природно-географічний факультет університету в Осло.

На підставі вивчення пам'ятників культури різних країн він висунув гіпотезу про трансокеанічну міграцію стародавніх народів між Старим та Новим Світом, про спільність культур країн, що розділені океанами. У 1947 р. Т. Хейердал з п'ятьома супутниками на плоту «Кон-Тікі» перетнув Тихий океан шляхом припустимої міграції стародавніх мешканців Південної Америки від Перу до архіпелагу Туамоту, підтвердивши можливість заселення Полінезії саме таким шляхом.

У 1955–1956 рр. на підставі археологічних досліджень він довів, що острови Пасхи, Рана-іті і Маркузьські були заселені ще у IV ст. н. е. Для обґрунтування гіпотези про міграцію народів із Африки до Америки він організував у 1969 та 1970 рр. експедиції на парусних човнах «Ра» та «Ра-2» з папірусу від західних берегів Марокко до островів Центральної Америки. У 1977–1978 рр. на очеретяному човні «Тігріс» проплив за маршрутом Ель-Курна (Ірак) – гирло річки Інд-Джибуті (Ефіопія). Є автором книг, у яких викладені хід та особливість своїх унікальних експедицій.

Корисна інформація

«Кон-Тікі» – бальсовий[1] пліт, на якому Т. Хейердал у 1947 році здійснив плавання через Тихий океан від берегів Перу до атола Рароа (рис. 1.1). Метою експедиції було довести морехідність бальсових плотів, якими з давнини користувались південно-американські індіанці, та можливість досягти Полінезії зі сходу, що повинно було підтвердити гіпотезу Хейердала про заселення Полінезії індіанцями Південної Америки.

Пліт «Кон-Тікі», побудований у Перу із бальсових колод довжиною 14 м був точною копією стародавніх перуанських та екваторіальних плотів. Пліт був обладнаний двоногою щоглою, на якій піднімають пряме вітрило. Управління плотом здійснювалось за допомогою весел та дощок, установлених вертикально між колодами – швертами. Попереду плоту розташована невеличка каюта для екіпажу і провіанту, частина запасів зберігалася на палубі. Харчування мандрівників було таким же, як і у стародавніх індіанців. «Кон-Тікі» вийшов з порту Кальяо 26 квітня 1947 р. і на 101 день плавання 7 серпня досяг островів Полінезії, пройшовши 8 тис. км і доказавши свої чудові мореплавні якості.

[1] Єдиний вид бальсового дерева (Ochroma pyramidale) росте у Південній Америці, досягаючи 30 метрів за перші 10 років життя. Назва «бальса» походить від іспанського слова «пліт». Деревина у свіжозрубленому вигляді містить 95 % вологи, у висушеному стані стає надзвичайно легкою, досягаючи питомої ваги до 120 кг/м^3, для порівняння: у пробкового дерева цей показник складає 240 кг/м^3, у сосни – 400 кг/м^3, у сухої берези – 600 кг/м^3. Незважаючи на малу щільність, міцність бальси близька до дуба та берези. Має чудову плавучість, але значна пористість обмежує час постійного перебування у воді. Унікальні якості даної деревини відомі ще з давніх часів, інки робили із неї плоти та каное для здійснення тривалих подорожей.



Рис. 1.1. Пліт «Кон-Тікі»

На розвиток цих досліджень наприкінці 60-х років минулого століття Тур Хейердал здійснив ще два трансокеанські плавання на екзотичних папірусних човнах.

Корисна інформація

«Ра-1» та «Ра-2» – папірусні[2] судна експедиції Т. Хейердала, який двічі (1969 р., 1970 р.) перетнув на них Атлантичний океан зі сходу на захід. Цим Т. Хейердал довів морехідність стародавніх папірусних суден і можливість плавання між Африкою та Америкою у давні часи. Обидва плавальні засоби створювались за давньоєгипетськими зразками з папірусу, що був заготовлений у Чаді. «Ра-1» була побудована чадськими майстрами, а «Ра-2» – індіанцями, що мешкають на берегах озера Тітікака у Болівії (рис. 1.2). На обох суднах установлені двоногі щогли, на яких піднімали вітрила. Управління цими плавучими засобами здійснювалось стерновими веслами, які закріплені вертикально за допомогою румпеля. По центру кожного судна розташована плетена каюта для розміщення екіпажу та запасів судного провіанту. Частина припасів була розміщена на палубі у глиняних посудинах. Складові папірусних в'язок суден ув'язані канатами, кінці кожної в'язки папірусу оброблені бітумом.

«Ра-1» пройшла від порту Сафи (Марокко) Атлантичним океаном 2700 миль, а «Ра-2» – 3200 миль.

[2] Папірус – водно-болотна рослина, яка зростає у Середземномор'ї, у дельті Нілу, на Сицилії, у Палестині та Сирії, на озері Чад та у дельтах таких африканських річок, як Нігер та Конго. Тригранні стебла папірусу як водної, так і болотної рослини, мають повітряні судини і великі міжклітинники, наповнені повітрям. Вони легкі й не тонуть у воді. Папірус застосовується для плетіння канатів, циновок та побудови плавучих засобів.

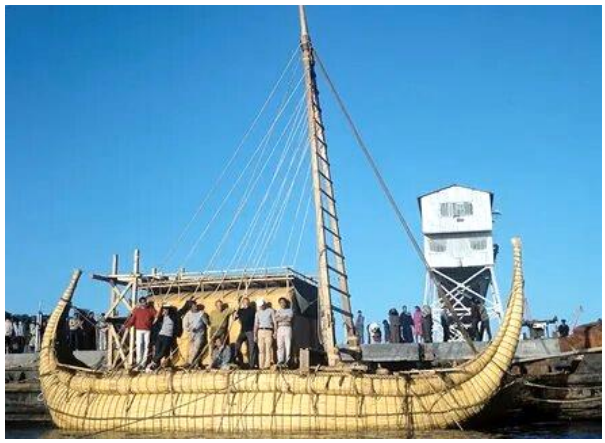


Рис. 1.2. Папірусний човен «Ра-1»

Початок мореплавання відносять до первісного суспільства і пов'язують з одним із перших суден у світі – біблейським Ноєвим ковчегом, який є некерованим плавучим засобом достатньо великих розмірів, навіть за теперішніми уявленнями.

Цікава інформація

Ноєв ковчег (на івриті ковчег – коробка, сундук) відповідно до Біблії – це судно, побудоване за повелінням Бога для рятування від потопу своєї сім'ї, а також усіх тварин (від двох до семи осіб кожного виду). Старий Заповіт[3] дає достатньо чіткі вказівки з його побудови:

14 Зроби собі ковчега з дерева гофер. З перегородками зробиш ковчега, і смолою осмолиш його ізсере́дини та ізнадвору.

15 І отак його зробиш: три сотні ліктів довжина ковчега, п'ятдесят ліктів ширина йому, а тридцять ліктів височина йому.

16 Отвір учиниш в ковчезі, і звузиш на лікоть його від гори, а вхід до ковчегу влашту́єш на боці його. Зробиш його на поверхи долішні, другорядні й третьорядні.

Стосовно біблейського тексту: загальноприйнята довжина ліктя складає 0,523 м, тоді довжина ковчегу – 156,9 м, ширина – 26,2 м, висота – 15,7 м.

До речі, окрім рекомендованих розмірів плавзасобу, Ною, як кораблебудівнику надаються вказівки з конструкції: на ковчегу повинні бути три палуби, відсіки, люки; з використанням відповідних матеріалів: дерево «гофер» – це зазвичай смолисті дерева (кедр, кипарис, сосна та інші породи хвойних), які важко піддаються гниттю та придатні для побудови кораблів; смола для надання водонепроникності корпусу. За технологією суднобудівників задані розміри довжини, ширини та висоти ковчега

[3] Біблія. Книги Старого Заповіту. Перша книга Мойсеєва: Буття, Гл. 6, вірші 14, 15, 16 *пер.: Іван Огієнко.*

складають так званий «золотий переріз». Спільно з правильним вибором матеріалу корпусу це забезпечило відмінні морехідні якості ковчега – він переніс накати велетенських хвиль Потопу, що продовжувався близько сорока днів та ночей.

Широко розповсюдженим протягом багатьох років був сплав по течії річок деревини у вигляді спеціально виготовлених плотів або барж одноразового застосування, які розбирали на колоди у пунктах призначення, та вантажних барж. Вантажопідйомність таких барж сягала декількох тисяч тонн.

У позаминулому столітті тільки на Волзі, працювало біля 400 тис. бурлаків, що спеціальними тросами, лямки яких надягались на плечі та груди, тягнули баржі з вантажем проти течії. Судна за добу проходили 4–6 км. Іноді для таких цілей використовували коней.

Перші згадки про використання тварин для забезпечення руху суден зустрічаються у стародавніх книгах єгиптян, греків, римлян. Так в одному старовинному китайському рукописі було знайдено зображення судна з трьома парами гребних коліс, які приводили до дії воли, що ходили по палубі навкруги во́рота (рис. 1.3). Відомо, що римський консул Клавдій у 260 р. до н. е. переправив до Сицилії свої війська на суднах з гребними колесами, які оберталися биками та конями.

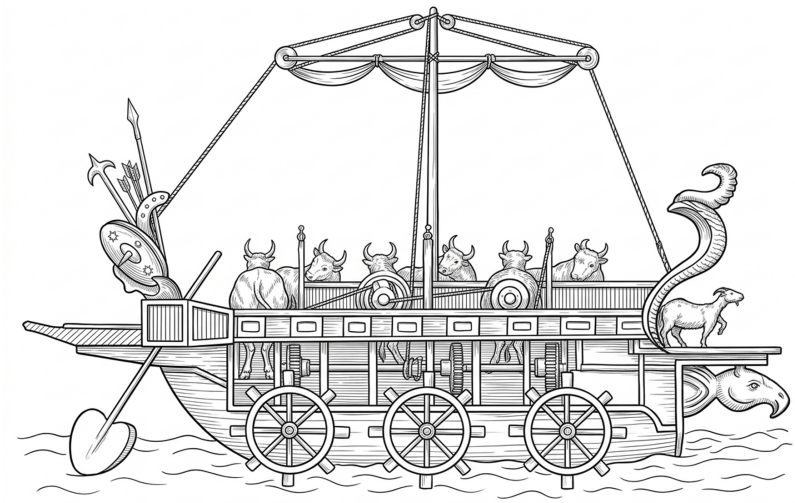


Рис. 1.3. Колісне судно Стародавнього Китаю,
що приводилось до руху биками

На початку XIX ст. було побудовано судно, на якому багатолопатевий рушій колісного типу приводився до дії кіньми (рис. 1.4). Рушій складався

з двох рядів пластин (на кожному борті), які поперемінно опускались у воду та загрібали. Таке судно носило назву «*коноводного*».

Для нього було потрібно 80–120 коней, половина працювала, половина відпочивала, за добу проходили до 25 км. Іноді до коноводної машини ставили волів. Вантажопідйомність коноводних суден досягала 6500 т [6]. У середині XIX ст. на річці Волга ходило до 200 «коноводок».

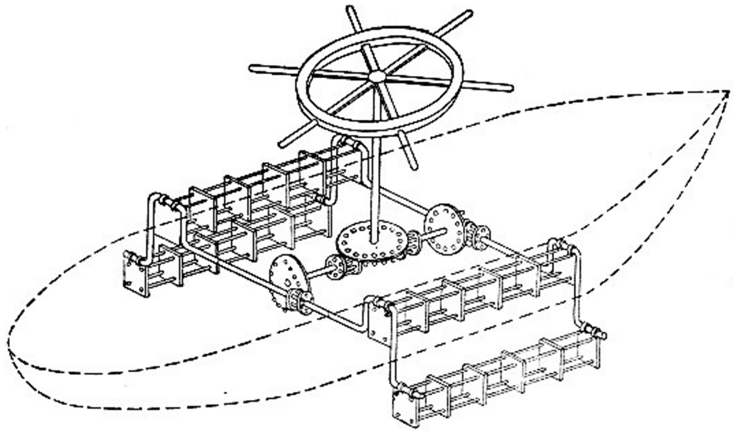


Рис. 1.4. Схема руху коноводного судна

Існують також способи використання енергії річки для руху судна вверх проти течії. Подібна технологія була застосована під час побудови Іваном Кулібіним у 1782 році «водохідного судна», у якого гребне колесо оберталось завдяки течії води, що набігала, при цьому на вал намотувався канат якорів, заведених проти течії, який і підтягував судно.

Поперемінне використання двох якорів, які завозились вперед по курсу, забезпечувало рух судна проти течії річки. За добу судно з вантажем 60 т проходило по 25 км. Це «водохідне» судно працювало до 1808 р.

У XVIII столітті були запропоновані численні проєкти суден, у яких течія річки використовувалась для руху проти течії, але тільки окремі з них були реалізовані. Це туєрні судна та судна з парашутними гідромоторами.

Установлений на туєрному судні механізм (типу лебідки) пропускає через себе укладений по дну ланцюг. Лебідка може приводитись до дії силою людей, тварин або від механічного двигуна (рис. 1.5). До речі, навіть сьогодні таке туєрне судно використовується у Сибірі на річці Єнісей, де воно використовується для переведення пасажирських і транспортних суден через підводну перешкоду – Казачинські пороги. Технологія є достатньо простою: судно, що переводиться, щільно пришвартовується

до туєру, утворюючи спільний транспортний комплекс, який рухається незмінним курсом – по ланцюгу, закріпленому на дні.

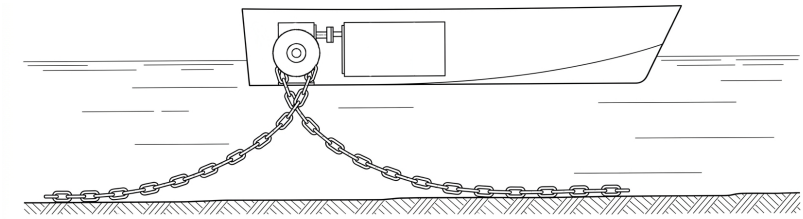


Рис. 1.5. Схема руху туєрного судна

Інженер Микола Ягі у вісімдесятих роках минулого століття запропонував ідею буксирування туєрного судна проти течії річки силою самої течії за допомогою так званого парашутного гідромотора. Сила тяги такого гідромотора створювалась невеликими парашутами, зробленими з цупкої міцної тканини і з'єднаними у безкінечний ланцюг. Парашути тієї гілки ланцюга, яка у даний час знаходиться у воді, розпускаються силою течії та тягнуть за собою весь ланцюг. При цьому відбувається обертання туєрного колеса. Унаслідок цього туєрне судно рухається проти течії і тягне за собою баржу.

Блискучим прикладом застосування енергії водних течій для руху плавучих засобів стала експедиція підводного дослідницького апарата «Бен Франклін», яка відбулась у другій половині XX століття. 14 липня 1969 року апарат з екіпажем із шести дослідників на борту занурився у районі Палм-Біч (штат Флорида, США) і, використовуючи виключно енергію течії Гольфстрім, без застосування рушіїв, за місяць пройшов біля півтори тисячі миль усередині течії на глибині 200–400 м. «Бен Франклін» піднявся на поверхню у районі Галіфаксу (Канада).

З використанням жердини та весла рух плота та човна став здійснюватися за рахунок мускульної сили людини. Жердиною відштовхувалися від берега або дна, вона була одним із найдавніших знарядь людини, яке зберіглося до даних часів, її ще використовують на річках та озерах.

Застосовуючи жердини, чим менший кут її нахилу відносно поверхні води, тим більша частина мускульної енергії, що прикладається людиною, використовується для руху. Трансформація жердини у весло відбулась у процесі переправи плота чи човна через глибокі місця, де жердина не досягала дна і первісна людина вимушена була відштовхуватися нею від води, тобто гребти. Унаслідок цього жердина стала перетворюватись на весло, набуваючи необхідної для цього форми – циліндричного стрижня з широкою та плоскою лопаттю.

Спочатку гребці тримали весла в руках, точно так працюють веслами на байдарках, які є прообразом ескімоських каяків або каное, які також пішли від індіанських човнів. Але такий спосіб греблі вимагає значної напруги людських сил і не дозволяє використовувати довгі весла, за допомогою яких можна досягти значно більшого ефекту.

Невдовзі люди почали вкладати весла у вирізи, виконані на борту човна, через деякий час з'явились кочети «уключини», що вставлялись в отвори у бортах, і в яких розміщувались весла.

Сучасні весла спортивних або рятувальних суден незначно відрізняються від прадавніх (рис. 1.6). Існує декілька типів весел і відповідних методів греблі.

Парні держакові весла мають рукоятку, держак для урівноваження зовнішньої частини весла, веретено та лопать. У кожного гребця в кожній руці по веслу, яке опирається на відповідний кочет. Парна гребля держаковими веслами застосовується на спортивних «академічних» човнах та різних допоміжних суднах.

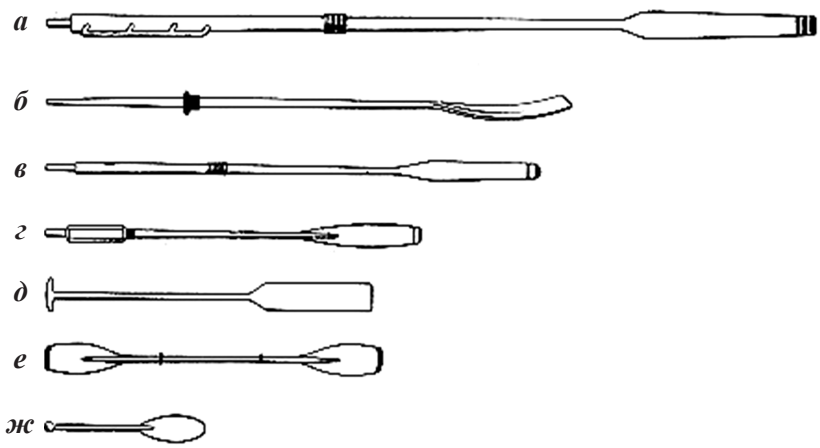


Рис. 1.6. Типи гребних весел:
а – галерне; ***б*** – дволопатеве академічне; ***в*** – розпашне; ***г*** – держакове; ***д*** – річкове; ***е*** – байдарочне; ***ж*** – гребок

Під час греблі на шлюпках військово-морського флоту на кожній банці сидить два гребця і кожен двома руками тримає одне держакове весло. Під час греблі дволопатевими веслами кожен гребець сидить на банці один і тримає двома руками одне весло, яке опирається на кочет. Елементами таких весел є рукоятка, веретено й лопать, держак відсутній, тому що врівноваження відбувається за рахунок довгої внутрішньої частини, вони мають більшу довжину, ніж держакові.

Весла, які гребець тримає у обох руках без опори на кочет, бувають з однією лопаттю – на каное та з двома – на байдарках. Весла з однією лопаттю носять назву «*гребків*».

Байдарочними веслами та гребками гребуть сидячи (чи стоячи на одному коліні) обличчям у бік руху. Усіма іншими веслами гребуть сидячи спиною до напряму руху човна. Виготовлюють весла із цільного шмака деревини – бука, клена, піхти, ясеня, ялини, сосни.

Особливістю галерного весла (рис. 1.6,***а*** та 1.7), довжина якого сягала 15 метрів, є наявність на їх рукояті спеціальних пристроїв для утримання весла кожним із 3–4 гребців, які ним працювали.

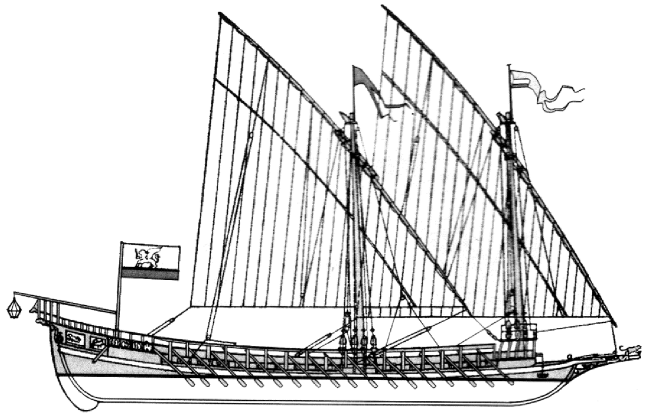


Рис. 1.7. Загальний вигляд галерного судна

Для розміщення на судні більшої кількості гребців їх почали розміщувати не в один, а у два, три і більше рядів. Залежно від кількості таких рядів судна отримували й відповідну назву. Судно з одним рядом гребців називали *уніpема*, з двома – *бірема*, з трьома – *трирема*, з чотирма – *квадрірема*, з п'ятьма – *квінквірема* (тут рема – *весло*). Чим вище розташовувався ряд гребців, тим довшими були весла, якими вони користувались (рис. 1.8).

У подальшій еволюції засобів забезпечення руху плавучих засобів людина інтуїтивно почала застосовувати закони механіки. Так, з'ясувалось, що при розміщенні гребця спиною до напряму руху гребки мають більшу потужність, тому що в роботу включені як ноги, так і корпус, під час греблі із застосуванням кочетів весло працює подібно нерівноплечому важелю другого роду – програш у силі надає виграш у швидкості. На сучасних спортивних гребних «академічних» суднах кочети винесені на кронштейнах далеко за борт, що з одного боку дає можливість зменшити ширину корпуса човна, чим значно знижується його опір воді під час руху, а з другого – надає можливість подовжити довжину весла,

зберігаючи необхідне співвідношення плечей важеля. Завдяки цьому «академічні судна» розвивають значну швидкість.

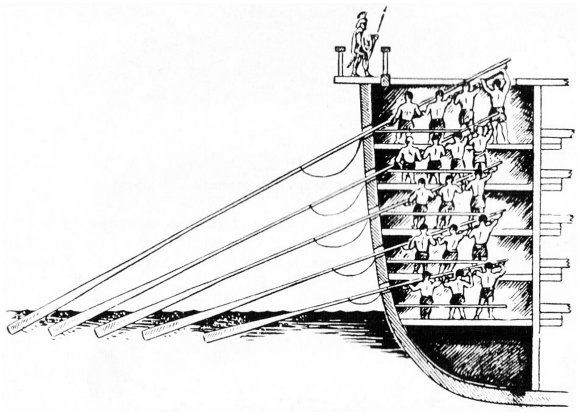


Рис. 1.8. Розташування гребців на квінквіремі

Окремі гребні судна мали значні розміри. Так, єгипетський цар Птоломей побудував для плавання по Нілу судно довжиною 90 м, з 10 рядами гребців, загальна їх чисельність сягала чотирьох тисяч. Вони гребли шістнадцятиметровими веслами. Поряд із цим, на судні розміщувались 2500 воїнів.

Для військових цілей найбільш зручними були триреми (вони ще мали назву – «*трієри*»), створені греками та карфагенянами десь у V столітті до н.е. (рис. 1.9). Окремі трієри були вже оснащені вітрилами, але основним рушієм були весла. Зазвичай екіпаж трієри нараховував 150–170 неозброєних гребців, 18–50 воїнів для абордажного бою та 12–16 матросів для роботи з вітрилами та снастями. Командиром трієри був трієрарх. Окрім нього, функції управління на судні виконував кормчий та підкормчий, а також начальник гребців – гортатор, при якому знаходився музикант, який задавав ритм греблі. Гребці розташовувались у три яруси (рис. 1.10), один над одним. У верхніх рядах розташовувались найбільш досвідчені та дужі гребці – траніти, які гребли найдовшими веслами. Гребці середнього ряду називались «*зігитами*», нижнього – «*таламітами».* Спали гребці на палубі або біля весел.

Одночасно три ряди весел працювали тільки під час безпосередніх бойових дій, при цьому максимальна швидкість досягала 5–8 вузлів. У інших обставинах гребці поділялись на три зміни – вахти. Під час греблі з однією третиною гребців трирема рухалась зі швидкістю 3 вузли.

Вітрила на триремах застосовувались лише при попутному вітрі і не у бойових умовах. Перед початком бойових дій вітрила знімали, усе

зайве звозили на берег для полегшення суден, усі маневри здійснювались виключно за допомогою весел.

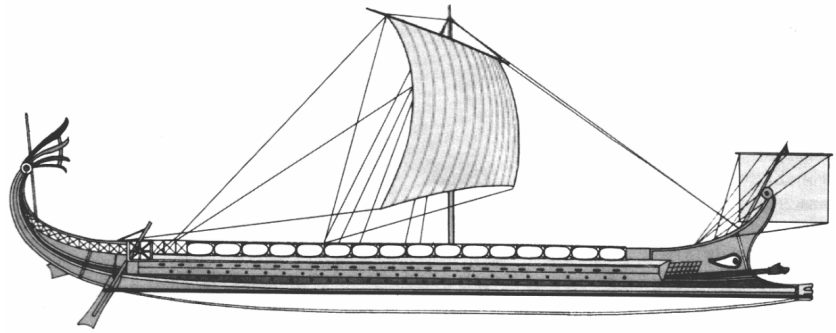


Рис. 1.9. Загальний вигляд трієри

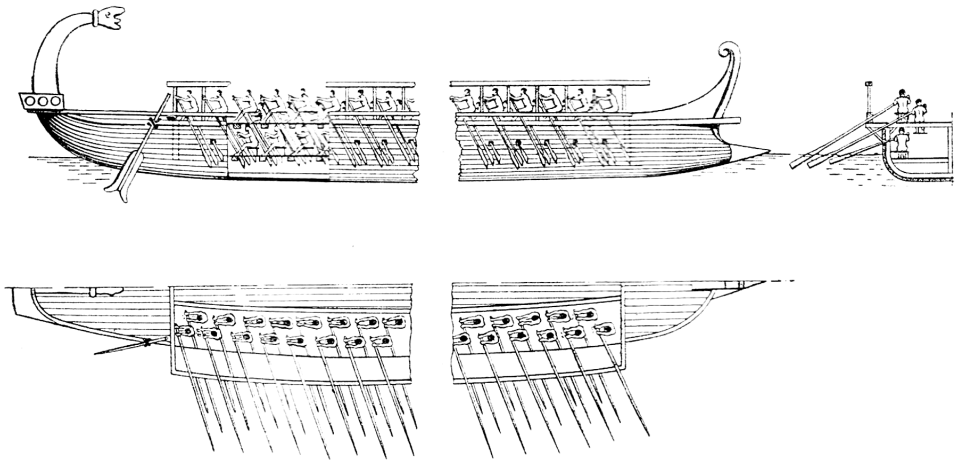


Рис. 1.10. Розміщення гребців на триремі

Цікаво зауважити, що весла намагались застосовувати і на перших підводних човнах. Уперше в 1620 р. голландський механік і фізик Корнелій Ван-Дреббель побудував у Лондоні і провів випробування на Темзі підводного човна, рух якого забезпечували 12 гребців за допомогою весел, що проходили через борта.

Під час руху підводного човна француза Сильона-де-Вальмера з веслами на шарнірах при закиданні наперед лопаті весла складались і не створювали значного опору.

У 1775 році на річці Коннектикут (США) винахідник Давид Бушнель провів випробування свого підводного човна «Turtle» водотоннажністю біля однієї тонни (рис. 1.11). Підводний човен рухався у горизонтальному та вертикальному напрямах, обертаючи вручну відповідний гребний гвинт.

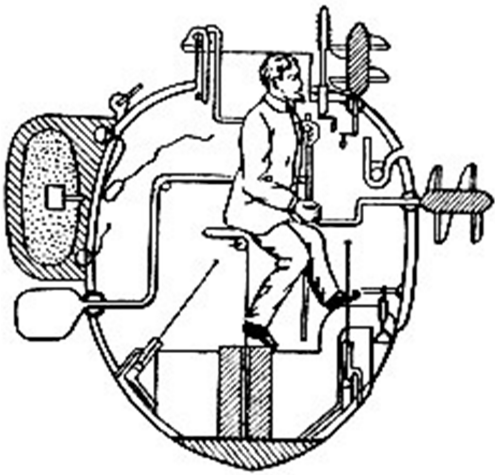


Рис. 1.11. Підводний човен Бушнеля з гвинтом Архімеда

Рух підводного човна водотоннажністю 18,1 т, побудованого у 1834 р. генерал-ад'ютантом Карлом Шильдером забезпечували чотири матроси за допомогою двох пар гребків у вигляді качиних лап (рис. 1.12).

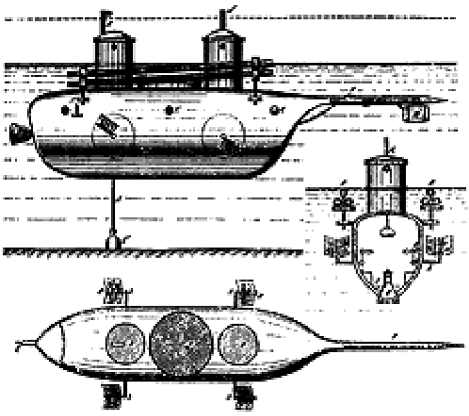


Рис. 1.12. Підводний човен Шильдера

Відомий винахідник Степан Джевецький у 1876 році за власні кошти побудував одномісний підводний човен довжиною 5 м з педальним (типу велосипедного) приводом гребного гвинта. Технічне рішення рушійного механізму вийшло достатньо успішним.

Якщо розглядати історичні перспективи застосування використання для руху суден мускульної сили тварин з використанням гребних коліс, як рушія, то протягом тисячоліть такі нечисленні спроби показали низьку ефективність.

Для розміщення биків та коней і корму для них необхідно було багато місця, швидкість же судна сягала невеликих значень. Це надає нам можливість вважати застосування мускульної сили тварин для руху суден тупиковим шляхом, незважаючи на те, що до появи парової машини у XVIII ст., використання тварин для обертання гребних коліс річкових суден мало достатньо широке розповсюдження.

1.2. Вітрова енергія як засіб здійснення руху суден

1.2.1. Створення та розвиток вітрильних суден

Протягом багатьох століть вітрила застосовувались як допоміжний засіб руху при основному рушієві – веслах. З плином часу, коли мореплавання вийшло за межі прибережного, або каботажного, на морські простори, розміри суден почали збільшуватись і вітрила поступово перетворились із допоміжного на головний рушій судна. Весла на великих важких суднах, особливо під час плавання в умовах океанських хвиль, ставали малоефективними. Проблему, пов'язану з тим, що вітер не завжди буває попутним, тобто не співпадає з напрямом запланованого руху судна, з часом вирішили й навчились користуватися вітрилами при боковому вітрі і навіть засвоїли рух судна зиґзаґами проти вітру.

Першими суднами, на яких вітрило стало основним рушієм, були торгові судна, причому згадки про це датуються III–I ст. до н. е. Це було пов'язане з низькою рентабельністю торгових гребних суден унаслідок того, що гребці для свого розташування на судні потребували багато місця. Також вода та їжа для них займали значні обсяги суднових приміщень. Це різко зменшувало кількість комерційних вантажів, які могло перевезти судно, що, власне, і було його основним призначенням.

До перших чисто вітрильних суден відносяться нефи. За станом на X–II ст. нефи – це великі мореплавні судна з двома щоглами, обладнані прямими та трикутними вітрилами на довгих реях. Передбачалася також установлення і додаткових вітрил. За потребою нефи могли рухатись під веслами. Високі носові й кормові надбудови робили нефи громіздкими, вони не були придатні для океанських переходів.

У XIV ст. в Португалії і Венеції з'явились і поширились по всій Європі такі вітрильні судна, як каракі. Вони несли прямі вітрила на перших двох щоглах і трикутні – на третій. Для маневрів використовувались весла.

У середині XIV століття існувало декілька типів невеликих вітрильних суден: галіони та галіоти. Ці судна походили від галер, у яких розширили корпус і прибрали весла.

Каракі зменшених розмірів носили назву «*каравел*», широко відомих і в наші часи за значний внесок у резонансні географічні відкриття. Це були морські однопалубні трищоглові вітрильні судна водотоннажністю 150–300 т з високими мореплавними якостями і маневреністю, що дозволяло їм здійснювати протяжні океанічні плавання. Найбільше поширення вони отримали у XV ст. Серед найвідоміших каравел «Санта-Марія», «Пінта» і «Нін'я» на яких Христофор Колумб здійснив експедицію з пошуку західного шляху до Індії.

З розвитком мореплавання вітрильний рушій усе більше вдосконалювався. Найбільший прогрес у цьому був досягнутий у XVIII ст. Мистецтво управління вітрилами вийшло на високий рівень: вітрильні судна могли маневрувати у складних умовах.

Особливо високого рівня досконалості конструкцій вітрильних суден у XIX ст. досягли суднобудівники, які створили найбільш досконалі та швидкохідні, на той час, вітрильні судна – кліпери.

Цікава інформація! **Чайні кліпери.**

Наведені далі відомості свідчать про те, як такий звичний для всіх повсякденний продукт – чай, здійснив визначальний вплив на розвиток суднобудування.

У XIX ст. транспортування цінних вантажів до Англії здійснювалась вітрильними суднами. Команди таких суден змагалися у швидкості доставки вантажів. Словосполучення «чайний кліпер» асоціюється зі швидкісним судном. Чому саме чайні кліпери?

У ці часи особливим попитом серед британців користувався чай, який привозили з Китаю до Англії водним шляхом. Властивість чайного листя зволожуватись і поглинати морську сіль та всі запахи трюмів змусила торговців чаєм відмовитись від використання старих кораблів, які витрачали майже рік на один рейс, що негативно впливало на якість продукту. Виходом з такого становища було застосування нових швидкохідних вітрильних суден – кліперів, названих за вантажем – чайними кліперами (рис. 1.13).

Ці судна були композитними, тобто вони мали металевий набір корпусу і дерев'яну обшивку. У підводній частині для запобігання обростанню кліпери обшивались мідними листами.

Щорічний ритуал логістичної кампанії здоставки чаю з Китаю до країн Європи відбувався наступним чином: на початку травня на рейд китайського порту Фуджоу виходили баржі, навантажені врожаєм свіжозібраного чаю. На рейді вже стояли на якорях чайні кліпери, до них швартувались баржі й розпочиналось інтенсивне завантажування. Екіпажі кліперів змагались між собою, адже судно, яке прибуде в Англію першим, отримувало серйозну премію і максимальний фрахт за тонну вантажу.

Перехід судна у 14 000 миль сягав біля 80–90 діб (рекорд – біля 70 діб), швидкість окремих чайних кліперів досягала 20 вузлів. За цей час чай у трюмі дозрівав, набирав аромату і смаку, ставав високоякісним продуктом. Шлях чайних кліперів був неблизький: судно перетинало Індійський океан, огинало Мис Доброї Надії, виходило в Атлантичний океан, і рухаючись у північному напрямі, досягало берегів Англії.

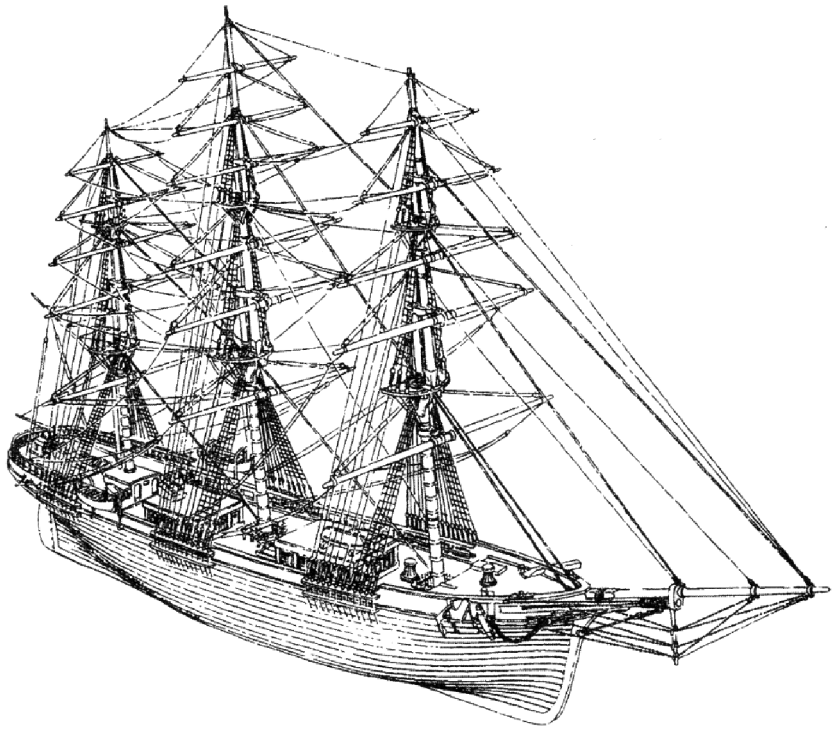


Рис. 1.13. Кліпер «Sobering of the Seas», побудований у 1852 р.

Усесвітню відомість серед таких суден набув трищогловий чайний кліпер «Катті Сарк» водотоннажністю 2100 т, побудований у 1869 р. за проєктом Г. Ліптона у Шотландії на фірмі «Скотт та Ліптон». Довжина судна складала 65 м, ширина – 12 м, висота борту – 6,5 м, висота щогл над палубою – 40 м. Вітрильне озброєння кліпера – типу «корабель»: на всіх щоглах розташовувались прямі вітрила, доповнені косими вітрилами – кліверами та стакселями. Загальна площа вітрил складала 2980 м^2, швидкість судна – до 18 вузлів.

Кліпер «Катті Сарк» перевозив вантажі з 1883 по 1895 рр., зберігся до наших часів, з 1954 р. його розташували на довічній стоянці у Грінвічі (Лондон) і надали статус музею.

Цікаво, що у всі часи існування чайних кліперів їх вважали найкращим типом суден для перевезення таких тендітних музикальних інструментів, як роялі та піаніно, через майже повну відсутність вібрації корпусу, характерної для суден з тепловими двигунами.

На окремих суднах, побудованих на початку XX ст., вітрильне оснащення досягало велетенських розмірів. Побудоване у 1904 році в Германії судно «Прейсен» водотоннажністю 11 500 т несло вітрила загальною площею 5560 м^2 на щоглах висотою 68 м. Воно досягало швидкості ходу 18 вузлів.

Відомі й досить екстравагантні приклади будівництва навіть підводних човнів, оснащених вітрилами. У 1801 р. американський винахідник Роберт Фултон обладнав підводний човен «Наутілус-2» вітрилом для руху у надводному положенні. Швидкість човна сягала 4 вузли, під час занурення підводного човна гребний гвинт обертався вручну.

1.2.2. Основи руху вітрильних суден. Терміни та визначення

Рушійна сила, створювана вітрилом, залежить від швидкості вітру, курсу судна відносно вітру, розмірів, форми і розташування вітрила.

Швидкість і сила вітру визначаються в балах за міжнародною шкалою Бофорта. Нуль балів відповідає штилю або дуже слабкому вітру, швидкість якого не перевищує 1,3 м/с. Такий вітер здійснює тиск на 1 м^2 поверхні, перпендикулярної його напрямку, не вище 20 г. Сила урагану оцінюється у 12 балів, його швидкість сягає 40 м/с, а тиск доходить до 200 кг/м^2. Вітер характеризується напрямом та швидкістю. Напрям визначається тією частиною світу, звідкіля дує вітер.

Положення судна відносно вітру називається *галсом*. Вітер зліва – галс лівий, вітер справа – галс правий. Для визначення курсу судна відносно вітру користуються наступними положеннями: при попутному вітрі, який дує у корму, курс називається *фордевінд*. Коли вітер дує під деяким кутом у корму, то судно рухається курсом *бакштаг*. Курс називається *галфвінд*, або піввітру, коли вітер дує прямо в борт. У разі руху судна під гострим кутом до вітру, який дує в ніс, курс – бейдевінд.

Ні одне вітрильне судно не може рухатись прямо проти вітру. Але залежно від вітрильного оснащення судно може рухатись під більш-менш гострим кутом до вітру.

Рухаючись зигзаґами круто до вітру, вітрильне судно може послідовно переміщуватись у напрямку проти вітру. Такий рух зигзаґами з частою зміною галсів називається *лавіруванням*. Повороти, які здійснює вітрильне судно під час лавірування, рухаючись під невеликим кутом до зустрічного вітру, це – *оверштаг*.

Під час обтікання вітрила потоком повітря на боці, на який дує вітер (навітряний бік), створюється тиск, а на підвітряному – розрідження. Аеродинамічна сила, утворена на вітрилі за рахунок різниці тисків складається із підйомної сили, спрямованої перпендикулярно потоку, та сили опору, спрямованої проти потоку. Аеродинамічна сила вітрила розкладається на два напрями: уздовж руху судна – сила тяги, яка рухає судно, та поперек руху – сила дрейфу, яка зносить судно з курсу.

Центром вітрильності є точка, у якій прикладена рівнодіюча всіх аеродинамічних сил на вітрилі.

Якщо вітрил декілька, то загальна їх рівнодіюча буде знаходитись у загальному центрі вітрильності. Для того, щоб судно краще «слухалось» штурвалу та трималось на курсі, загальний центр вітрильності повинен понижуватись та зміщуватись наперед по мірі убирання верхніх вітрил. Для цього щогли встановлюють з нахилом у корму під кутом 2–6°.

Окрім ходу фордевінд – прямо по вітру, на всіх інших курсах вітрильне судно рухається з деяким креном і дрейфом, що характерно тільки для вітрильного рушія. Для зниження дрейфу вітрильного судна його корпусу надають форму, що створює підвищений опір боковому руху. До речі, так у яхт з'явився масивний кіль.

Причиною виникнення крену, а він у вітрильних суден може досягати 50º, є наступне: сила дрейфу прикладена у загальному центрі вітрильності судна високо над водою, а сила бокового опору судна прикладена у підводній частині корпусу, у так званому центрі бокового опору. Ці дві сили врівноважують одна одну, але вони прикладені на різних рівнях, між ними є відстань, або плече, і тому виникає момент, який намагається накренити судно. Зі свого боку при крені судна на підводній частині корпуса, що накренився, виникає гідростатична сила, яка у парі з вагою судна утворює відновлювальний момент, що намагається утримати судно від крену. Під впливом моменту, що викликає крен та моменту, що його врівноважує, судно рухається з креном у підвітряний бік. Таким чином, під дією вітру вітрильне судно рухається вперед, дрейфує, розвертається та кренiться.

1.2.3. Вітрила та вітрильне оснащення суден

Визначальну роль у якості руху вітрильного судна відіграє форма та будова вітрила. Під час пошивки вітрила намагаються витримати його форму таким чином, щоб вона була опуклою, коли вітрило надувається вітром.

Кромки вітрила обшиваються ліктросом для збільшення міцності та довговічності. Обшита кромка вітрила називається *шкаториною.* Для кріплення вітрила в ньому виконуються окантовані металом отвори – люверси, у кутах вітрила вшиваються скоби (рис. 1.14).

Усі конструктивні елементи судна, за допомогою яких установлюють вітрила, називають *рангоутом*. Рангоут разом з вітрилами складає вітрильне оснащення судна, причому тип оснащення визначається типом вітрила. Рангоут може бути металевим або дерев'яним, нерухомим та рухомим. До нерухомого рангоуту відносяться щогли, стеньги, бушприт. До рухомого – реї, гафелі, гіки (рис. 1.15).

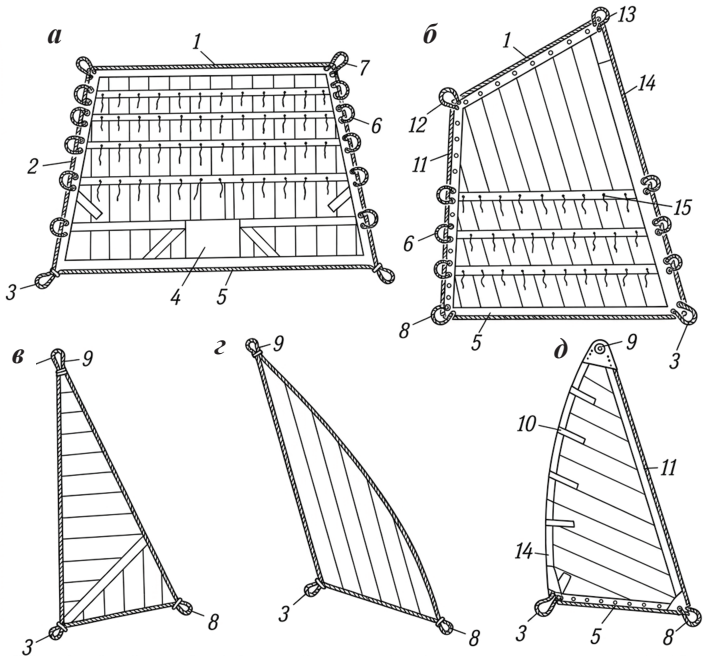


Рис. 1.14. Конструкція вітрил:
а – прямий марсель; ***б*** – гафельний; ***в*** – стаксель; ***г*** – клівер; ***д*** – бермудський; *1* – верхня шкаторина; *2* – бокова шкаторина; *3* – шкотовий кут; *4* – стоплат; *5* – нижня шкаторина; *6* – кренгельс; *7* – бензельний кут; *8* – галсовий кут; *9* – фаловий кут; *10* – лат-кармани; *11* – передня шкаторина; 12 – передній нок-бензельний кут; *13* – задній нок-бензельний кут; *14* – задня шкаторина; *15* – риф-банти з риф-штертами

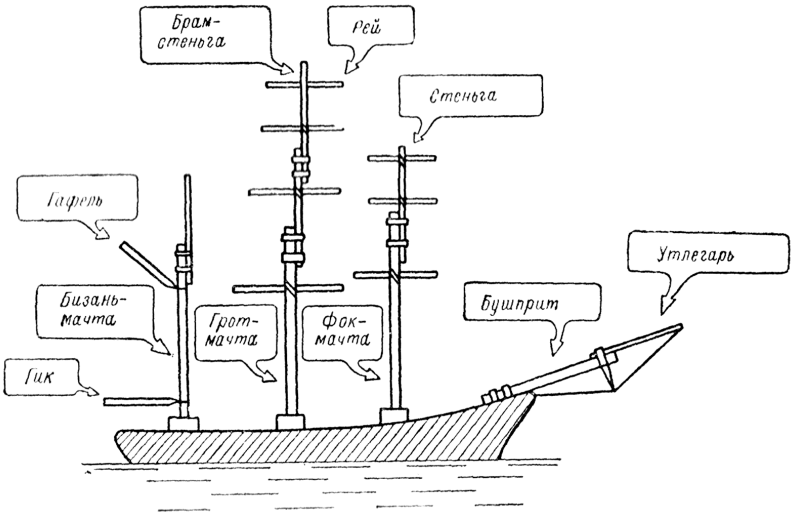


Рис. 1.15. Основні елементи рангоуту вітрильного судна

Рухомий рангоут призначений безпосередньо для кріплення вітрил, він може повертатись з вітрилом навколо щогл та стеньг або підніматися по ним. Для прямих вітрил рухомий рангоут кріпиться до щогли або стеньги за середину своєї довжини, він носить назву «*рея*». Для косих вітрил рухомий такелаж кріпиться одним кінцем до щогли і носить назву «*гафеля*» або «*гіка*», залежно від його розташування: зверху або знизу.

Щогли вітрильного судна мають наступні назви: передня – «*фок-щогла*», середня – «*грот-щогла*», задня – «*бізань*». Зазвичай грот-щогла є найбільшою, бізань – найменшою на даному судні. На носу судна розташовується щогла, нахилена над водою – бушприт. Довжина грот-щогли великого вітрильного судна досягає 50–60 м. Такі щогли робили складеними з декількох колін, які називаються *стеньгами*.

Друге знизу коліно носить назву «*стеньга*», третє – «*брам-стеньга*», четверте – «*бом-брам-стеньга*». На окремих кораблях були ще п'яті і, навіть, шості коліна щогл.

Відповідно до виду вітрил вітрильне оснащення носить назву *прямого*, *косого* або *змішаного*. Прямі вітрила мають форму прямокутників або правильних трапецій, вони кріпляться до рей (рис. 1.16).

Застосовуються на великих та середніх суднах. Назву прямим вітрилам надають реї. До нижнього коліна щогл підвішені вітрила фок та грот. Вітрила марселі кріпляться на стеньгах. Фок, грот і марселі – це основні й найбільші вітрила на судні. На брам-стеньгах піднімаються на брам-реях брамселі, бом-брам стеньги несуть на бом-брам реях бом-брамселі. На п'ятих колінах щогл розташовуються трюмсель-реї з вітрилами трюмселями. Вітрила на шостих колінах називаються *бом-трюмселями*.

При зміні курсу прямі вітрила розвертають у горизонтальному напрямі на невеликий кут відносно вітру разом з реями навкруги вертикальної осі, що проходить посередині вітрила. Цей поворот виконується за допомогою спеціального такелажу – брасів, у зв'язку із чим цей маневр отримав назву «*обрасопити реї*».

Площу вітрил при попутному вітрі збільшують за рахунок збільшення їх ширини шляхом розміщення на реях додаткових вітрил – ліселів, які піднімаються на спеціальних висувних брусках – лісель-спиртах.

За потреби скорочення площі вітрил, насамперед прибирають верхні вітрила та ліселі. Площу інших вітрил зменшують, прив'язуючи до реїв частини вітрила за допомогою пришитих до нього паралельних рядів мотузок-рифів. Ця операція носить назву «*брати рифи*». Великі вітрила можуть мати до п'ятьох рядів рифів.

При повному прибиранні вітрила його підтягують до реї спеціальними снастями й закріплюють, для чого матроси розходяться вздовж рея

по протягнутому під ним канату – перту та, лежачи груддю на реї, викочують вітрила на рей та прив'язують мотузками-шлейками.

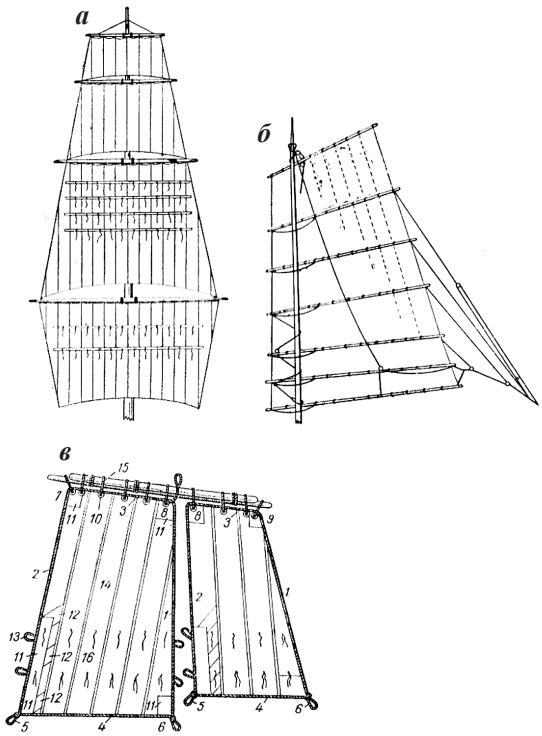


Рис. 1.16. Прямі вітрила:
а – суднові; ***б*** – китайське вітрило; ***в*** – рейкове розрізне вітрило шлюпки;
1 – передня шкаторина; *2* – задня шкаторина; *3* – верхня шкаторина;
4 – нижня шкаторина; *5* – шкотовий кут; стоплат; *6* – галсовий кут; *7* – задній нок-бензельний кут; *8* – бензельний кут; *9* – передній нок-бензельний кут;
10 – люверси; *11* – банти; *12* – баути; *13* – кренгельси; *14* – полотнище;
15 – слаблинь; *16* – риф-штерти

Широкого розповсюдження на вітрильних суднах середніх та малих розмірів набули косі вітрила (рис. 1.17).

Найдавнішим з вітрильного оснащення є латинське оснащення – трикутні вітрила, прикріплені верхньою шкатериною до довгої рейки. Задній нок (кінець рейки) високо задраний, а передній опущений майже до палуби. На сьогодні таке оснащення зустрічається на шлюпках.

Шпринтове оснащення також відноситься до стародавніх. У нього косе чотирикутне вітрило пришнуроване передньою шкатериною до щогли і розтягнуте тонким шестом. Раніше таке оснащення застосовувалось на однощоглових палубних суднах, які возили вантажі по Дніпру.

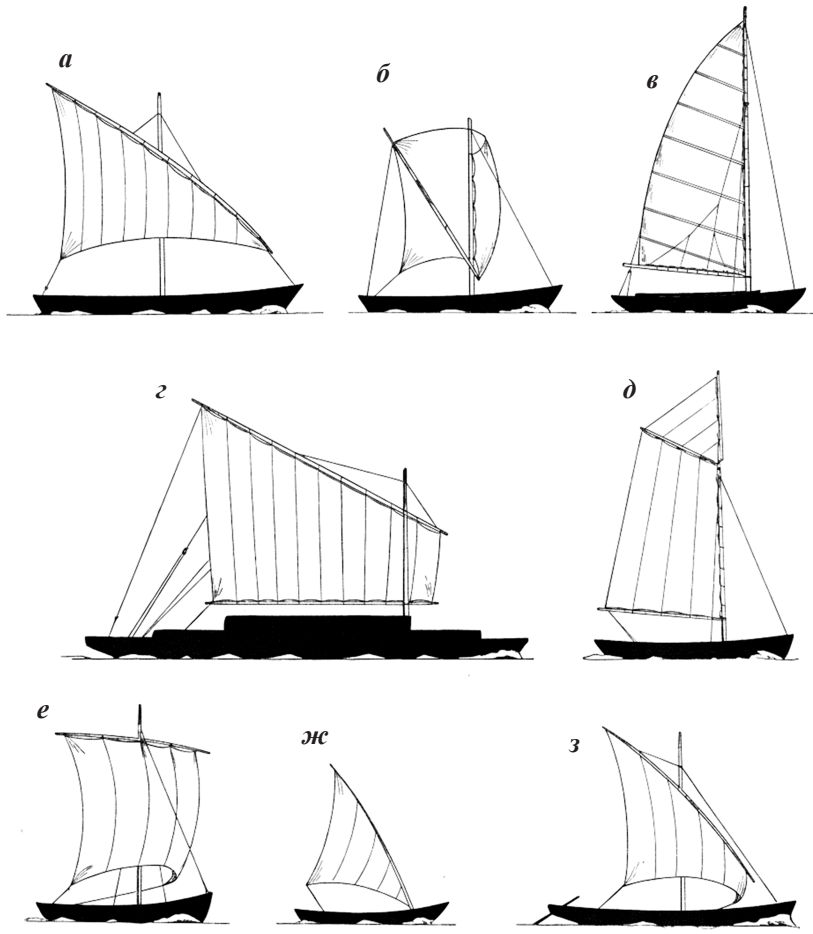


Рис. 1.17. Косе вітрильне оснащення:
а – латинське; ***б*** – шпринтове; ***в*** – бермудське; ***г*** – малайське; ***д*** – гафельне; ***е*** – люгерне; ***ж*** – португальське; ***з*** – арабське

Бермудське оснащення складається з косих вітрил – триселів, які мають вигляд витягнутих прямокутних трикутників. Нижня шкаторина кріпиться до горизонтального рея-гіка, розташованого знизу позаду щогли, передня шкаторина кріпиться до щогли. Таке оснащення знайшло широке застосування на невеликих вітрильних суднах і яхтах всіх класів.

Гафельне оснащення передбачає прикріплення косих чотирикутних вітрил – триселів до гафелів – нахилених реїв, розташованих позаду щогли у верхній її частини.

У люгерному вітрильному оснащенні косі вітрила пришнуровуються до рейок. Вітрило на косо поставленій щоглі носить назву «*португальського*».

У разі слабкого вітру наверху між щоглами піднімаються додаткові легкі вітрила, які не є частиною вітрильного оснащення. Косі додаткові вітрила піднімаються по штагам, які розкріплюють щогли, та леєрам – спеціальним снастям, натягнутим між щоглами. Трикутне вітрило, що піднімається по штагу – це *стаксель*, по леєрам піднімаються такі ж трикутні вітрила – *клівери*. Ці вітрила поліпшують маневреність судна та підвищують силу тяги основних вітрил.

На спортивних яхтах, як додатковий, застосовується спінакер – великий трикутний череватий парус, який установлюється поперед основного вітрила.

Загальний вигляд основних типів вітрильного оснащення поданий на рис. 1.18–1.23.

Корабель являє собою судно з прямим вітрильним оснащенням на всіх 3–5 щоглах – повне корабельне оснащення (рис. 1.18). Сумарна площа вітрил найбільша серед усіх інших типів вітрильних суден. До класу кораблів відносять і знамениті чайні кліпери.

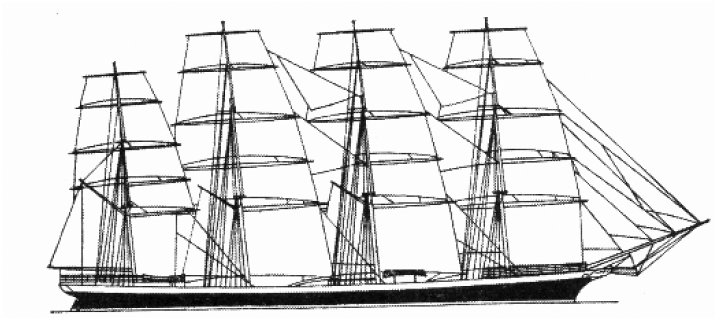


Рис. 1.18. Корабель з повним вітрильним оснащенням

Барк – морське вітрильне транспортне судно з 3–5 щоглами, з прямими вітрилами на всіх щоглах, окрім бізань-щогли, оснащеної косим вітрилом (рис. 1.19).

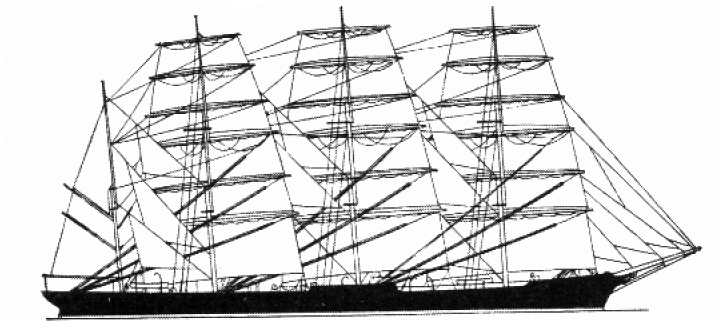


Рис. 1.19. Барк

Шхуна – вітрильне судно зазвичай з косими вітрилами. Уперше з'явилось у Північній Америці в XVII столітті. Число щогл може бути різним. У 1902 році була побудована єдина у світі семищоглова шхуна «Томас Лоусон». Цікаво, що моряки на цьому судні іменували щогли за днями тижня: понеділок, вівторок тощо.

Цікава інформація! 11 липня 1902 року гігантська сталева шхуна із сімома щоглами була спущена на воду. Довжина корабля перевищувала 120 м, ширина 15 м, осадка 9 м. Шхуна призначалась для перевезеня вугілля між портами східного узбережжя Північної Америки, надалі її переобладнали під танкер. Назвали її ім'ям американського письменника Томаса Лоусона.

Сім велетенських 35-метрових щогл нагадували заводські труби, зверху їх подовженням були сімнадцятиметрові соснові стеньги. Бушприт був винесений на 21 м уперед форштевня, він ніс п'ять косих вітрил. Коли виникло питання стосовно того, як назвати щогли (якщо притримуватись існуючим правилам, то щогли з другої по шосту повинні називатись гротами), капітан «Лоуренса» запропонував свій підхід: перша щогла – фок, друга – грот, третя – бізань, четверта – хлопун, п'ята – вертун, шоста – ведун, сьома – штовхач.

Це нововведення не прижились на судні і матроси знайшли оригінальний вихід – щогли отримали назву за днями тижня від понеділка до неділі [25].

Розрізняють шхуну-барк та гафель-шхуну. *Гафель-шхуна* на всіх щоглах несе косі вітрила (рис. 1.20).

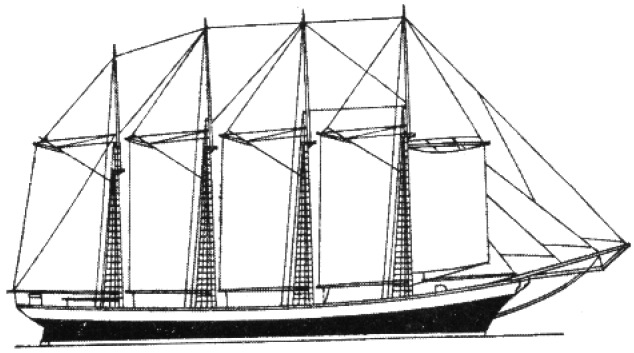


Рис. 1.20. Гафель-шхуна

Шхуна-барк або *баркентина* – морське вітрильне судно з 3–5 щоглами з прямим вітрилом на фок-щоглі і косим – грот-щоглі (рис. 1.21). Цей тип судна часто використовували середземноморські пірати. Бригантини, які мали тільки дві щогли, використовувались як військові, так і як торговельні судна (рис. 1.22).

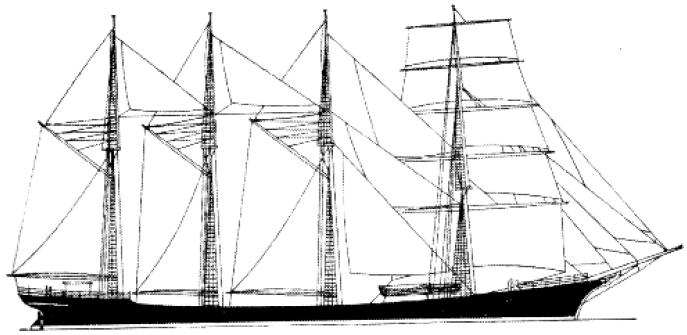


Рис. 1.21. Шхуна-барк або баркентина

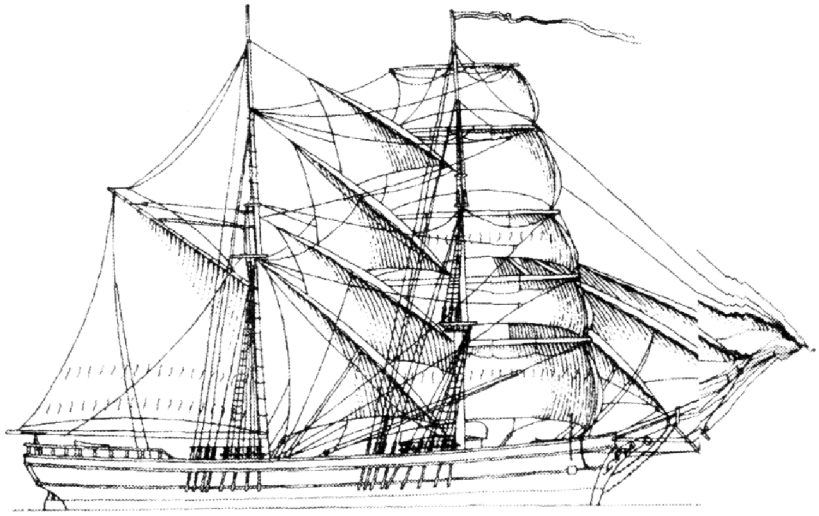


Рис. 1.22. Бригантина

Бриг – вітрильне двощоглове судно з прямим вітрильним оснащенням на фок- і грот-щоглах та косим вітрилом на грот-щоглі. З таким вітрильним оснащенням будувались здебільшого торговельні судна, але зустрічались і суто військові (рис. 1.23).

Вітрильні судна достатньо довго не здавали своїх позицій. Уже за наявності пароплавів ера вітрильників продовжувалась унаслідок їх більшої економічності. Перший найбільш відчутний удар по вітрильному судноплавству здійснило відкриття Суецького каналу, а введення в дію Панамського каналу став остаточним кроком до занепаду вітрильного судноплавства. Будівництво вітрильних суден існувало, але перспективи їх використання як транспортних засобів ставали все більш примарними.

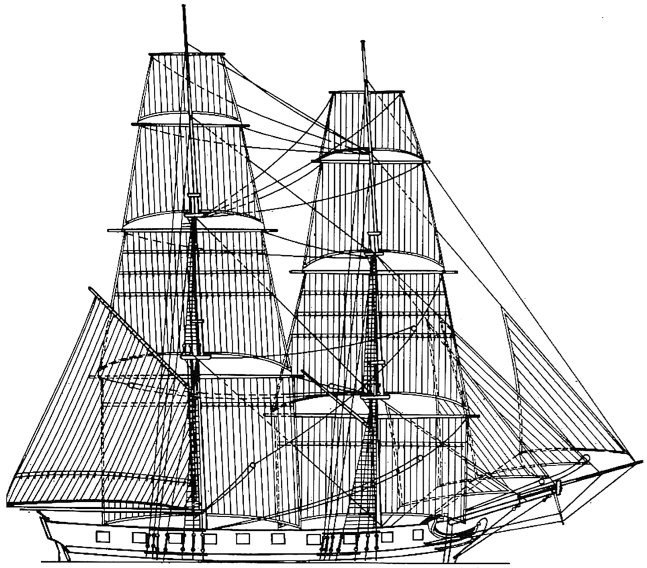


Рис. 1.23. Бриг

Але ж, незважаючи ні на що, вітрила на морях і океанах не зникли остаточно. У XXI столітті існують і продовжують удосконалюватись мореплавні яхти, шхуни, барки. Поряд із цим з'являються нетрадиційні технології застосування окремих типів вітрил навіть на вантажних суднах.

1.3. Сучасні судна-вітроходи

1.3.1. Судна з традиційними та жорсткими вітрилами

У 1980 році фінська фірма «Wartsila» спроєктувала сучасне вітрильно-моторне судно «Winderuzer». Це була чотирищоглова шхуна з оригінальним яхтовим оснащенням. Усі роботи з вітрилами механізовані й виконуються з ходового містка. Шхуна – комфортабельне пасажирське судно, у якому все передбачено для туристів: салони, бари, ресторани, басейн, прогулянкова палуба. За цим проєктом у листопаді 1985 року зі стапеля французької фірми у Гаврі було спущено на воду перший із побудованих за цим проєктом лайнерів – «Wind Star» (рис. 1.24). Судно було розраховано на 150 пасажирів, воно мало довжину 134,2 м, ширину 15,5 м, осадку 4,1. Висота алюмінієвих щогл – 57,3 м над ватерлінією. Загальна площа вітрил складала 1858 м^2, швидкість ходу при свіжому вітрі 15 вузлів. За головним вітрильником були побудовані однотипні «Wind Sond» та «Wind Spirit». Ця трійка потрапила до Книги рекордів Гіннеса як найдовші вітрильні судна у світі, але рекорд протримався недовго.

Уже у 1990 році у Гаврі був побудований новий вінджаммер[4] – п'ятищогловий лайнер «Club Med 1» довжиною 187 м із загальною площею вітрил – 2500 м^3.

У згаданих і їм подібних «неовінджаммерів» є один недолік: їх зовнішній вигляд мало нагадує звичні вітрильники, скоріше це звичайні лайнери, доповнені великими «яхтовими» щоглами й такими ж вітрилами.



Рис. 1.24. Круїзне судно «Wind Star»

Далеко не всі замовники таких суден були цим задоволені і тоді виникла ідея стилізувати пасажирський лайнер під класичний вінджаммер початку XX ст., суттєво скоротивши висоти надбудов і надавши вітрильному оснащенню більш традиційний вигляд. Для цього була розроблена конструкція полого рея, усередину якого прибирався прямий парус. Усі операції з вітрилами виконувались за допомогою електроприводів, уже не потрібно було об'являти вітрильні аврали для всієї команди.

Перші два лайнери нового покоління «Star Flyer» та «Star Clipper» будувались у Бельгії на замовлення французької компанії «Star Clippers». За зовнішнім виглядом вони повністю нагадували чотирищоглові баркетини, які будувались 100 років тому (рис. 1.25). Довжина корпусу кожного судна становила 96,1 м, ширина – 15 м, валова місткість – 2298 т, площа всіх вітрил – 3350 м^2. Судно могло взяти на борт 170 пасажирів, екіпаж його складав 72 особи.

[4] «Вінджаммер» – у перекладі з англійської означає «наповнений повітрям» або «накачаний повітрям», найчастіше їх називали «вижимачами повітря». Дійсно, вони ставали на шляху повітря суцільною стіною вітрил і, образно кажучи, були наповнені, накачані повітрям, вижимали із нього всю міць та силу [25].

Улітку 2000 року було прийнято до експлуатації п'ятищогловий «Royal Clipper», який, за відгуками фахівців, безумовно став останнім шедевром XX ст. (рис. 1.26). За прототип цього судна було взято унікальний віджаммер «Preussen», єдине в історії п'ятищоглове судно з повним корабельним оснащенням, з прямими вітрилами на всіх щоглах. Побудоване судно на Гданській верфі у Польщі. Довжина «Royal Clipper» – 134 м, ширина – 16 м, осадка – 5,6 м, висота – 54 м. Пасажиромісткість – 228 осіб, чисельність екіпажу – 106. Загальна площа 42 парусів – 5050 м^2, швидкість – 17 вузлів. При безвітряній погоді та під час маневрування рух судна зі швидкістю 13,5 вузлів забезпечують два дизельних двигуна «3516-B-SCAC» фірми «Caterpillar» потужністю по 1865 кВт. Судно оснащено носовим підрулюючим пристроєм потужністю 370 кВт. До послуг пасажирів – три басейни на верхній палубі, ресторани, бари, тренажерні зали, опускний майданчик – лоток для купання під час стоянки або дрейфу, екзотичний клуб «Капітан Немо» зі скляним днищем для спостереження за світом тропічних морів. Маршрути круїзів усіх згаданих вище суден – Карибське море та узбережжя Таїланду, Середземне море.



Рис. 1.25. Круїзний вітрильник «Старфлайер»
під час проходу Панамським каналом

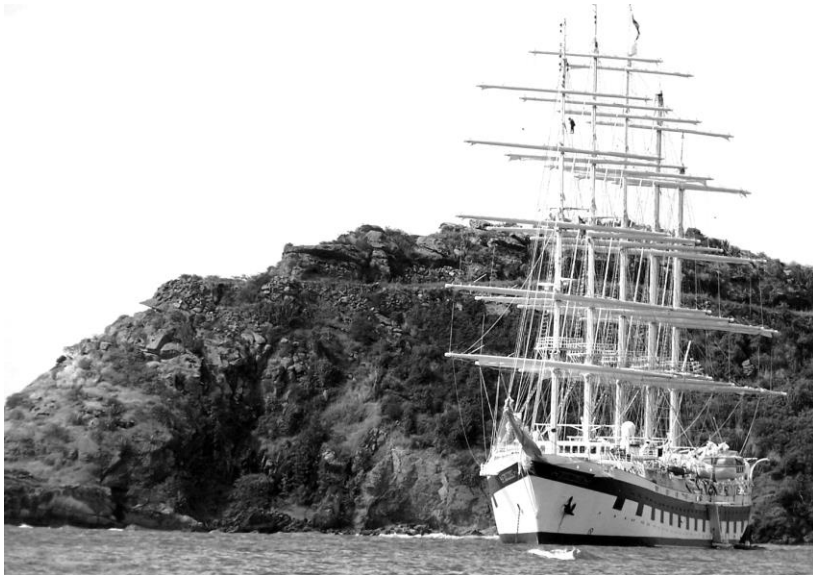


Рис. 1.26. Круїзний вітрильник «Ройял Кліппер»

У наші часи у світі знаходяться в експлуатації біля п'ятдесяти круїзних вітрильних суден.

Адміралу С. О. Макарову належить крилатий вислів: «Хто не плавав під вітрилами, той не моряк». І в наші часи багато мореплавних навчальних закладів мають у своєму складі навчальні вітрильні судна. Під час плавання на цих суднах курсанти вчаться працювати у складі команди, виконувати накази, оцінювати обстановку, приймати рішення.

Проєктне зображення нового вітрильного навчального судна-баркентини «Dewaruci» для ВМС Індонезії наведено на рис. 1.27. Судно має довжину 110 м, ширину – 12,6 м і осадку – 5,5 м. Трищоглове судно має оснащення барка загальною площею 3351 м, на ньому розміщується 200 осіб, включно 120 курсантів.

Патрульні судна використовуються морськими державами для охорони своїх берегів від контрабанди, для охорони риболовних угідь, устричних балок тощо.

Патрульні вітрильні судна входять до складу берегової охорони низки країн, так у США використовується для цих цілей трищогловий барк «Орел» (рис. 1.28).

У 70-х роках XX ст. була запропонована нова концепція прямого вітрильного оснащення «Dyna Rig» («Діна ріг») повністю виключила щілини між вітрилами, що утворювало суцільну вітрильну капель на всю висоту щогли. Спеціальні реї, вигнуті у один бік, додатково створювали профіль

вітрила. Вітрила прибирались не до рей, як звичайно, а втягувались у щоглу шляхом накручування на внутрішні барабани. Це виключало використання бігучого такелажу і дозволяло повністю автоматизувати всі роботи з вітрилами.



Рис. 1.27. Навчальна баркентина індонезійських ВМС «Деваруці»



Рис. 1.28. Патрульне судно берегової охорони США

На жаль, вітрила типу «Dyna Rig» не отримали достатньо широкого розповсюдження на транспортних та круїзних суднах. Найбільшим судном, на якому було реалізована така вітрильна концепція, стала одна з найбільших вітрильних яхт у світі «Мальтійський сокіл» («Maltese Falcon») (рис. 1.29).

Довжина «Мальтійського сокола» – 88 м, ширина – 12,6 м, осадка – 6 м, водотоннажність – 1240 т, висота щогли – 58,2 м, площа вітрил складає 2400 м^2. Ця яхта не може бути повністю віднесена до вітрильних суден, тому що для керування вітрилами необхідно включати дизельний двигун.

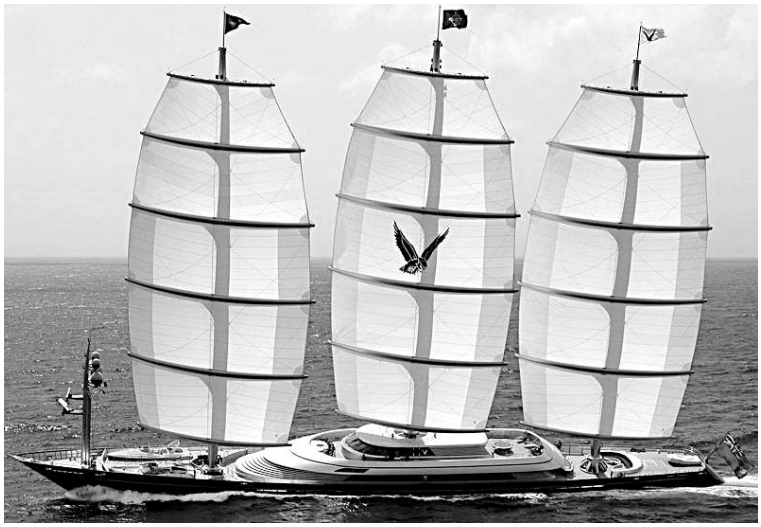


Рис. 1.29. Яхта «Мальтійський сокіл» з вітрилами «Dyna Rig»

На трьох карбонових щоглах «Мальтійського сокола» розташовані вітрила, керування якими повністю автоматизовано, і які розкриваються за допомогою гідравлічної системи менше, ніж за 10 хвилин. Застосування системи «Dyna Rig» з реями жорстко закріпленими до щогли, дозволяє керувати всіма вітрилами кожної щогли як одним цілим – суцільним крилом. Уся системи з п'ятнадцяти вітрил керується однією людиною з ходового містка. Судно оснащено двома дизельними двигунами по 1300 кВт кожний, яхта розвиває швидкість 20 вузлів, під вітрами – середня швидкість – 18 вузлів, максимальна досягнута – 24,8 вузлів.

На відміну від «Мальтійського сокола», круїзний лайнер «Hamburg» з вітрилами «Dyna Rig», проєкт якого розроблений іспанським конструкторським бюро «Oliver Design» обладнаний, ще і звичайними косими вітрилами (рис. 1.30).



Рис. 1.30. Проєкт круїзного лайнера з вітрилами «Dyna Rig»

Останнім часом інтерес до вітрильного оснащення підвищується, розроблено низку проєктів каботажних суден і є серйозні підстави очікувати їх практичної реалізації.

Серйозна увага застосуванню вітрил на транспортних суднах приділялась в Японії, державі, у якій повністю відсутні запаси нафти. У зв'язку із цим, японськими суднобудівниками проводились ґрунтовні дослідження стосовно використання вітрил з метою економії палива на судні.

На відміну від багатьох «романтичних» підходів до ідеї відродження вітрильних суден з повним оснащенням, японські вчені запропонували іншу концепцію: вітрила повинні бути не головним рушієм судна, а лише допоміжним, який дозволяє підтримувати постійну рейсову швидкість і при цьому економити дизельне паливо.

У 1980 році в Японії розпочато експлуатацію каботажного танкера «Шин Айтоку Мару» («Shin Aitoku Maru») дедвейтом 1600 т, довжиною 73 м, першого у світі транспортного судна з жорсткими вітрилами (рис. 1.31).

Кожна з двох вітроенергетичних установок танкера складається з консольної поворотної щогли і трисекційного вітрила. До складу вітрила входить нейтральна вертикальна панель, нерухомо з'єднана з поворотною частиною щогли та дві бокові панелі, шарнірно з'єднані з центральною частиною.

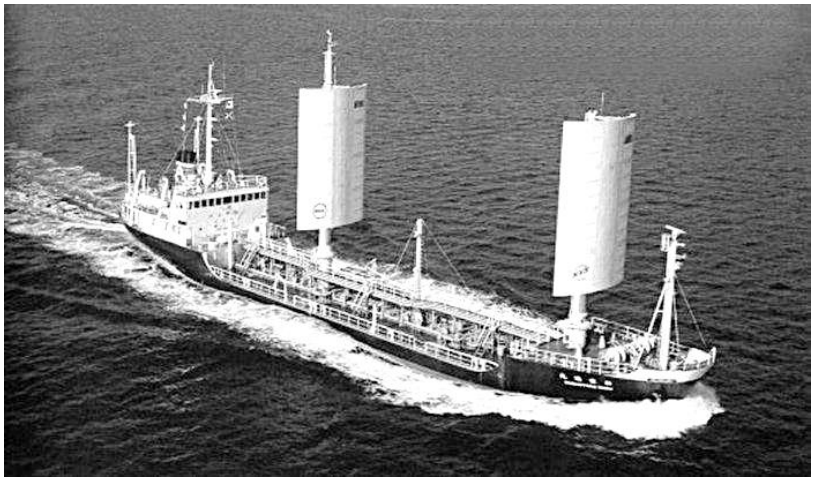


Рис. 1.31. Танкер «Шин Айтоку Мару»

У робочому положенні вітрило має у плані серповидний профіль зі закругленими вхідною та вихідною кромками, у неробочому стані вітрило являє собою тригранну призму, утворену поворотом бокових панелей та змиканням їх навкруги щогли до торкання вхідних та вихідних кромок. Габарити вітрила: висота – 12,5 м, ширина – 8 м, площа вітрильності – 100 м^2.

За швидкості вітру 16,7 м/с танкер розвиває швидкість ходу до 15 вузлів. Керування ВЕУ відбувається у двох режимах: автоматичному (основному) або дистанційно судноводієм (резервному режим). Щогла й центральна панель виконані із нержавіючої сталі, панелі мають каркасну конструкцію, обтягнуту міцною синтетичною плівкою. За рейс такі два допоміжні вітрила економили до 10 % палива.

Після «Шин Айтоку Мару» в Японії були побудовані танкер-хімовоз «Усуку Піонер» (рис. 1.32), пасажирський лайнер «Яшиго Мару» та інші, які забезпечували економію палива до 20 % за рейс, під час руху під вітрилами до 15 днів поспіль.

У подальшому японські суднобудівники побудували 30 подібних суден різної водотоннажності з одним або двома вітрилами, установленими у носовій частині. Утім, глобального поширення ідея використання допоміжних вітрил на транспортних суднах не отримала.



Рис. 1.32. Танкер-хімовоз «Усуку Піонер»

1.3.2. Судна з роторними вітрилами

Незвичайний, на перший погляд, спосіб використання енергії вітру для руху судна запропонував німецький інженер Антон Флеттнер. Він використав відомий ефект, відкритий у 1853 році фізиком Генріхом Магнусом, який полягає в тому, що під час обтікання потоком рідини або газу тіла, утворюється сила, яка впливає на тіло, спрямована перпендикулярно напрямку потоку. На честь першовідкривача це явище отримало у фізиці назву «Ефект Магнуса».

А. Флеттнер провів декілька експериментів на човні з крилом, але перевагу надав обертовим циліндрам – роторам. На підставі отриманих результатів, був розроблений проєкт модернізації трищоглової шхуни, яка змінивши 833 м^2 вітрил на два ротора перетворилась на роторно-вітрильне судно «Bukau» («Букау») (рис. 1.33.).

Судно мало наступні характеристики: довжину – 45 м, ширину – 9 м, осадку – 3,6 м, водотоннажність – 90 т. Ротори діаметром 2,8 м і висотою 15,6 м були виконані з 1,5 мм сталевого листа і встановлені на опори, вони обертались з частотою 144 хв$^{-1}$. Для руху судна зі швидкістю 7,5 вузлів призначався дизель потужністю 88 кВт, для приводу роторів передбачена допоміжна енергетична установка, яка складалась з двох дизельних двигунів потужністю 17 кВт кожний, двох електрогенераторів та електродвигунів, розміщених усередині роторів.

Ротори «Букау» обертались від електродвигунів. Власне, ніякої відмінності від класичних дослідів Магнуса в конструкції не було. З того боку, де ротор обертався назустріч вітру, створювалась зона підвищеного тиску, з протилежного – пониженою. Результуюча сила й рухала судно.

Більш того, ця сила набагато перевищувала силу тиску вітру на нерухомий об'єкт приблизно в 50 разів. Зверху ротори були накриті плоскими шайбами. Це збільшувало рушійну силу приблизно у два рази за рахунок додаткової орієнтації потоків повітря відносно ротора.

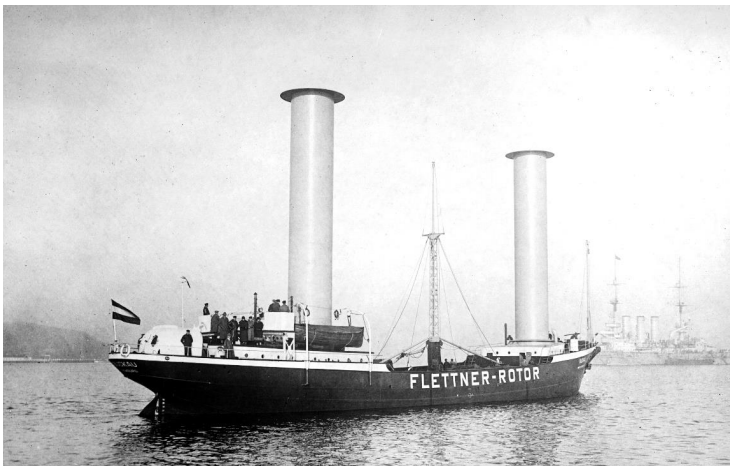


Рис. 1.33. Роторно-вітрильне судно «Букау»

У процесі експлуатації судна «Букау» проявились переваги роторного судна перед чисто вітрильним: менша площа роторів відносно площі щогли та такелажу; можливість використовувати потужні вітри; регулювання швидкості шляхом керування швидкістю обертання роторів. До недоліків відносяться складнощі руху при напрямку вітру з передніх кутів. Судно «Букау» експлуатувалося на Балтиці (рис. 1.34). У 1926 р. воно здійснило трансатлантичний рейс до Нью-Йорку, у цьому ж році судно перейменували на «Баден-Баден» («Baden-Baden»), 1931 р. воно загинуло під час урагану у Карибському морі.

За результатами експлуатації «Букау» германські ВМС надали замовлення суднобудівникам Німеччини на ще одне повноцінне транспортне судно з роторними вітрилами системи А. Флеттнера. У 1926 р. судно «Барбара» («Barbara») було спущено на воду (рис. 1.35). Довжина судна становила 89,5 м, ширина – 13,2 м, висота борту – 5,8 м, дедвейт – 2830 т при осадці 5,4 м. Два дизельних двигуна загальною потужністю 780 кВт забезпечували швидкість руху 10 вузлів. Три ротори діаметром 4 м, висотою 17 м, масою 4 т, площею проєкції кожного біля 70 м^2 були розміщені на носовій та середній рубках на переборці між трюмами № 3 та № 4. Ротори виготовлялись із дюралюмінію, кожен із них для зменшення індуктивних втрат був оснащений кінцевою шайбою.

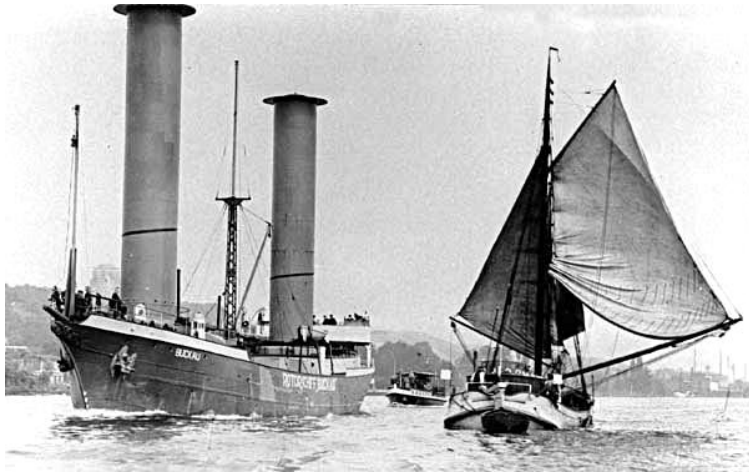


Рис. 1.34. Роторно-вітрильне судно «Букау» під час комерційного рейсу

Кожен ротор розкручувався електричним двигуном постійного струму потужністю 33 кВт до 160 хв$^{-1}$, але робоча частота обертання становила 140 хв$^{-1.}$



Рис. 1.35. Роторно-вітрильне транспортне судно «Барбара»

Під час роботи обох двигунів швидкість без роторів складала 9 вузлів, під час роботи обох двигунів і частоті обертання роторів 130 хв$^{-1}$ при вітрі 7 балів швидкість була 10,5 вузлів, під час роботи одного дизеля і частоті обертання роторів 130 хв$^{-1}$, при вітрі 7 балів досягалась швидкість ходу 9,5 вузлів.

На чисто вітрильній тязі судно ходило нечасто, ротори використовувались для підвищення швидкості ходу або для економії палива. На початку сорокових років ротори були демонтовані і «Барбара» стала звичайним судном [25].

З 2007 р. в Единбурзькому університеті Шотландії як науково-дослідне судно використовують судно «Клаудія» («Cloudia»), на якому роторні вітрила Флеттнера дообладнані додатковими поперечними ребрами жорсткості по всій довжині ротора. Як показали дослідження, така модернізація дозволяла суттєво підвищити підйомну силу ротора Флеттнера.

Свідоцтвом перспективності ідеї застосування роторних вітрил є розробки у останні 15 років великої кількості проєктів великих суден з допоміжною енергетичною установкою, до складу якої входять ротори Флеттнера.

Найбільш відомими є проєкти поромів MM110FE норвезької компанії «Мультімеритайл» («Multimaritime») (рис. 1.36) та проєкт «Скендлайне Зіро Емішен» (Scandlines Zero Emission), розроблений для сполучення між Данією та Німеччиною (рис. 1.37). У цих проєктах роторні вітрила є частиною енергетичної системи, розробленої для максимального скорочення викидів до атмосфери.



Рис. 1.36. Проєкт порома MM110FE з роторними вітрилами

Навесні 2010 р. в Германії на замовлення німецької компанії «Енеркон» («Enercon»), яка спеціалізується на виробництві та монтажі вітряних турбін на шельфі, було побудовано судно для перевезення негабаритних вантажів «E-Ship» (рис. 1.38). Характерний вигляд цьому судну надають чотири ротори, які використовують ефект Магнуса. Ці вітряні рушії працюють на два електрогенератори модифікованих турбін «Енеркон». Водотоннажність судна – 12 900 т, довжина – 130,4 м, ширина – 22,5 м, висота борту – 9,3 м.



Рис. 1.37. Проєкт порома «Скендлайне Зіро Емішен»
з роторними вітрилами та паливними елементами

На судні розташовані два крани вантажопідйомністю 80 та 120 т з великим вильотом стріли, воно має спеціальну відкриту вантажну палубу для перевезення негабаритних вантажів – лопатей та механізмів вітроенергетичних установок. Висота роторів – 27 м, діаметр – 4 м, швидкість судна до 17,5 вузлів. Головні двигуни – 2 СОД компанії «Mitsubishi» потужністю по 3500 кВт. Потужність для обертання роторів (280 кВт) відбирається від ГД.



Рис. 1.38. Судно «E-Ship» для перевезення негабаритних вантажів

Випробування, проведені під час здачі судна до експлуатації, дозволили оцінити ефективність застосування роторних систем на «E-Ship». За потужності на гребних валах 2770 кВт судно розвивало швидкість 14,3 вузлів (без роботи роторів), під час введення до дії роторної системи судно рухалось зі швидкістю 16,7 вузлів, що відповідало пропульсивній потужності 4740 кВт. З урахуванням витрат на обертання роторів, їх внесок у загальну пропульсивну потужність складає біля 1700 кВт, що відповідає 40 % економії палива [10, 11].

На сьогодні розроблено низку проєктів дообладнання існуючих суден роторними вітрилами. Американська компанія «Паулсен Гибрид» (Poulsen Hybrid) пропонує встановлення на балкери або танкери таких роторів з діаметром до 18 м і висотою до 25 м. Такі ротори встановлюються у районі форпіка на баку і у кормовій частині за надбудовою (рис. 1.39). Даний варіант має певні недоліки з точки зору безпеки мореплавання, але економія палива, яка забезпечується такими роторними вітрилами, за розрахунками компанії достатньо вагома.

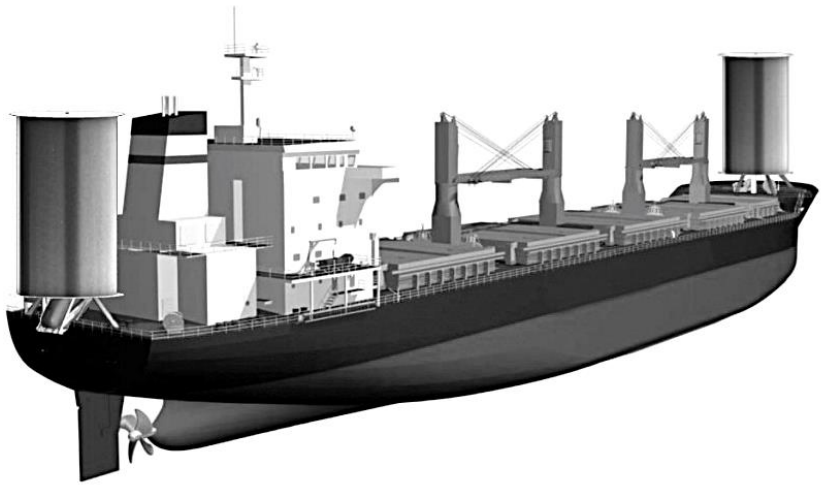


Рис. 1.39. Проєкт балкера дообладнаного мононроторами

Компанія «Maersk Tankers» та фінська компанія «Nozsepower Oy» провели успішне випробування двох роторних вітрил, установлених на танкері-продуктовозі «Maersk Pelican». Вони мають 30 м у висоту та діаметр 5 м. За рік економія палива на судні склала 8 %, еквівалентно зниженню викидів CO_2 на 1,4 тис. т.

Установка повністю автоматизована, вона дозволяє самостійно визначати силу вітру, щоб переключатись з дизельних двигунів на роторне вітрило і навпаки. Сьогодні судно знаходиться в експлуатації.

Усе наведене вище свідчить про те, що ідея роторних вітрил, які використовують ефект Магнуса, є перспективною і варто очікувати нових оригінальних проєктів її втілення.

1.3.3. Судна з турбовітрилами Кусто

Видатний француз Жак-Ів Кусто набув широкої відомості у світі завдяки дослідженням морських глибин.

Цікава інформація! Жак-Ів Кусто – видатний дослідник Світового океану, режисер, винахідник, автор численних книг та фільмів про підводний світ морів та океанів, народився 11 червня 1910 р. у м. Бордо (Франція).

З 1938 року почав занурюватись у воду з використанням маски, трубки і ластів. Спільно з Е. Ганьяном у 1943 р. розробив та провів випробування першої у світі моделі акваланга. Різні автономні пристрої для дихання на глибині розроблялись протягом усієї Другої світової війни, акваланг Кусто, за допомогою якого можна було занурюватись на глибини до 100 м, став першим, який виконувався серійно для цивільного населення. Це дозволило йому проводити довготермінові підводні дослідження, для цього він створив водонепроникні камери й освітлювальні прилади, винайшов та створив першу підводну телевізійну систему для проведення зйомок у товщі води.

У 1950 р. він орендував корабель «Каліпсо» та обладнав його мобільною лабораторією для проведення досліджень у відкритому океані та підводних зйомок. З 1957 року він був обраний директором Океанографічного музею Монако, що стало відкритим визнанням його досягнень у дослідженнях Світового океану.

Світове визнання прийшло до Кусто з виходом книги «В мире безмолвия», написаною у 1953 р. спільно з Фредериком Дюма. Фільм знятий за мотивами книги, отримав премію «Оскар» та «Золоту пальмову гілку».

З травня 1985 року команда Кусто поповнила свій флот ще одним судном – двощоговою яхтою «Алкіона» з експериментальним турбовітрилом, побудованою за власним проєктом.

Наукова та творча спадщина Ж.-І. Кусто включає в себе більше двох десятків видань наукових та популярних книжок, присвячених дослідженням Світового океану, велику кількість ментальних кінострічок, у яких відображався світ океанів та морів, та які набули всесвітнього визнання та популярності.

Команда однодумців Жака-Іва Кусто завжди пропонувала дбайливе відношення до навколишнього середовища. Завдяки цьому під час розробки рушія для нового судна народилась ідея створити максимально екологічну, і в той же час зручну та сучасну конструкцію. За такого підходу до вирішення поставленого завдання використання сили вітру здавалось найбільш перспективним. Але команда вирішає не вдовольнятись рішеннями, які на поверхні, і вирішує переробити концепцію роторних вітрил Флеттнера. У результаті було створено «Турбовітрило Кусто». Що є спільного і в чому відмінність цього турбовітрила від роторного вітрила Флеттнера?

Загальним є те, що і турбовітрило Кусто і роторне вітрило Флеттнера для отримання рушійної сили використовують ефект Магнуса. А відмінність полягає у тому, що ротор Флеттнера обертається стороннім джерелом енергії, а вітрило Кусто розвиває рушійну силу завдяки створенню з однієї сторони вітрила розрідження шляхом нагнітання повітря у його внутрішню порожнину.

Першим судном, оснащеним турбовітрилом став катамаран «Вітряний млин» («Moulin A.Vent»), який отримав назву на честь вина, прийшлось до вподоби всій команді (рис. 1.40).

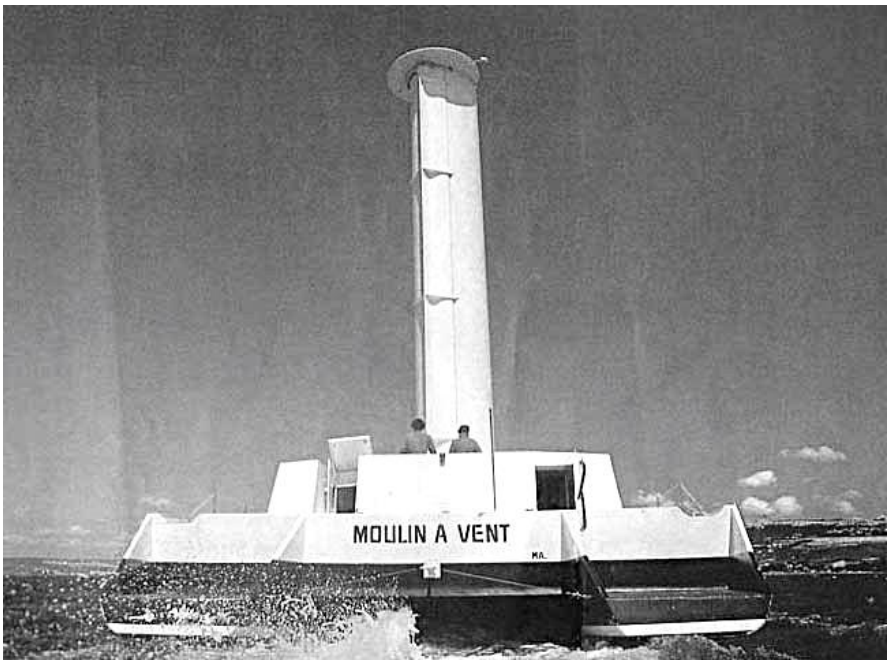


Рис. 1.40. Судно «Вітряний млин» на випробуваннях

12 жовтня 1983 року судно було спущено з верфі м. Ла-Рошель і вийшло на ходові випробування. Турбовітрило було встановлено в середній частині катамарана, управління ним було повністю автоматизовано. Установка показала достатню ефективність – за швидкості вітру 30 вузлів судно розвивало швидкість 11 вузлів. Недостатня міцність конструкцій корпусних елементів старого катамарана привела до того, що під час одного з атлантичних штормів турбовітрило отримало пошкодження.

Наступним судном з турбовітрилом стала створена за проєктом Кусто яхта «Алкіона» («Alcyone») спущена на воду у березні 1985 року (рис. 1.41).



Рис. 1.41. Судно «Алкіона»

Ім'я судну було надано на честь Алкіони – дочки грецького бога вітру Еола. На відміну від «Вітряного млина», «Алкіона» була оснащена двома допоміжними турбовітрилами. Судно було призначено для проведення океанографічних досліджень командою Кусто. Довжина судна 31,4 м, ширина 8,8 м, осадка 2,2 м, водотоннажність 76 т. На судні встановлено два дизельні двигуни потужністю по 150 кВт, які забезпечують рух судна у безвітряну погоду та загальносуднові потреби. Турбовітрила мають висоту 10,2 м, діаметр – 1,35 м (рис. 1.42). За швидкості вітру 20 вузлів, швидкість судна складає 13 вузлів. Залежно від умов плавання для руху судна можуть застосовуватись дизельні двигуни, які працюють на гребний гвинт, або турбовітрила, або спільно працюючі дизельні двигуни та турбовітрила.

Розглянемо механізм створення рушійної сили турбовітрилом Кусто (рис. 1.43, 1.44). Основу рушія складає вертикальна металева труба, яйцеподібного поперечного перерізу, наближеного до аеродинамічного профілю. Труба обладнана рухомим щитком, розташованим уздовж усієї її висоти, який поліпшує аеродинамічний розподіл зовнішньої та внутрішньої поверхонь.

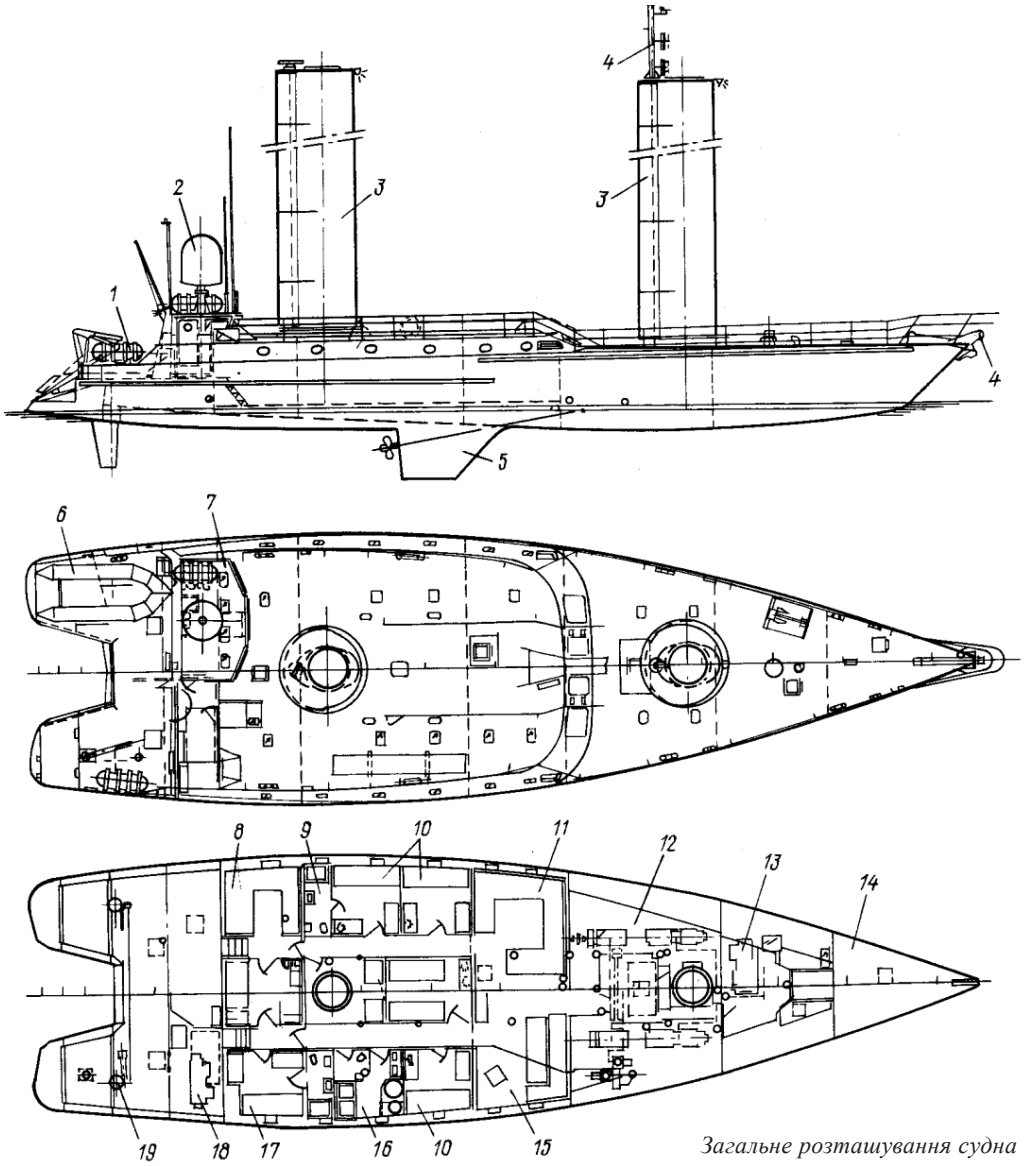


Рис. 1.42. Схема загального розташування суднових пристроїв та обладнання судна «Алкіона»

1 – рятувальний пліт; *2* – антена навігаційної системи «Лоран»; *3* – турбовітрило; *4* – роульс для якірного ланцюга; *5* – плавниковий кіль; *6* – надувний моторний човен; *7* – ходова рубка; *8* – штурманська рубка; *9* – туалет; *10* – двомісні каюти; *11* – камбуз; *12* – машинне відділення; *13* – механізми гідроприводів; *14* – шкіперська комора; *15* – кают-компанія; *16* – сауна; *17* – каюта капітана; *18* – гідроприводи; *19* – рульова машина



Рис. 1.43. Турбовітрило. Вигляд із середини на всмоктувальний вентилятор



Рис. 1.44. Кріплення турбовітрила до палуби

У верхній частині турбовітрила розташована вентиляторна система, яка нагнітає у трубу повітря, створюючи з одного боку вітрила необхідне розрідження. Рух відбувається у напрямку, перпендикулярному тискові. Таким чином, вітрило працює як вертикально розташоване крило літака. З одного боку повітря протікає повільніше, чим з іншої, створюючи рушійну силу.

Рухома заслінка та система нагнітання повітря вентиляторами підвищили ефективність турбовітрила. Головною його особливістю обумовленою конструкцією, є можливість отримати рушійну силу у потрібному напрямку, незалежно від того, куди дує вітер. Судно, обладнане

турбовітрилом Кусто, може рухатись навіть проти вітру, отримуючи енергію із різниці тисків, створюваної завихреннями повітря із середини вітрила та зовні його. Для того, щоб турбовітрило завжди було повернуто до вітру, воно обладнане спеціальними датчиками і встановлене на поворотній платформі.

Випробування «Алкіона» показали, що використання турбовітрила здатне знизити споживання палива на ходу до 30 % [13].

У 90-х роках XX ст. команда Кусто планувала поповнити свій флот науково-дослідницьким судном «Каліпсо 2» (рис. 1.45). Як і «Алкіону», нове судно планувалось оснастити турбовітрилом. Поряд із цим планувалось розмістити на судні сонячні батареї, які повинні були живити бортову електричну мережу та замінити гребні гвинти на крильчастий рушій. На жаль, смерть Ж. І. Кусто перешкодила здійсненню цих планів і на даний час «Алкіона» – це єдине судно у світі, оснащене таким вітросиловим рушієм, як турбовітрило Кусто.



Рис. 1.45. Проєктне зображення науково-дослідного судна «Каліпсо 2»

1.3.4. Повітряний змій заміняє вітрила

Перші згадування про повітряні змії, або сучасною мовою «кайти», у китайських літописах датовані II ст. до н. е.

Відповідно до цих літописів повітряні змії використовувались для різних побутових цілей та розваг. У цих же джерелах згадуються і випадки застосування повітряних зміїв для буксирування невеликих човнів.

Наприкінці XIX ст. було здійснено декілька застосувань повітряного змія для буксирування невеликих плотів з пасажирами та невеличких пасажирських суден.

Під час Другої світової війни кайти входили до комплекту стандартного обладнання на рятувальних плотах британської та австралійської авіації. На цих плотах кайт застосовувався для того, щоб підняти радіопередавач на необхідну висоту для здійснення зв'язку, а також для використання як бортового вітрила.

Не дивлячись на всі недоліки повітряного змія, у нього, як у альтернативи вітрила, була низка суттєвих переваг:

сила вітру на експлуатаційній висоті розташування кайта набагато більша ніж у вітрила;

кренувальний момент від кайта значно менший від кренувального моменту, утвореного щоглою.

Але ці переваги не зробили повітряний змій гідним конкурентом вітрилу ні в період розквіту вітрильного судноплавства, ні в часи інтенсивного втілення двигунів внутрішнього згоряння на суднах.

На сьогодні розроблена ціла концепція використання повітряних зміїв у вигляді парофойлів (зміїв, здатних складатись подібно парашуту) як основного рушія маломірних суден. Ця технологія передбачає, що судно рухається за рахунок сили вітру, що заповнює повітряний змій. Такі реалізовані проєкти відомі.

У той же час, використання кайтів на великих суднах, де вони можуть використовуватись тільки як допоміжні, потребує доопрацювання існуючих конструкцій для малих плавзасобів.

Найбільш відома у світі, як виробник повітряних зміїв гігантських розмірів, компанія «Скай Сейлз» («Sky Sails») протягом останніх 20-ти років відпрацьовувала технології, які б дозволяли використовувати енергію вітру на комерційних суднах. Результатом численних експериментів, проведених фахівцями компанії, став варіант конструкції зміїв для великих транспортних суден [16, 17].

Першим стало суховантажне судно «МС Белуга Скай Сейлз» («MC Beluga Sky Sails») довжиною 132 м, водотоннажністю 10 000 т (рис. 1.46, 1.47).

Перший рейс цього судна розпочався 22 січня 2008 року, коли «МС Белуга Скай Сейлз» вийшло з німецького порту Бремерхафен до порту Гуанту (Венесуела). Після віддалення від берега на 18 миль, за допомогою телескопічної щогли, розташованої на носу судна, на ньому був запущений повітряний змій площею 160 м^2. Вважаючи на те, що сила вітру на рівні моря і на висоті у декілька сотень метрів суттєво

відрізняються, «робочим полем» вітрила «Скай Сейлз» була обрана висота 100–500 м [14, 16]. Основна увага під час розробки конструкції і принципів взаємодії системи «кайт – блок управління – судно» була приділена питанням управління кайтом. Для цього був розроблений виносний блок управління положенням вітрила-крила, суміщений з блоком перетворення енергії, який працює за рахунок зміни тягового зусилля троса зчеплення кайта і судна, яке він буксирує.



Рис. 1.46. Судно «МС Белуга Скай Сейлз» оснащене кайтом



Рис. 1.47. Телескопічна щогла для запуску кайта, розташована на носу судна «МС Белуга Скай Сейлз»

Поряд із цим передбачені регулювальні пристрої, що дозволяють змінювати або впливати на форму вітрила повітряного змія, кут атаки, які відкривають відповідні клапани, операції зарифлення тощо.

Ці регулювання можуть здійснюватися автоматично за допомогою розташованих на повітряному змії датчиків або за допомогою радіосигналів з борту судна. Енергозабезпечення для роботи всіх цих пристроїв здійснюється за допомогою енергогенеруючого пристрою (ЕГП), розташованого між керувальною гондолою повітряного змія і тяговим тросом. З підвищенням навантаження ЕГП опиняється під значним тягнучим зусиллям, яке може бути використане для отримання енергії. Кількість цієї енергії, як показав досвід експлуатації вітрильно-змійових систем, удвічі перекриває потребу енергії блока управління.

Як показали експерименти, кайт, піднятий з висоти 10 м на висоту 200 м тільки за рахунок зростаючої швидкості повітря дає тягу у два рази більшу, що наочно свідчить про перевагу вітрила-крила над звичайними вітрилами.

Система управління кайтом повністю автоматизована.

Незважаючи на наведені вище досягнення у створенні систем «Sky Sails», вони, незалежно від розмірів повітряних зміїв, не здатні поки що замінити традиційні суднові двигуни. У той же час, вони як і ротори Флеттнера, виконуючи функції допоміжного рушія, здатні зменшити навантаження на основну енергетичну установку й тим самим знизити витрати палива.

За результатами трансатлантичного переходу використання кайта на судні «MC Beluga Sky Sails» забезпечило економію близько 10–12 % дизельного палива. Представник компанії-розробника системи «Sky Sails» обґрунтував цю економію тим, що за потужності головного двигуна 3800 кВт летюче вітрило «в умовах впливу потужних вітрів» розвивало потужність до 1000 кВт. У той же час повітряні змії «Sky Sails» пристосовані для роботи в умовах як потужних, так і відносно слабких вітрів.

На сьогодні у світі більше 15 суден різної водотоннажності та призначення оснащені системами «Sky Sails» і 5 знаходяться у стані дообладнання.

Серед цих розробок виділяється судно, побудоване за концепцією ECOShip – транспортний катамаран з оптимізованими обводами корпусу та додатковим рушієм-кайтом від компанії «Sky Sails» (рис. 1.48).

Гоночна яхта «Кітано», розроблена дизайнером Стефані Крюке, досягає рекордних швидкостей завдяки застосуванню кайта з повністю автоматизованою системою керування (рис. 1.49).

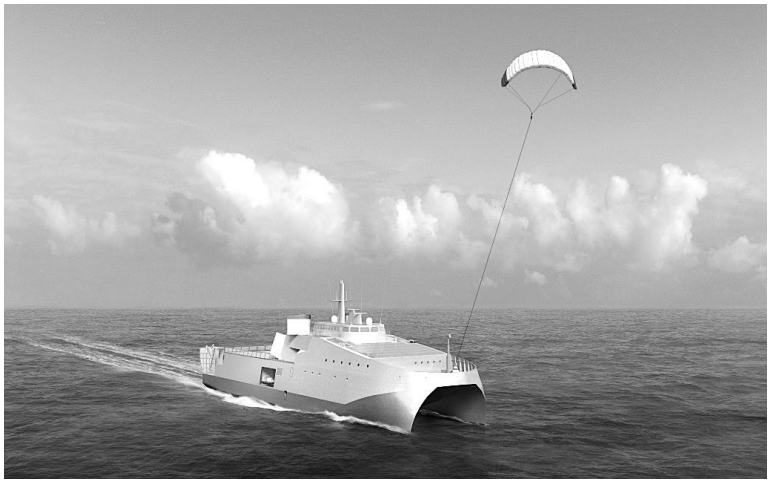


Рис. 1.48. Проєкт судна концепції ECOShip

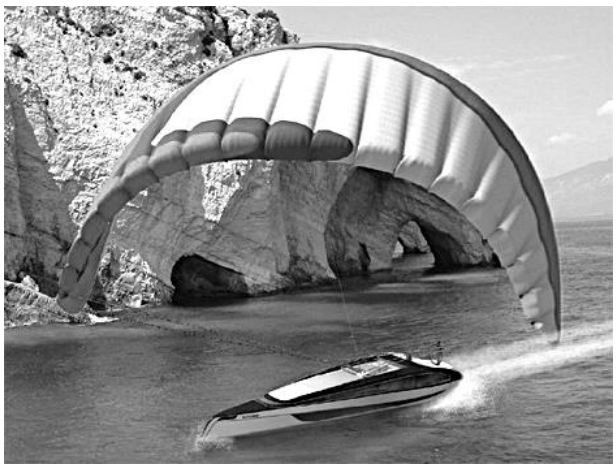


Рис. 1.49. Гоночна яхта «Кітано», обладнана кайтом

1.3.5. Судна, що використовують гібридні джерела енергії: вітрову та сонячну

Перше у світі судно, яке використовувало для руху сонячну енергію – яхта «Туранор Планет Соляр» («Turanor Planet Solar»), вийшла у кругосвітню подорож 27 вересня 2010 року. За формою корпуса – це моторний тримаран, уся поверхня якого (близько 530 м^2) вкрита фотоелементами. Електроенергія, отримана від них, живить бортову мережу та головний електродвигун. Основні зусилля проєктантів були спрямовані на забезпечення максимально можливої площі розташування сонячних панелей, та на скорочення споживання електричної енергії на судні на інші цілі, окрім пропульсивної. Усе це дозволило «Туранор Планет

Соляр» обійти навкруги світу, але умови для перебування екіпажу були далекі від комфортних.

Отриманий досвід проєктування та експлуатації цього судна навів дослідників на ідею об'єднати воєдино енергію вітру й сонця шляхом розробки жорстких вітрил з розташованими на них фотоелементами.

Характерним прикладом екологічно чистого судна, яке працює на енергії сонця та вітру стала яхта «Летюча риба» («Volitan») з жорсткими рухомими вітрилами, покритими фотоелементами. Електрична енергія від перетворення сонячної енергії накопичується в акумуляторах, розташованих у масивному килі (рис. 1.50) [18].

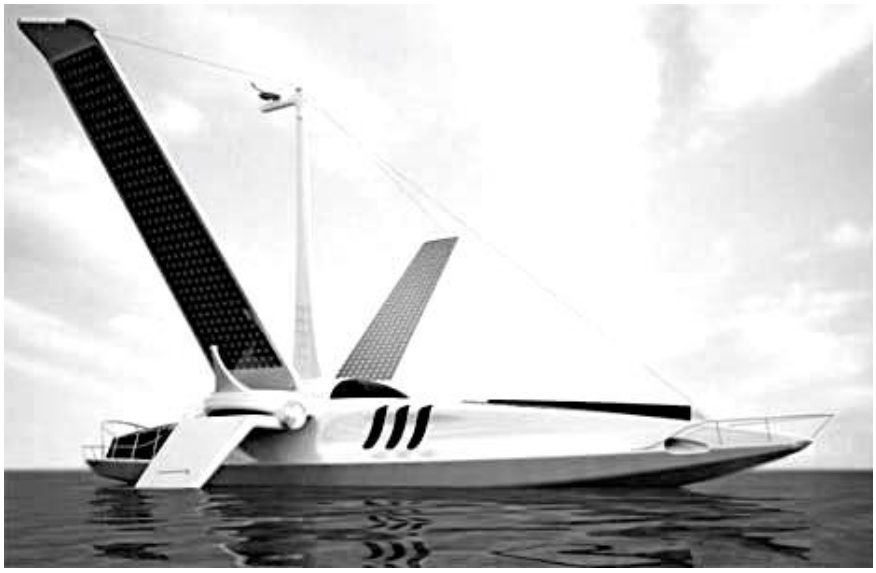


Рис. 1.50. Проєктне зображення яхти «Летюча риба»

Під час шторму вітрила яхти піднімаються вертикально, а за сприятливих погодних умов відхиляються на кут, оптимальний для уловлювання більшої кількості сонячного світла.

Рушієм судна є два гвинта, що приводяться до дії електродвигуном.

Яхта «Солілог» («Soliloguy») реалізує концепцію «Гібрид Маріно Пауер» («Hybrid Marine Power»), яка передбачає сполучення роботи гібридного двигуна й батарей, які використовують енергію вітру та сонця (рис. 1.51) [18]. Поряд із цим на судні є допоміжні дизельні двигуни. Особливістю даного проєкту є унікальний склад покриття корпусу «Солілог», який перетворює сонячну енергію для живлення електродвигунів. Три автоматично керованих поворотних вітрила дозволяють максимально ефективно використовувати вітер і сонце.

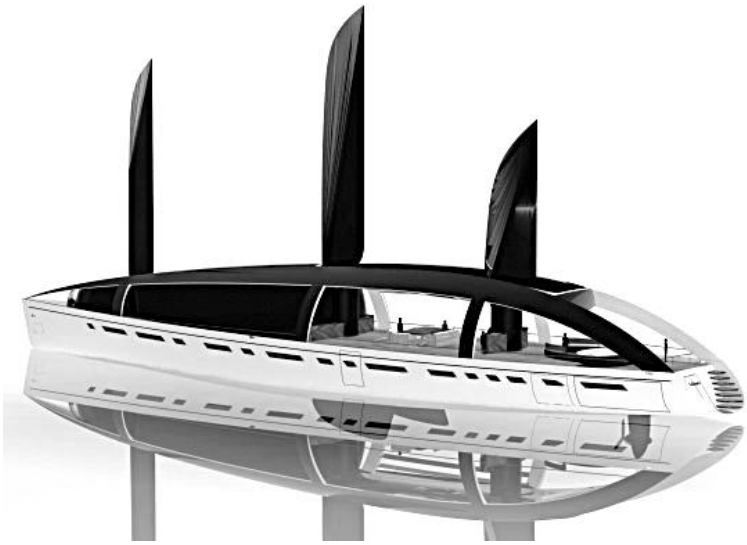


Рис. 1.51. Проєктне зображення яхти «Солілог» з піднятими вітрилами

Надбудова екологічної яхти покрита спеціальними глянцевими фотокомірками, вона має обтічну форму. Максимальна швидкість яхти після 12-годинного зарядження батарей – 8 вузлів [18].

Провідна у галузі проєктування суден на сонячній енергії австралійська компанія «Солар Сейлор» («Solar Sailor») під час розробки використовує дві технології. Перша – це «Сонячне крило» («Solar Wing»), яка полягає в тому, що великі сонячні батареї обладнуються шарнірним приводом, який дозволяє їм підійматися, нахилятись і розвертатись під різними кутами, працюючи одночасно як вітрило і як сонячна батарея. Друга технологія – це згадана вище концепція «Гібрид Маріно Пауер», яка передбачає паралельне або послідовне використання на гібридних суднах сонячної енергії, електроенергії від тягових акумуляторів та енергії викопного палива.

На відміну від багатьох перспективних проєктів, первісток сонячних гібридних суден від «Солар Сейлор» – сіднейський пором «Сидней Солар Сейлор» («Sydney Solar Sailor») з 2008 року вже працює у гавані Сіднея. Судно перевозить 100 пасажирів, його довжина складає 21,5 м, ширина – 10,3 м (рис. 1.52) [18].

Серед розробок компанії є повністю гібридні судна (які використовують лише альтернативні джерела енергії) та судна з частковим використанням ДВЗ. Останні особливо актуальні для великотоннажного флоту, де для покриття всіх енергетичних потреб судна потрібна значна площа поверхонь, обладнаних фотоелементами (рис. 1.53) [18].



Рис. 1.52. Пором «Сидней Солар Сейлор»



Рис. 1.53. Проєкт танкера із сонячними вітрилами від «Solar Sailor»

Найбільше на сьогодні гібридне судно, розроблене компанією «Сантек ВІП» («Suntech VIP»). Судно довжиною 31,5 м і шириною 9,2 м перевозить 186 пасажирів (у тому числі 30 у салоні-люкс). Судно здатне розвивати швидкість до 10 вузлів, використовуючи для роботи два електричні двигуни по 135 кВт, які отримують енергію від блока акумуляторів, сонячного вітрила та двох дизель-генераторів по 150 кВт кожен. Сонячне вітрило на судні одне, але значно більших розмірів, ніж у попередніх моделей суден компанії «Солар Сейлор», воно повністю покрито фотоелементами компанії «Suntech».

Гонконзька компанія «Гонконзький жокей» замовила у «Солар Сейлор» чотири пороми, які, на відміну від «Сантек ВІП» використовують

паралельну схему гібридного привода (рис. 1.54). Гребні гвинти приводяться до дії двома дизелями по 180 кВт або двома електродвигунами потужністю по 18 кВт. Передбачений аварійний дизель-генератор потужністю 20 кВт. У разі використання двох двигунів внутрішнього згоряння швидкість порома складає 16,5 вузлів, під час використання лише сонячних батарей і електроакумуляторів – 6 вузлів. У подальших роботах з удосконалення енергетичної установки судна планується використання в головному двигуні природного газу, а також досягнення того, щоб у сонячні дні потреби в електроенергії на 75 % задовольнялись за рахунок сонячних батарей, і лише на чверть – вуглеводневого палива [18].



Рис. 1.54. Пором «Сантек ВІП» з жорстким сонячним вітрилом у порту Шанхай



Рис. 1.55. Гонконзький пором, обладнаний вітрилами від «Солар Сейлор»

Дизайнером японської компанії MTI розроблено проєкт транспортного судна «Супер Еко Шип 2030» («Super Eco Ship 2030»), основна концепція якого полягає у використанні альтернативних джерел енергії (рис. 1.56). Енергія сонця буде заряджати двадцять сонячних батарей площею 30 000 м^2, які повністю закриють верхню вантажну палубу. Енергія вітру використовується за допомогою восьми жорстких вітрил площею 4000 м^2, які розташовані на верхній палубі і за потреби прибираються у корпус.

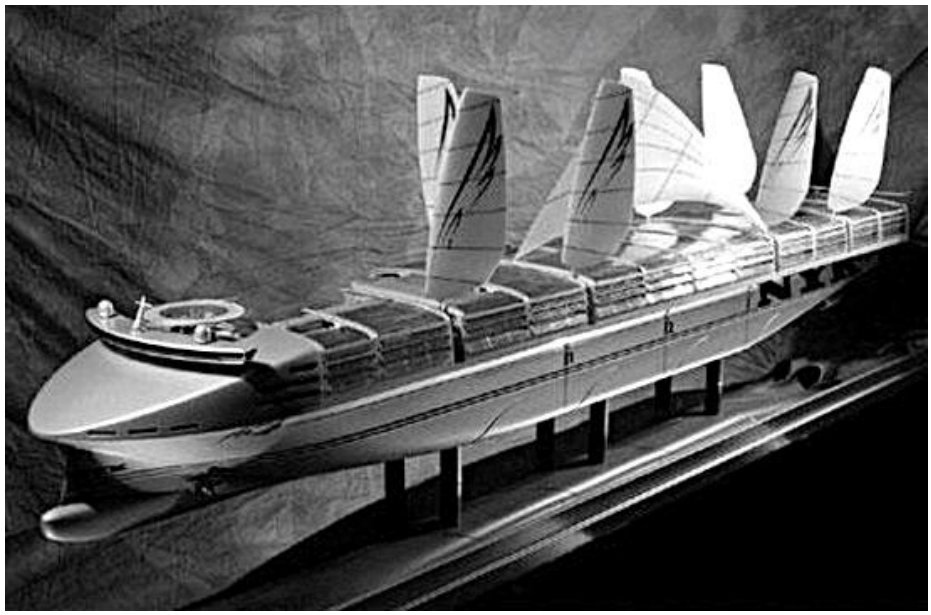


Рис. 1.56. Модель судна за концепцією «Супер Еко Шип 2030»

У складі енергетичної установки використовуються паливні елементи та дизельний двигун, що працює на LNG. Зниженню опору воді сприятиме застосування повітряного змащення підводної частини корпуса судна. Усе це дозволяє на 70 % знизити викиди CO_2 порівняно із сучасними морськими суднами.

Оригінальний проєкт великої яхти для 52 пасажирів з жорсткими вітрилами, розроблений дизайнером Т. Шармой рис. 1.57. Розроблена ним гіперяхта «Альбатрос» довжиною більше 200 м, має чотири щогли з жорсткими вітрилами, суцільно покритими фотоелементами («сонячними вітрилами»). Незвичайність цієї концепції полягає у модульності конструкції яхти.

Центральний корпус «Альбатроса» по боках має дві відокремлювані вісімдесятиметрові яхти.



Рис. 1.57. Проєкт гіперяхти «Альбатрос» – вигляд без бокових яхт



Рис. 1.58. Проєкт гіперяхти «Альбатрос» – вигляд з корми

Використання гнучких вітрил і фотоелементів – концепт гібридної яхти «Айкеа» («Icare»), відрізняється від розглянутих вище (рис. 1.59). Ця 65-метрова яхта завдяки газотурбінним двигунам розвиватиме швидкість 25 вузлів.

На яхті встановлені три щогли з вітрилами типу «Дінапар», особливість яких полягає у нанесених на них гнучких фотоелементів, електрична енергія, вироблена за їх допомогою, живить бортову мережу. Екіпаж яхти – 10 осіб, пасажирів – 16.



Рис. 1.59. Проєкт гібридної яхти «Айкеа»

Наведена у даному підрозділу інформація охоплює лише частину сучасних розробок суден різних розмірів і призначення, які використовують енергію вітру та сонця.

Безумовне одне, яким би не було вітрильне судно майбутнього, таким що використовує гнучке або жорстке вітрильне оснащення, вітрила на них виконують функцію основної чи тільки допоміжної енергетичної установки, їх використання у складі пасажирського та транспортного флоту є перспективним, насамперед з урахуванням зниження шкідливого впливу на навколишнє середовище, порівняно із суднами із тепловими двигунами на вуглеводному паливі.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. *Яка була мета експедиції Тура Хейердала на плоту «Кон-Тікі»?*
2. *Які особливості загальної будови плоту «Кон-Тікі»?*
3. *Застосування яких технологій дозволило забезпечити рух суден проти течії?*
4. *Назвіть принцип дії туєрного судна.*
5. *У чому особливості експедиції підводного дослідницького апарату «Бен Франклін»?*
6. *Які типи весел застосовують на гребних суднах?*
7. *Наведіть особливості галерних весел.*
8. *Як вирішувалась задача розміщення на гребних суднах більшої кількості гребців?*
9. *Назвіть типи гребних суден з різною кількістю рядів гребців.*
10. *Наведіть приклади застосування мускульної сили людини для руху підводних човнів.*
11. *Чому першими вітрильними суднами стали торговельні судна?*
12. *Надайте характеристику каравел, на яких Христофор Колумб здійснив експедицію з пошуку західного шляху до Індії.*
13. *У чому полягають особливості конструкції чайних кліперів?*
14. *Яке судно мало найпотужніше у світі вітрильне оснащення? Наведіть його основні характеристики.*
15. *Як визначаються швидкість і сила вітру?*
16. *Як характеризується вітер?*
17. *Як називається положення судна відносно вітру?*
18. *Надайте визначення терміна «оверштаг».*
19. *Як визначається центр вітрильності?*
20. *Надайте визначення рангоуту.*
21. *З яких елементів складається вітрильне оснащення?*
22. *Наведіть склад нерухомого рангоуту.*
23. *Які елементи оснащення входять до складу рухомого рангоуту?*
24. *У чому полягає призначення рухомого рангоуту?*
25. *Як називається рухомий рангоут для прямих вітрил?*
26. *Назвіть елементи рухомого рангоуту для косих вітрил.*
27. *Наведіть назви щогл вітрильного судна.*
28. *Назвіть види вітрильного оснащення залежно від типу вітрил.*
29. *Як формується назва прямих вітрил?*
30. *Як називаються найбільші прямі вітрила на судні?*
31. *Назвіть місце розташування на судні таких вітрил, як трюмсель.*
32. *Поясніть суть маневру «обрасопити реї».*
33. *Як збільшують площу прямих вітрил при попутному вітру?*
34. *У чому полягає суть операції з вітрильним оснащенням «брати рифи»?*

35. *Скільки рядів рифів можуть мати великі вітрила?*
36. *Наведіть типи косого вітрильного оснащення.*
37. *У чому полягає відмінність між такими косими вітрилами, як стакселі і клівери?*
38. *Розгляньте основні положення концепції вітрильного оснащення «Dyna Rig».*
39. *Як прибираються вітрила у вітрильному оснащенні «Dyna Rig»?*
40. *Наведіть приклади реалізації на суднах вітрильного оснащення «Dyna Rig».*
41. *У чому полягає японська концепція відродження вітрильних суден?*
42. *Які складові елементи входять до складу жорстких вітрил японського танкера «Шин Айтоку Мару»?*
43. *Надайте визначення ефекту, відкритого фізиком Г. Магнусом.*
44. *Розгляньте елементи силової схеми роторних вітрил судна «Букау».*
45. *Надайте характеристику ЕУ судна «Барбара».*
46. *Розгляньте склад ЕУ судна з роторними рушіями «E-Ship1».*
47. *У чому полягає спільність та відмінність принципів утворення рушійної сили у роторних вітрилах та турбовітрилі Кусто?*
48. *Надайте характеристику турбовітрил Кусто яхти «Алкіона».*
49. *Який механізм створення рушійної сили турбовітрилом Кусто?*
50. *У чому полягає основна перевага повітряних зміїв перед традиційними вітрилами?*
51. *Охарактеризуйте досвід використання кайта на судні «Белуга Скай Сейлз».*
52. *Чим пояснюється економія палива під час застосування кайтів на морських суднах? Розгляньте механізм цієї економії.*
53. *Які перспективи використання кайтів на морських суднах? Чи може кайт замінити традиційні суднові двигуни?*
54. *Охарактеризуйте особливість СЕУ яхти «Туранор Планет Солар».*
55. *Як забезпечується екологічна чистота під час експлуатації яхти «Летюча риба»?*
56. *Покажіть, якими технічними засобами на яхті «Солілог» забезпечується використання енергії сонця та вітру.*
57. *Порівняйте дві ключові технології проєктування суден на сонячній енергії компанії: «Солар Сейлор» та компанії «Гібрид Марін Пауер».*
58. *Надайте характеристику ЕУ судна «Сантек ВІП».*
59. *У чому полягає концепція паралельної схеми гібридного приводу поромів компанії «Гонконзький жокей»?*
60. *Які проєктні рішення дозволили знизити викиди CO_2 із судна «Супер Еко Шип 2030»?*
61. *У чому полягає особливість проєкту яхти «Альбатрос» з точки зору забезпечення руху судна?*

ГЛАВА 2. ПАРОВІ МАШИНИ – ПЕРШОПРОХІДЦІ ВІКУ ПАРИ

2.1. Історичні передумови створення теплових двигунів

З давніх часів для забезпечення руху суден людина настійливо шукала спосіб заміни вітру, непередбаченого за силою і напрямом, та весел, які потребували багато робочих рук. Спроб побудувати судно, яке приводиться у дію керованим людиною двигуном, в історії суднобудування налічується немало. Але тільки коли людство навчилося використовувати силу пари, створення такого двигуна стало реальністю.

Історія розвитку суднових енергетичних установок нерозривно пов'язана з історією створення теплових двигунів для вирішення загальних енергетичних проблем, вона є відображенням того майже чотиривікового періоду розвитку людства, коли методом проб та помилок, в умовах майже повної відсутності теоретичного обґрунтування ідей, проєктів, схем і процесів, крок за кроком видобувалася істина.

Навіть такий скромний екскурс в історію суднової енергетики, який здійснений у межах даного видання, пов'язаний із загальними труднощами, які полягають у протиріччі дат, фактів, параметрів, характеристик, викладених у матеріалах з різних джерел і різних авторів, з їх суб'єктивним підходом, перевірити який не завжди є можливим.

У той же час володіння історичними даними дозволяє не повторювати помилок, припущених до нас, надає можливість використовувати ідеї, які випереджали час і не могли бути реалізовані раніше.

Патенти, книги, статті, написані в різний час, різними мовами і присвячені історії спроб використання сили пари для отримання корисної роботи, могли б скласти чималу бібліотеку. Адже саме винахід парової машини, який надав людству необхідну йому енергію, суттєво прискорив рух шляхом не тільки технічного, але й соціального прогресу.

Початок цієї історії сягає сивої давнини – античних часів. Давні греки уміло використовували силу пари, але зазвичай у релігійних ритуалах.

Не можна не згадати винахід Герона Олександрійського – знаменитий еоліпіл – кулю, яка обертається під дією пари, що витікає з двох зігнутих трубок. Еоліпіл не відповідає навіть формальному визначенню теплового двигуна, тому що він нічого не приводить у рух, це просто забавна іграшка. Але в ньому, безумовно, теплота перетворюється на механічну роботу, а ідея використання енергії пари шляхом передачі струменів у коловому

напрямку пізніше була застосована під час створення парових турбін. Цей винахід по праву вважають прообразом сучасної парової турбіни.

Леонардо да Вінчі описує винайдену Архімедом парову пушку – архітроніто, яка з використанням енергії водяної пари кидала ядра на велику відстань [3].

Більше п'ятнадцяти століть після Герона ніхто не робив ніяких спроб використання водяної пари.

У 1615 році у Франкфурті з'явилася на світ книга «Причини рушійних сил з різними корисними та забавними історіями», що належала перу французького інженера й архітектора Соломона де Ко. У ній згадується про можливість підйому води за допомогою вогню з кулі, у якій утворюється пара. Через кришку круглої посудини майже до дна проходила труба. Кулю заливали водою, герметично закривали та розводили під нею вогонь. Утворювана пара тиснула на воду зверху, й остання піднімалася по трубі, навіть якщо та була довгою.

Маркіз Вустер (Англія) у 1663 році опублікував книгу «Вік тих імен та образи тих винаходів, котрі приходять мені на пам'ять», якій був описаний винахід, пов'язаний з оригінальним пристроєм для підйому води за допомогою пари.

Приблизно тим же шляхом, що і Вустер, рухався ще один претендент на звання винахідника парової машини – Семюель Морленд. Він першим зрозумів потребу визначення кількісних співвідношень у питанні використання теплової енергії. Про це свідчить і підзаголовок назви його роботи «Підйом води всілякого роду машинами, приведений до міри ваги». Морленд володів знаннями, щодо процесів перетворення води на пару: «Коли вода дією вогню перетвориться на пару, то остання миттєво займає простір, набагато більший (майже у 2000 разів) від того, який займала раніше вода, і пара скоріше розірве пушку, ніж залишиться в ній. Але якщо нею керувати за законами статики і привести розрахунками до міри ваги й рівноваги, то він буде нести вантаж спокійно, як добрий кінь, і здійснювати корисну роботу».

Перелічені винаходи не були двигунами, вони не могли бути використаними для конкретних технічних застосувань. Однак вони демонстрували можливість отримання механічної роботи за допомогою вогню та пари. Без цих винаходів створення теплових двигунів не було б можливим.

Поява теплових двигунів пов'язана з виникненням та розвитком промислового виробництва на початку XVII ст. Найбільш великі досягнення у цій сфері відбулися в Англії, найбільш розвиненій державі на той час. Теплові двигуни були необхідні для вирішення суто практичного завдання – відкачування води з вугільних та рудних копалень.

У 1698 році Томас Севері, колишній рудокоп, а потім капітан торговельного флоту й шахтовласник, отримав патент на парову машину, яку він продемонстрував членам Королівського товариства вже наступного року. Патент № 356 свідчив про те, що він виданий на пристрій для підйому води та отримання руху для всіх видів виробництва за допомогою рушійної сили вогню. За своєю будовою це була майже та машина, яку пропонували Вустер і Морленд, але Севері вперше відділив робоче тіло – водяну пару – від перекачувальної води та використав конденсацію пари при її охолодженні.

Пара з котла (рис. 2.1) через кран випускалася в посудину з водою і витискувала воду в напірну (верхню) трубу. Севері вдалося, на відміну від усіх попередників, реалізувати повторюваність циклів. Це досягалося тим, що, коли вода повністю витискувалася, а посудина залишалася заповненою парою, напірну трубу перекривали (у нижній частині труби встановлено всмоктувальний клапан, а у верхній – нагнітальний) та посудину обливали холодною водою, унаслідок чого пара у посудині конденсувалася і виникало розрідження, завдяки чому чергова порція води всмоктувалася через впускну трубу. Стикання пари з холодною водою в камери, яка була одночасно і двигуном, і насосом, приводило до крайньої неекономічності установки. Машини Севері використовувалися для водопостачання, осушування болот та лугів, вони мало відповідали сучасним уявленням про парові машини, тому що не мали рухомих частин (тепер їх називають *термомеханічними насосами*). Але все-таки це були перші машини, здатні працювати безперервно.

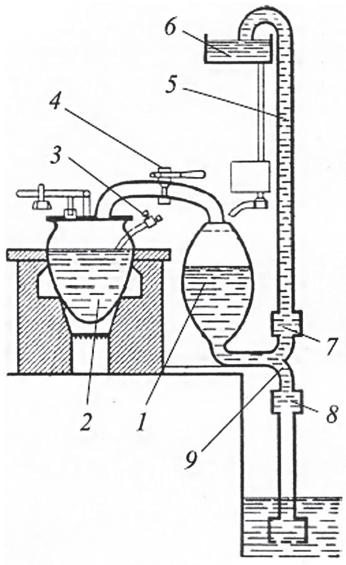


Рис. 2.1. Паровий водопідйомник Севері:
1 – посудина з водою;
2 – котел; *3* – трубка контролю за рівнем води у котлі;
4 – кран; *5*, *9* – напірна і всмоктувальна труби відповідно;
6 – верхній резервуар;
7, *8* – відповідно нагнітальний та всмоктувальний клапани

Цікавий факт! У паровій машині Севері було реалізовано дуже важливе для подальшого розвитку енергетики рішення: уперше використана конденсація пари за рахунок її охолодження. Севері стверджував, що ця ідея прийшла йому в голову, коли він готував собі глінтвейн. Колба з вином стояла на вогні, а Севері мив руки в ємності з холодною водою. Вино в колбі почало кипіти, що загрожувало зіпсувати смак делікатного напою. Для того, щоб запобігти цьому, Севері вирішив охолодити вино й опустив шийку колби в ємність з водою. Природно, що вода з ємності миттєво всмокталася у колбу, і це наштовхнуло Севері на важливу думку. Він вирішив, якщо заповнити закритий об'єм парою, а потім сконденсувати її швидким охолодженням, то вода, яку необхідно відкачати, всмокчеться у цей об'єм, звідкіля її потім можна видалити надмірним тиском пари.

Постає питання, чому ж англійський парламент видав Севері патент на застосування «рушійної сили вогню для приведення в рух млинів усякого роду», коли його установка була виключно водопідйомною. Це було пов'язано з тим, що установка, підіймаючи воду, створювала різницю водяних рівнів, яку можна було використати як джерело енергії для роботи звичного, зручного, технологічного з точки зору виготовлення водяного колеса. Тобто водяний насос надав можливості роботи водяному колесу в будь-якому пункті незалежно від наявності річок і водоспадів.

Значний вплив на подальший розвиток теплових двигунів зробив французький фізик Дені Папен – відомий винайденням автоклава, запобіжного клапана та порохової машини, який у 1698 році у пошуках універсального двигуна також прийняв рішення застосувати водяну пару, конденсація якої за атмосферного тиску супроводжується зменшенням об'єму більше ніж у 1500 разів.

У циліндрі пароатмосферного двигуна Д. Папена (рис. 2.2) рухається поршень, з'єднаний зі стрижнем з отвором, у який установлюється стопор для утримання поршня у крайньому верхньому положенні. До стрижня приєднаний вантаж. У циліндр вводиться трохи води, яка під час нагрівання перетворюється на пару, під дією якої поршень, долаючи атмосферний тиск, підіймається у верхнє положення, у якому фіксується стопором. Після цього джерело нагрівання прибирається, пара під час охолодження циліндра конденсується, унаслідок чого у ньому створюється розрідження. Якщо тепер стопор прибрати, під дією різниці атмосферного тиску й розрідження всередині циліндра поршень рухатиметься донизу й підніме вантаж.

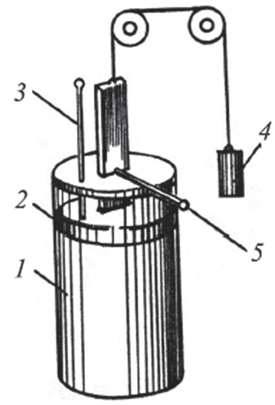


Рис. 2.2. Схема двигуна Д. Папена:
1 – циліндр; *2* – поршень; *3* – стрижень-клапан випуску повітря; *4* – вантаж; *5* – стопор

Цикл парового двигуна Папеном був визначений правильно. У сучасних паросилових установках такий цикл здійснюється у складному ланцюжку пристроїв: котел, двигун, конденсатор, насос, котел. У двигуні Папена всі процеси суміщені в одному циліндрі, тому він не міг робити більше одного ходу на хвилину, тобто він був практично непридатним.

У подальшому Папен не прийняв ніяких спроб удосконалити свій винахід, а зайнявся доводкою машини Севері. У 1707 році він подав Королівському товариству Англії свій варіант машини Севері, пристосованої для руху суден. Він оснастив своєю машиною, яка власне являла собою паровий насос, судно, гребні колеса якого обертала піднята насосом на висоту вода, що падала на колеса. Випробування судна проходили на річках Фульде й Везер, однак місцеві судновласники, побоюючись конкуренції, зруйнували судно.

Основна заслуга Севері й Папена полягає в тому, що вони на практиці застосували головні умови перетворення теплоти на роботу: недостатньо мати пружне робоче тіло й підводити до нього теплоту, частину теплоти це робоче тіло повинно після розширення віддати холодному джерелу.

Наступний важливий крок на шляху створення теплових двигунів здійснив англійський винахідник, коваль за професією, Томас Ньюкомен. У своїй машині він зробив спробу поєднати ідеї Севері та Папена, застосувати використаний Папеном циліндр із поршнем, але конденсацію пари здійснювати не за рахунок видалення вогню з-під циліндра, як пропонував Папен, а за рахунок конденсації пари при їх охолодженні, як це було у машині Севері.

Машина Ньюкомена (рис. 2.3) складалася з двох вертикальних робочих циліндрів, пара потрапляла під поршні цих циліндрів зі спільного котла через розподільний кран по черзі. Тиск пари піднімав поршень, після досягнення ним найвищої точки у циліндр впорскувалася вода, пара конденсувалася і поршень під дією атмосферного тиску опускався, здійснюючи робочий хід. Насосні циліндри були розташовані паралельно робочим, їх поршні з'єднувалися з поршнями робочих циліндрів через качалки – коромисла.

Для реалізації своїх ідей Ньюкомен у 1705 р. заключив угоду з промисловцем – склоробом Джоном Коулі – й незабаром машини Ньюкомена отримали широке розповсюдження.

Чергування охолодження циліндра впорскуваною водою з наступним нагріванням його парою призводило до значних утрат теплоти, у зв'язку із чим коефіцієнт корисної дії (ККД) установки складав 1 %. Для деяких машин Ньюкомена утримували до 50 коней, які ледве встигали підвозити паливо. Недоліки пароатмосферної машини давали про себе знати, і у короткий час двигуни демонтували.

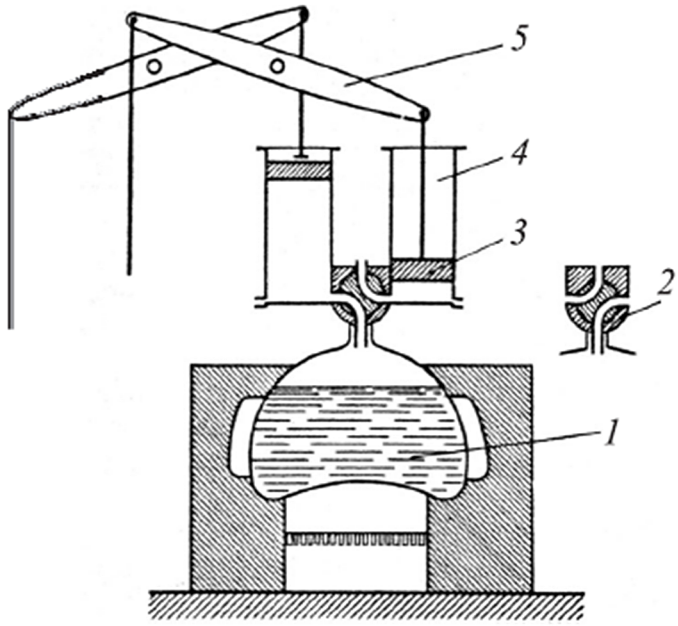


Рис. 2.3. Водовідкачувальна машина Ньюкомена:
1 – котел; *2* – розподільний кран; *3* – поршень; *4* – робочий циліндр; *5* – коромисло

Спроби застосувати існуючі парові двигуни для руху суден скінчилися після того, як відомий учений Д. Бернуллі довів, що існуючі двигуни, у тому числі машина Ньюкомена, не здатні забезпечити рух судна.

Машина Ньюкомена, хоч і отримала визнання, могла застосовуватися тільки для відкачування води. За потреби обертання механізму машину встановлювали як водопідйомний засіб для подачі води на лопаті водяного колеса подібно до суднового двигуна, запропонованого Папеном.

У 1736 році співвітчизник Ньюкомена Джонатан Хулл пристосував його машину для руху судна [7]. На декількох вітрильниках він встановив пароатмосферну машину як допоміжний двигун. Передача потужності від машини до гребного колеса, розташованого у кормі, здійснювалася через систему блоків та ременів.

У той же час цей двигун не міг працювати окремо від насоса, приводити до дії групу заводських машин – знарядь. Двигун не був універсальним за технічним застосуванням.

2.2. Створення перших універсальних двигунів

Перший універсальний тепловий двигун був створений механіком І. І. Ползуновим. Він першим зрозумів, що можна змусити парову машину приводити у рух не тільки насос, але й ковальські міхи. Робочі органи його машини безперервно передавали рух валу відбору потужності. Ця якість надавала машині Ползунова універсальності.

Проєкт парової машини І. І. Ползунов виклав у поданні начальнику гірської канцелярії. Схема її наведена на рис. 2.4. Два поршня зв'язані з головним валом за допомогою ланцюгів, до вільного кінця кожного з них приєднаний балансир. Водорозподільний кран по черзі подає охолоджуючу воду до підпоршневих порожнин. Пароподільний кран поєднує ці порожнини з котлом. Коли одна з порожнин поєднувалася з котлом, поршень підіймався догори, після чого пароподільний кран повертався і відсікав підпоршневу порожнину від котла. Через трубку впорскувалася вода, пара конденсувалася і під поршнем утворювався вакуум, під дією атмосферного тиску поршень опускався і здійснював корисну роботу.

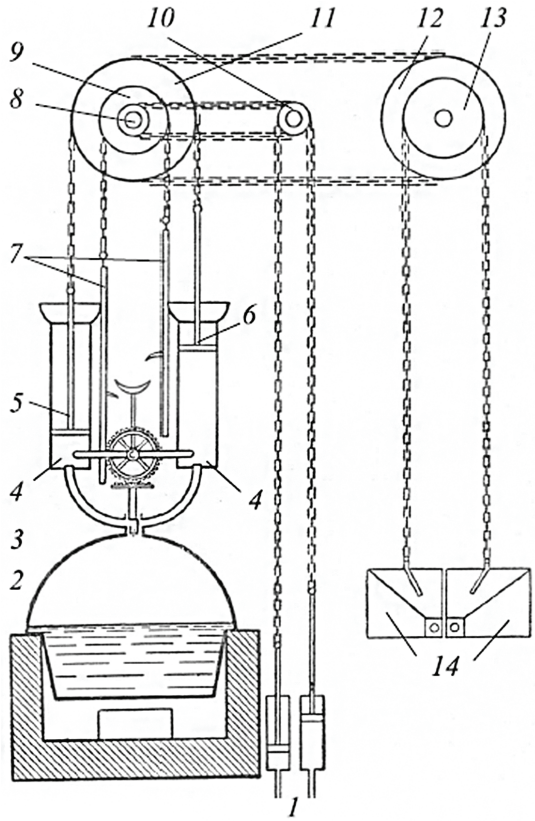


Рис. 2.4. Схема парової машини І. І. Ползунова (1763 р.):
1, *10*, *12*, *13* – привід до повітродувних міхів; *14*, *2* – паровий котел; *3* – пароподільний кран; *4* – труби для впорскування води у порожнини циліндрів; *5*, *6* – поршні; *7* – штанги пароводоподільного механізму; *8* – головний вал двигуна; *9*, *11* – привід насосів

На відміну від всіх попередніх конструкцій робочі органи двигуна і споживачів потужності не пов'язані один з одним. Робоче зусилля від поршнів передається шківу, від якого приводяться в дію пароводорозподільний пристрій, живильний поршневий насос і робочий вал, що зі свого боку приводить у дію повітродувні міхи плавильних печей. Запропонований Ползуновим принцип підсумовування на одному валу роботи декількох циліндрів у майбутньому був покладений в основу конструювання багатоциліндрових двигунів.

Свою машину Ползунов почав будувати у 1764 р., а закінчили її та провели випробування у серпні 1766 р., уже після смерті винахідника. Протягом майже двох місяців вона працювала за своїм прямим призначенням, але без Ползунова ніхто машиною не займався, почалися неполадки, вона довго простояла й у 1779 р. її розібрали.

Про масштаби машини Ползунова свідчать її розміри: висота 11 м, на її виготовлення витрачено 25 т заліза та міді, більше двох тонн свинцю й олова. Потужність машини складала 30 к. с. Патенти на свій винахід Ползунов не брав, тому перший у світі патент на універсальний тепловий двигун був виданий у Англії Джеймсу Уатту 5 січня 1769 р., на шість років пізніше, ніж датовано подання з проєктом машини І. І. Ползунова.

Джеймс Уатт був талановитим механіком університету м. Глазго, він підтримував відносини з багатьма вченими, займався самостійними розробками в галузі паротехніки. Так Д. Уатт досліджував властивості водяної пари, вимірював теплоту випаровування води, визначав об'єм пари, на яку перетворюється вода під час кипіння, й за допомогою приладів власної конструкції він отримав значення, близькі до істинних.

Історична довідка. Джеймс Уатт (1736–1819) народився у маленькому шотландському містечку Гриноке неподалік від Глазго.

Маленький Джеймс закінчив місцеву школу, яку організували для своїх дітей місцеві купці й ремісники, після чого навчався у торговому ліцеї. Далі батько відправив Джеймса у Глазго учнем до Бентлі – відомого майстра оптичних і механічних приладів. Під час перебування у Глазго Джеймс жив у свого дядька, професора місцевого університету. На обдарованого хлопчика звернув увагу Томас Дік, професор фізики, який влаштував Джеймса учнем до Моргана, відомого лондонського майстра тонкої вимірювальної техніки.

Настільки успішно відбувалося навчання у Моргана, що вже через півроку Джеймс відкрив у Лондоні власну майстерню з виготовлення і ремонту навігаційних приладів. Через деякий час Джеймс повернувся до Глазго і за протекцією професора Діка став працювати у місцевому університеті майстром з ремонту фізичних приладів. У 1763 р. Уатт відкрив власну фірму аналогічного спрямування.

У 1764 р. відбулася дійсно епохальна подія: до Уатта звернулися з пропозицією про вдосконалення парової машини, запропонованої винахідником Томасом Ньюкоменом, з метою підвищення її ефективності. Уже через 2 роки Джеймс Уатт створив промисловий зразок нової машини, потужність якої була більшою майже у два рази, він назвав

її «Вельзевул». Підвищенню ефективності роботи цієї парової машини сприяло застосування створеного Уаттом відцентрового регулятора. Фінансував роботи Уатта та сприяв утіленню його ідей і промисловому випуску парових машин власник металургійних заводів Джон Ребек. Після патентування свого винаходу в Лондоні Уатт на запрошення відомого промисловця Метью Болтона переїхав до Бірмінгема, де у повне його розпорядження для проведення робіт з удосконалення парового двигуна була надана механічна майстерня. До речі, саме Уаттом була запропонована методика вимірювання потужності двигуна, він запропонував назвати одиницю її вимірювання «кінською силою». Цікаво, що членом Королівського товариства Джеймса Уатта було обрано у 1783 р. за те, що він першим установив склад атмосферного повітря.

Розмірковуючи над основними принципами створення універсального парового двигуна, Уатт прийшов до висновку, що для цього необхідно наступне:

по-перше, циліндр, до якого подається пара, повинен бути постійно гарячим, як і пара, для чого його потрібно підтримувати у постійно нагрітому стані, створивши навколо парову оболонку;

по-друге, процес конденсації має бути винесений за межі циліндра, конденсація пари для утворення вакууму повинна проходити за температури не вище 30 °С;

по-третє, потужність машини можна збільшити, якщо на поршень буде впливати не атмосферний тиск, а тиск пари;

по-четверте, парова машина не повинна бути зв'язаною ні з яким споживачем потужності, вона має бути універсальним тепловим двигуном.

Уже наприкінці 1765 р. Уатт продемонстрував роботу свого двигуна, у 1769 р. побудував більш досконалу експериментальну модель, і у січні 1769 р. отримав патент на свій винахід. Справжній тріумф настав, коли Уатт у 1774 р. став компаньйоном великого англійського промисловця М. Болтона і на його заводі налагодив виготовлення парової машини для практичного використання (рис. 2.5).

Циліндр без верхньої кришки розміщений у паровій оболонці, він сполучається з конденсатором трубою, на якій розташовані паровипускний та урівноважувальний клапани. Під час пуску машини обидва клапани відкриваються і пара витісняє повітря до конденсатора, після чого клапани закриваються і система знаходиться у рівновазі.

З відкриттям нижнього, паровипускного клапана пара з простору під поршнем спрямовується до конденсатора, у якому вона конденсується. Унаслідок утвореного розрідження поршень під тиском пари, яка потрапляє від котла у верхню порожнину циліндра, рухатиметься донизу, здійснюючи корисну роботу, яка за допомогою балансира передаватиметься штанзі насоса. Потім паровипускний клапан закривається і відкривається урівноважувальний. Свіжа пара потрапить під поршень, противага

підніме поршень, після чого відкривається паровипускний клапан і цикл повторюється. За економічністю парові машини Уатта були у два рази кращими, ніж машини Ньюкомена.

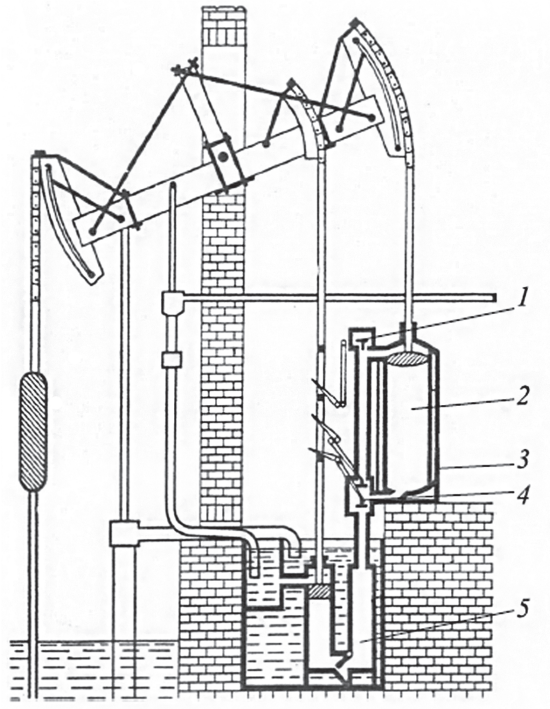


Рис. 2.5. Парова машина Уатта:
1, *4* – зрівноважувальний та паровипускний клапани відповідно;
2 – циліндр із поршнем; *3* – парова оболонка; *5* – конденсатор

Цікавий факт! Уатт та його компаньйон Болтон придумали незвичайний спосіб для залучення замовників зазвичай шахтовласників. Вони надавали машини безкоштовно всім бажаючим, більше того, вони брали на себе всі витрати з монтажу нової машини й демонтажу, раніше установленої машини Ньюкомена. Замість плати кожен власник нової машини протягом 25 років повинен був відраховувати Уатту та Болтону одну третину від вартості вугілля, зекономленого щорічно.

Пропозиція була дуже вигідною, і машини Ньюкомена замінювалися швидко. Так тільки у 1790 році на рудниках Корнуелла 70 машин Ньюкомена були замінені на машини Уатта. Дуже швидко споживачі зрозуміли, що повинні виплачувати дуже значні суми за збережене паливо.

Ефективність парової машини Уатта була доведена до 4,1 %. У той же час вона не була повністю універсальним двигуном: для приводу верстатів необхідний обертальний безперервний рух, який вона не могла

забезпечити, адже в ній тільки один хід циліндра – донизу – під тиском пари був робочим.

У 1782 році Уатт отримав патент на машину, у якій обидва ходи поршня були робочими. Ця машина, яку назвали «*машиною подвійної дії*», була вже безперервно діючим тепловим двигуном. Більш складну задачу Уатту довелося розв'язувати для перетворення прямолінійного зворотно-поступального руху поршня на обертальний рух вала. На жаль, застосувати найпростіше рішення – кривошип – було неможливо, тому що патенти на його застосування були вже отримані. І Уатт створює плоский шарнірний механізм – так званий паралелограм Уатта. За станом на 1794 р. – за чверть століття після винаходу Уатта – в одній тільки Англії налічувалося 1500 парових машин, що замінювали роботу 180 тис. коней.

Цікавий факт! Для вимірювання потужності парових машин Д. Уатт увів поняття «кінська сила», яке існує і зараз як загальноприйнята одиниця вимірювання. Цікавою є версія з приводу її появи. Одну з перших машин Уатта купив пивовар для того, щоб замінити коня, який приводив у дію насос. Намагаючись отримати найпотужніший двигун, хитрий пивовар визначив робочу силу коня як восьмигодинну безупинну роботу до повного знесилення. Розрахунки показали, що кожну секунду кінь піднімав 75 кг накачаної протягом цього часу води на висоту 1 м, що і було прийнято за одну кінську силу.

Парові машини стали виготовляти у Франції та Німеччині, Бельгії та Швеції, де у 1799 р. перша після двигуна Уатта промислова модель була запущена в експлуатацію.

2.3. Розвиток конструкцій суднових парових машин

Протягом усього XIX ст. поршнева парова машина була єдиним типом суднового теплового двигуна. За цей час були досягнуті відносно високі показники як за потужністю, так і за економічністю цих машин, вони були надійними у роботі й мали високу маневреність.

Таких властивостей парові поршневі машини досягли завдяки постійному удосконаленню їх загальної будови, використанню науково-технічних досягнень у конструкції та теплових циклах їх дії.

На перших суднах з гребними колесами як рушії застосовувались громіздкі балансирні машини з вертикально розташованими циліндрами, задні кришки яких спирались на днище судна. На рис. 2.6 наведено загальну будову такої машини, побудованої у 30-х рр. XIX ст. Висота машини досягала 10 м, довжина балансира – 5,5 м.

Створення машин з низько розташованим балансиром дозволило зробити їх більш компактними та підвищити остійність судна. Наступним прогресивним кроком вперед у розвитку конструкції суднової парової машини стала відмова від балансира.

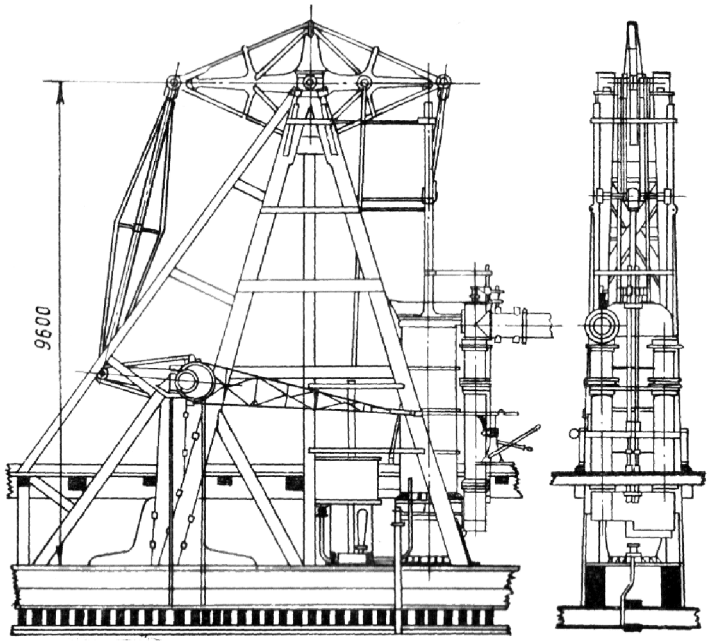


Рис. 2.6. Суднова балансирна парова машина

Загальний вигляд першої безбалансирної суднової парової машини потужністю 240 к. с. наведений на рис. 2.7. У паровому циліндрі *1* рухається поршень з двома штоками, які проходять через ущільнення *5* у кришці циліндра *4*. Поперечина *6* була шарнірно зв'язана з короткою тягою, нижній кінець якої рухався за дугою, що визначалась довжиною важеля, який передавав рух конденсатно-повітряному насосу. До цього кінця було приєднано шатун, що передавав рух кривошипу, який обертав головний вал, пов'язаний із гребними колесами. Машина мала конденсатор і теплий ящик, з якого вода подавалася живильним насосом до парового котла.

Перші суднові парові машини виконувались одноциліндровими, що потребувало під час пуску і реверсу провертати машину для установлення її в положення, зручне для пуску. Одноциліндрові машини відрізнялись значною нерівномірністю обертання. Застосування маховика для забезпечення стабільності обертання в суднових умовах було неможливим, тому що його наявність ускладнила б зміну напряму обертання та

значно підвищила вагу установки. Це привело до створення здвоєних машин з двома однаковими циліндрами.

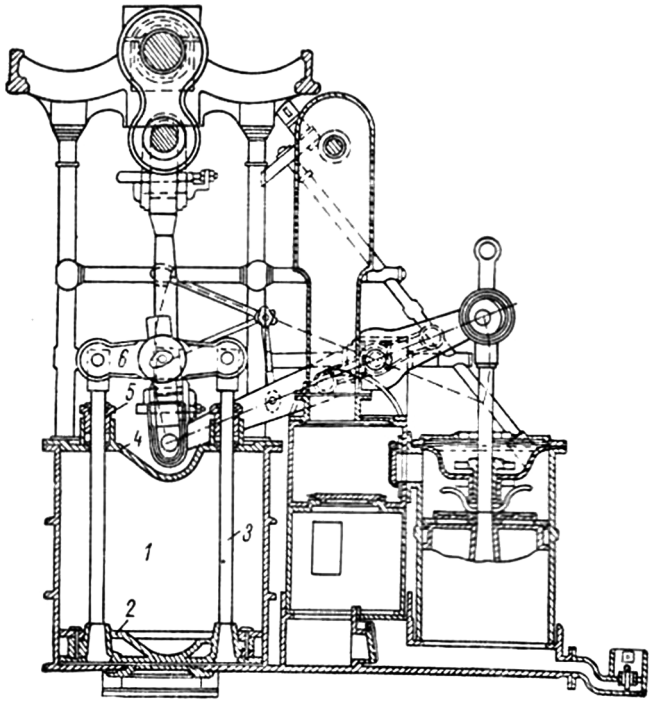


Рис. 2.7. Безбалансирна суднова парова машина

Саме у 1781 р. англієць Джонатан Горнблоуер запропонував виконувати розширення пари у двох послідовно з'єднаних циліндрах, що забезпечує більш повне розширення пари й підвищує ефективність роботи парової машин.

Пропозиція Д. Горнблоуера була реалізована у 1804 р. англійцем Артуром Вульфом. Він побудував двоциліндрову парову машину, у якій глибоке розширення пари завершувалось у другому циліндрі більшого діаметра.

Парова машина з розширенням пари у двох послідовно розташованих циліндрах отримала назву «*компаунд-машина*», вона виготовлялась як з горизонтальним, так і з вертикальним розташуванням циліндрів.

Оригінальним рішенням, спрямованим на зменшення габаритів суднових парових машин стало створення машин з хиткими циліндрами (рис. 2.8). Циліндри такої машини хитаються на порожнистих напівпідвісах (цапфах), які використовують для підведення та відведення пари. Штоки поршнів безпосередньо з'єднаних з шийками кривошипів

колінчастого вала. Потужність машини 20 к. с. за частоти обертання 32 хв$^{-1}$. Діаметр циліндрів 508 мм, хід поршнів 610 мм. Тиск пари був низьким та складав 0,25 МПа.

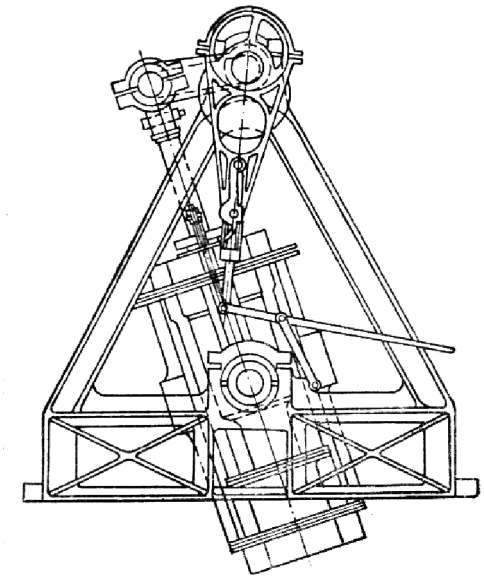


Рис. 2.8. Парова машина з хиткими циліндрами

Але такий проєкт не отримав широкого розповсюдження через те, що за високих параметрів пари було складно забезпечити щільність у місцях підводу пари до циліндра. Серйозні проблеми викликало і змащення гарячих цапф циліндрів.

Найбільш зручними для колісних суден були нахилені машини, які не потребували високого фундаменту, завдяки чому забезпечувалось низьке розташування центра маси машини.

Для підвищення економічності паросилових установок та зменшення їх розмірів та маси вже в першій половині XIX ст. стали застосовувати пару більш високого тиску та збільшувати ступінь її розширення. Спочатку започаткували машини двократного розширення, потім трикратного, а іноді й чотирикратного.

На рис. 2.9 наведена нахилена машина двократного розширення, побудована в 1847 р., побудована для потужного буксирного пароплава, яка працювала на парі тиском 0,3–0,4 МПа. Циліндр високого тиску (ЦВТ) та циліндр низького тиску (ЦНТ) розташовані з різних боків головного вала. Завдяки цьому ширина машини зменшилась, але її довжина значно збільшилась. Циліндр високого тиску (зліва) має діаметр 787 мм, а ЦНТ

(справа) – 1524 мм при ході поршня 2130 мм. Частота обертання складала 30 хв$^{-1}$, потужність – 500 к. с.

У зв'язку з тим, що з 40-х рр. XIX ст. було розпочате широке застосування гребних гвинтів. Стали створюватися спеціальні конструкції парових машин для гвинтових суден. На перших гвинтових пароплавах застосовувались горизонтальні парові машини.

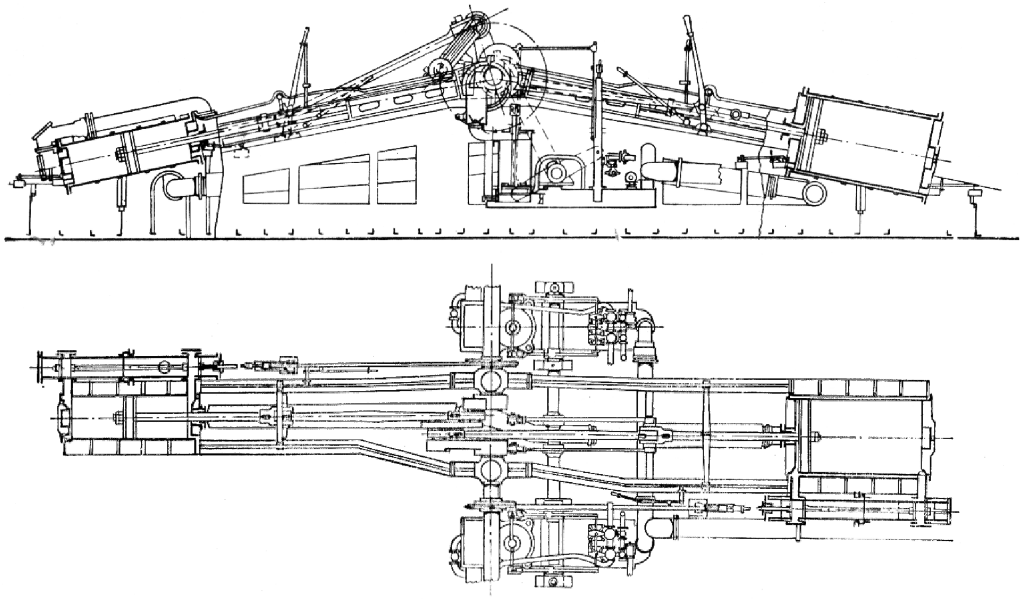


Рис. 2.9. Нахилена машина двократного розширення

Загальна будова однієї з перших горизонтальних машин 1845 р. для гвинтового судна наведена на рис. 2.10. Ця машина потужністю 600 к. с. мала чотири циліндра діаметром по 1320 мм кожний при ході поршня 90 мм. Частота обертання машини складала 60 хв$^{-1}$. Шатуни кожних двох циліндрів, розташованих один проти другого, працювали на один загальний кривошип колінчастого вала. Відпрацьована пара з кожних двох поряд розташованих циліндрів потрапляє до загального конденсатора, що обслуговувався конденсатно-повітряними насосами, які були розташовані з нахилом та приводились до дії від окремого кривошипа колінчастого вала.

Горизонтальні парові машини широко застосовувались на суднах військових флотів світа, але наприкінці 70-х рр. XIX ст. із зростанням потужності машин до 3000 к. с. та відповідним збільшенням їх розмірів і складнощами їх розміщення у корпусі гвинтових суден, суднобудівники вимушені були перейти до вертикальних машин, які займали меншу площу, ніж горизонтальні.

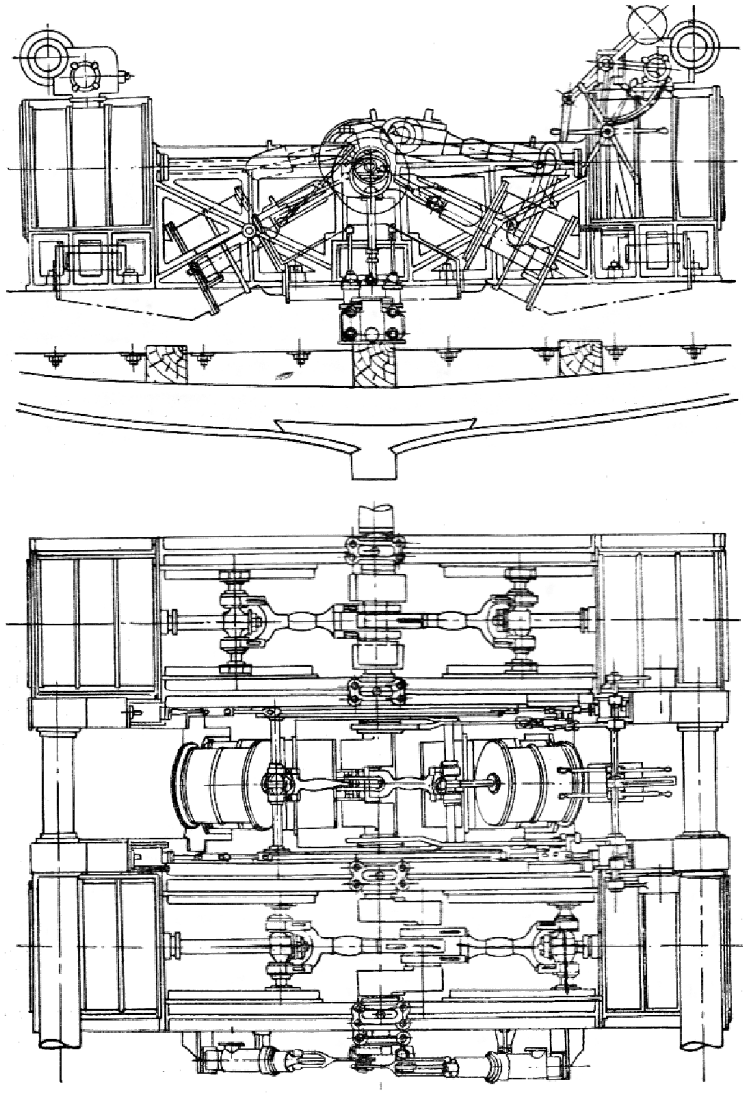


Рис. 2.10. Горизонтальна машина для гвинтового судна

У 70–80-х рр. XIX ст. вертикальна машина двократного розширення стала основним типом суднового двигуна для гвинтових пароплавів (рис. 2.11).

Поруч з машиною розташовували поверхневий конденсатор і конденсатно-повітряний насос. Іноді конденсатор розташовувався у порожнинній станині машини. Вважаючи на те, що на кінець наведеного вище періоду потужність окремих машин досягла 5000 к. с., машини двократного розширення будували й трициліндровими, застосовуючи замість одного циліндра низького тиску два циліндра менших розмірів.

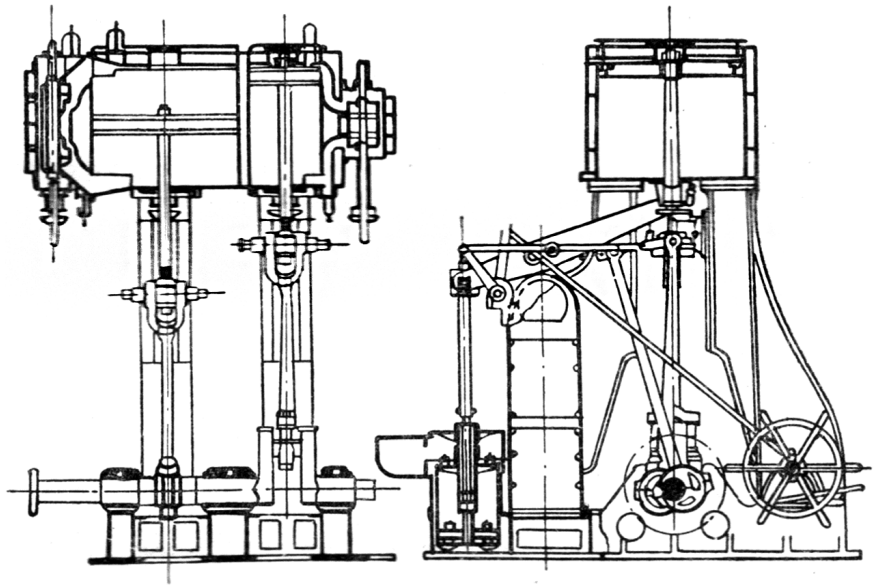


Рис. 2.11. Вертикальна машина двократного розширення

Перша суднова машина трикратного розширення, яка працювала за тиску пари 0,98 МПа, була побудована у 1887 р. На броненосці «Сіноп» Чорноморського флоту були встановлені дві машини трикратного розширення, загальною потужністю 12 000 к. с. На той час це була найпотужніша у світі суднова силова установка. На початок 90-х рр. машини трикратного розширення працювали за тиску пари 1,2–1,3 МПа. Проведені теплотехнічні дослідження показали, що вони використовували 0,07 кг кам'яного вугілля на 1 к. с., що було на той час серйозним досягненням: на корисну роботу витрачалось 12 % теплоти, що виділилась під час згоряння використаного палива. Це дійсно серйозний прогрес, якщо згадати, що у перших парових машинах цей показник (а це, власне, коефіцієнт корисної дії) складав усього 4 %.

Наприкінці XIX століття була створена типова конструкція вертикальної суднової машини трикратного розширення (рис. 2.12). Машина має три послідовно розташовані циліндри: високого, середнього та низького тиску. Пароросподіл у циліндрах високого і середнього тиску здійснюється циліндричними золотниками, а у циліндрі низького тиску – коробчастим золотником. Перепуск пари з циліндра до іншого відбувається через ресивери. Кривошипи (мотилі) колінчастого вала розташовані під кутом 120°. Реверс машини здійснюється за допомогою кулісного механізму Стефенсона, у потужних машинах переведення кулісного механізму здійснюється із застосуванням допоміжних парових

приладів. Привід до дії конденсатно-повітряного насосу відбувається за допомогою балансира від повзуна циліндра високого тиску.

Найбільш потужними судновими паровими машинами, за весь час їх існування, були дві машини потужністю по 17 500 к. с., побудовані у 1900 р. для пасажирського лайнера. У цих машинах було по шість циліндрів: два циліндри високого тиску (діаметром 930 мм), розташовані над двома циліндрами низького тиску (діаметром по 2700 мм) та два циліндри середнього тиску (діаметром 1870 мм та 2640 мм), розташовані між циліндрами низького тиску. Хід поршнів складав 1850 мм. Машина працювала на насиченій парі за тиску 1,6 МПа. Діаметр шийок колінчастого вала складав 635 мм, а його вага перевищувала 100 т.

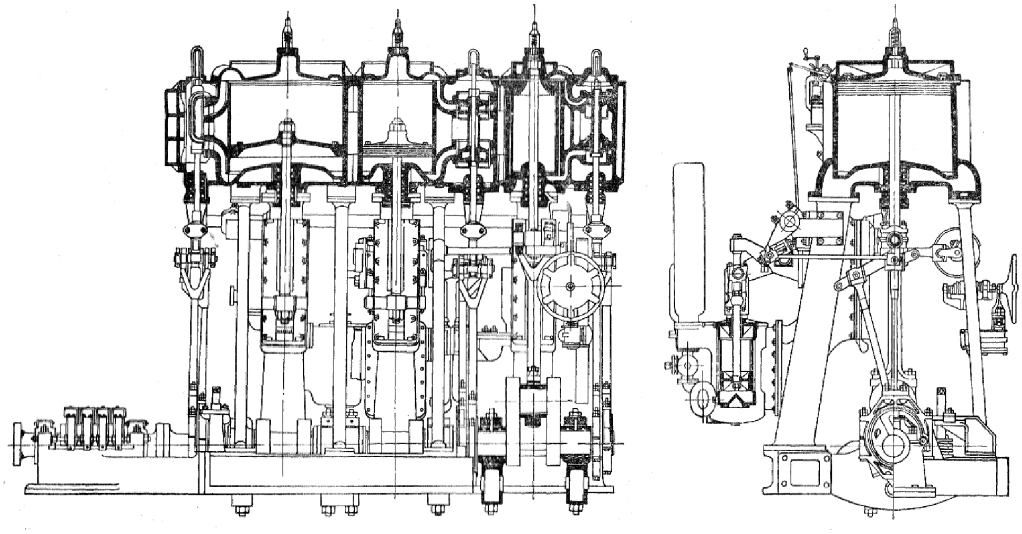


Рис. 2.12. Вертикальна машина трикратного розширення

Незважаючи на те, що на початку XX століття на суднах як головні почали застосовуватись парові турбіни і двигуни внутрішнього згоряння. Парові поршневі машини продовжували застосовуватись в установках малої та середньої потужності. Причиною цього були простота будови, надійність у роботі, легкість обслуговування та високі маневрені якості, характерні для парових поршневих машин. Використання принципу багатократного розширення дозволило суттєво підвищити економічність парових машин, головним чином за рахунок збільшення загального ступеня розширення. Однак багатократне розширення практично не призвело до зниження теплових втрат через теплообмін між парою та стінками циліндра.

Суттєвого зниження таких втрат могло бути досягнуте лише в разі застосування перегрітої пари. Дослідження, проведені на стаціонарних

теплових машинах, показали, що економія палива від застосування перегрітої пари складає не менше 15 % порівняно із застосуванням насиченої пари. Поряд із цим, використання перегрітої пари обмежувалось через те, що для змащення циліндрів застосовували тваринні й рослинні масла, які не витримували впливу високих температур.

У першому десятилітті XX століття почали з'явились мінеральні масла, а у 1914 році в Англії почалось широке застосування перегрітої пари в суднових парових машинах. Використання перегрітої пари привело до перегляду питання про доцільність багатократного розширення пари, як способу зниження втрат від початкової конденсації, усе стало визначатись можливістю здійснення застосованих для конкретної машини перепаду тисків і ступеня розширення. Через це у нових машинах стали обмежуватися двократним розширенням пари.

У першому п'ятнадцятилітті XX століття поширення набули здвоєнні машини, які складались з двох машин двократного розширення, які працювали на один вал.

На рис. 2.13 наведений загальний вигляд машини такого типу системи Хрістіансен та Мейер, яка є здвоєною безресиверною золотниковою машиною з напівпрямоточним випуском із циліндра низького тиску.

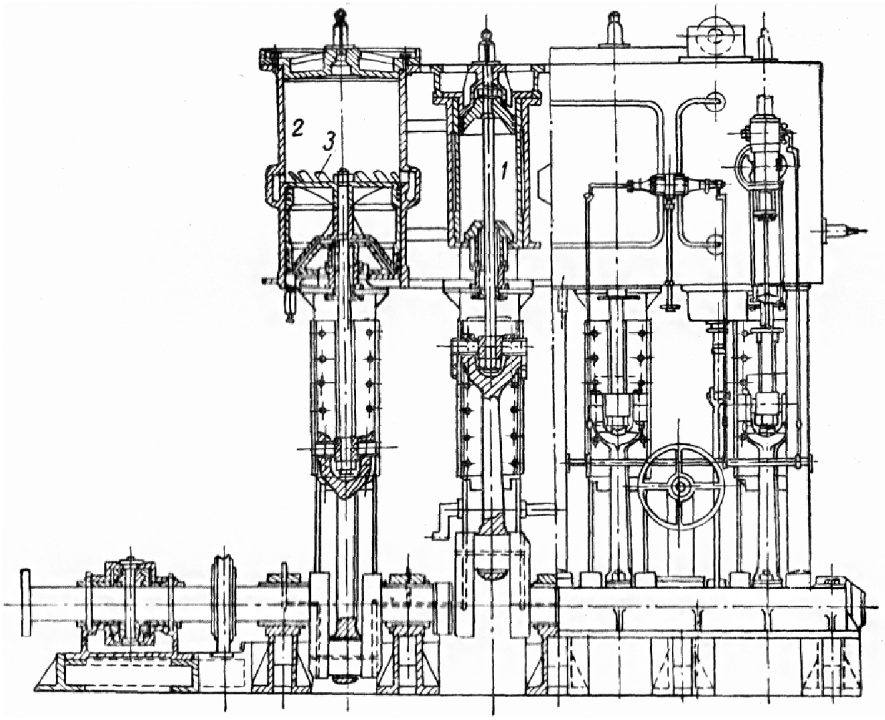


Рис. 2.13. Здвоєна парова машина двократного розширення

Кожен з однакових блоків такої машини складається з ЦВТ 1 звичайної будови та ЦВТ 2, у середній частині якого виконані паровипускні вікна 3, що відкриваються кромкою поршня. У зв'язку із цим, що ці вікна мають більшу площу перерізу порівняно із золотниковими вікнами, поршні ЦНТ мають більшу висоту.

Рух пари у ЦНТ відбувається за принципом «прямого току» від кришок циліндрів, біля яких розташовані вікна для впуску пари, до середини циліндра. Машина є безресиверною, пара в період випуску з верхньої або нижньої порожнини ЦВТ безпосередньо перетікає до однойменної порожнини ЦНТ, тому кривошипи цих циліндрів кожного блока розташовані під кутом 180° один до одного, кривошипи двох сусідніх блоків розташовані під кутом 90°. Це забезпечує високі маневрені якості машини, рівномірне обертання вала й добре врівноваження сил інерції рухомих деталей.

Незважаючи на суттєве збільшення чисельності паротурбінних та дизельних суден у роки, що передували Другій світовій війні, випуск парових машин у ці роки та в період війни був на високому рівні.

2.4. Перші судна з тепловими двигунами

Французьким офіцером Клодом де Жоффруа д'Аббаном після багатьох невдалих спроб нарешті у 1783 році було побудовано та публічно випробувано поблизу Ліона парове судно «Pyroskaf». Це судно приводилося у рух гребними колесами, які обертала парова машина, воно могло більше години рухатися проти течії. На жаль, після вдалого випробування Жоффруа закінчив свою винахідницьку діяльність.

Серйозні роботи з побудови пароплавів проводилися в Америці. У 1784 р. винахідник Д. Рамсі запропонував свій проєкт пристосування парової машини Уатта до руху суден. Необхідно згадати, що на своєму першому судні Рамсі застосував поршневий насос, який приводився у дію вручну. Забортна вода всмоктувалася у носовій частині судна і відводилася у кормі. Під час тривалих випробувань з'ясувалося, що мускульної сили для створення відповідного реактивного упору недостатньо.

У новому проєкті з паровою машиною Рамсі також застосував водометний рушій оригінальної конструкції. Його основу складала пароатмосферна машина з плаваючим поршнем. Приймальний патрубок забортної води розташований посередині циліндра, а нагнітальний – у нижній кришці циліндра. Нижня частина циліндра заповнена водою, при бездіяльності поршень знаходиться у верхньому положенні. Під час впуску пари у парову частину поршень починає рухатися і, перекриваючи

приймальний отвір, виштовхує воду із циліндра через нагнітальний патрубок, створюючи упор, який рухає судно. Унаслідок конденсації пари над поршнем створюється розрідження, він піднімається, через приймальний клапан простір під поршнем заповнюється водою, після чого робочий цикл повторюється.

Винахідник був розчарований результатами випробувань: енергетична установка споживала значну кількість палива, а швидкість судна не перевищувала трьох вузлів. Після цього проєкту Рамсі емігрував до Англії, де у 1798 р. побудував водометний катер «Columbia Maid», але провести випробування йому завадила смерть.

Наприкінці XIX століття винахідники робили спробу застосувати у конструкції парових суден як рушії весла, безкінечні ланцюги з лопатями, гребні колеса.

Американський годинникар Джон Фітч у 1787–1788 рр. побудував три парових судна, кожне з яких було облаштоване своїм оригінальним рушієм. На першому було застосовано безкінечний ланцюг лопатей, який нагадував гусеничний ланцюг трактора. Лопаті ламалися, судно втрачало хід. Згодом Д. Фітч будує бот «Perseverance» довжиною біля 18 м з паровою машиною, що приводить у дію шість пар шарнірно з'єднаних весел, які рухалися подібно до весел каное (рис. 2.14). Але весла чіплялися за плаваючі колоди та обмілини і часто ламалися. Поряд із цим на підйом та розворот весел витрачалася значна потужність, що часто перевищувала можливості встановленої парової машини.

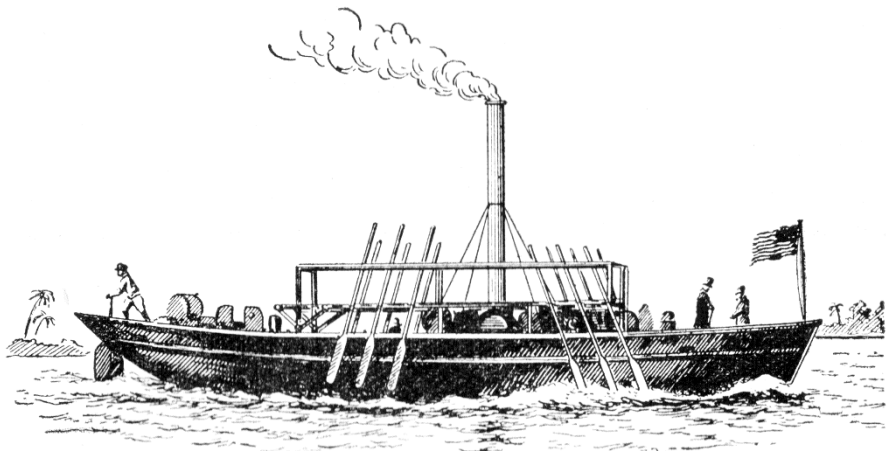


Рис. 2.14. Пароплав Джона Фітча з бортовими веслами

На кормі бота «Experiment» розташовувалися три весла, які повинні були, як лапи водоплавної птиці, створювати упор для руху судна. Після

цілої серії невдалих спроб створення парових суден з оригінальними рушіями Д. Фітч намагається побудувати судно з гребним гвинтом (ГГ), але брак коштів не дозволив йому довести справу до кінця.

Наступна спроба застосувати парову машину Уатта для суднових цілей була здійснена англійцями П. Міллером та У. Саймінгтоном. Вони розмістили гребні колеса з внутрішньої частини корпусу човна, обертання вала машини передавалося колесам за допомогою ланцюгової передачі. Випробування, які пройшли у 1789 році, були вдалими, і винахідники побудували більш велике судно з паровою машиною потужністю 12 к. с. На жаль, використанню цього судна заважали часті поломки гребних коліс.

У кінці XVIII і майже до середині XIX століття на суднах як рушії використовувались виключно гребні колеса.

Принцип дії гребного колеса такий же, як і весла: лопаті – це як би група весел, які послідовно рухаються у бік, протилежний напряму руху судна, і відкидають масу води, кількість якої залежить від гідравлічного перерізу рушія. При вході і виході з води лопаті гребного колеса створюють упор за рахунок підйомної сили, тому що вони рухаються під кутом до напряму руху судна.

Перші гребні колеса мали нерухомо закріплені плиці. Такі колеса називають колесами з радіальними лопатями. Нерухомі плиці при вході у воду ударяються об поверхню води, а при виході із води піднімають із собою певну кількість води. На удар та підйом води витрачається частина енергії. Щоб уникнути сильних ударів плиць при вході їх у воду, діаметр гребного колеса потрібно робити дуже великим, що зі свого боку вимагало застосування парових машин з малою частотою обертання. Але ж, чим менша частота обертання машини, тим більш її маса та габарити. Найбільший діаметр суднового гребного колеса пароплава «Greit Eastern» складав 17 м, маса його становила 185 т.

Найбільш радикальним способом зменшення удару плиць та попередження підйому ними води під час виходу на поверхню стало застосування поворотних плиць.

У 1829 р. винахідник Морган розробив конструкцію, що стала класичною: кожна плиця може повертатись на ободі колеса навкруги своєї осі, а її затилля має жорстко встановлений стрижень, шарнірно зв'язаний за допомогою тяг з ободом невеликого колеса-бугеля (рис. 2.15). Бугель розташований ексцентрично відносно осі обертання гребного колеса. Одна із тяг – «поводир», жорстко пов'язана з бугелем. Під час обертання гребного колеса бугель захоплюється до обертання «поводирем» та примушує кожну плицю за одне обертання гребного колеса обертатися на певний кут навкруги своєї осі.

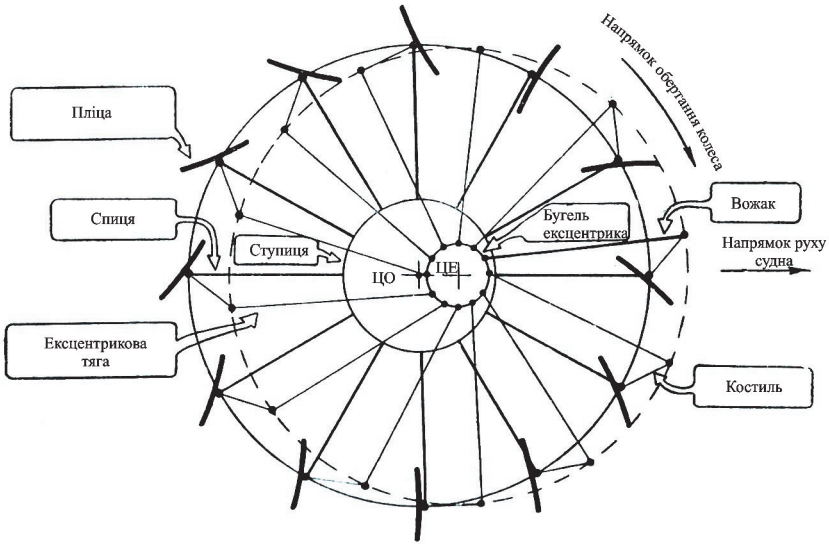


Рис. 2.15. Схема гребного колеса Моргана:
ЦО – центр обертання колеса; ЦЕ – центр ексцентрика

На виході з води плиця, розташована під кутом, буде менше захоплювати та піднімати воду. ККД колеса із рухомими плицями вищий, ніж у колеса з нерухомими плицями десь на 10 %.

Загальний вигляд найбільш поширених гребних коліс: одноопорного із зовнішнім ободом конструкції Ранкіна та двоопорного конструкції Струдлея, без зовнішнього обода наведені на рис. 2.16.

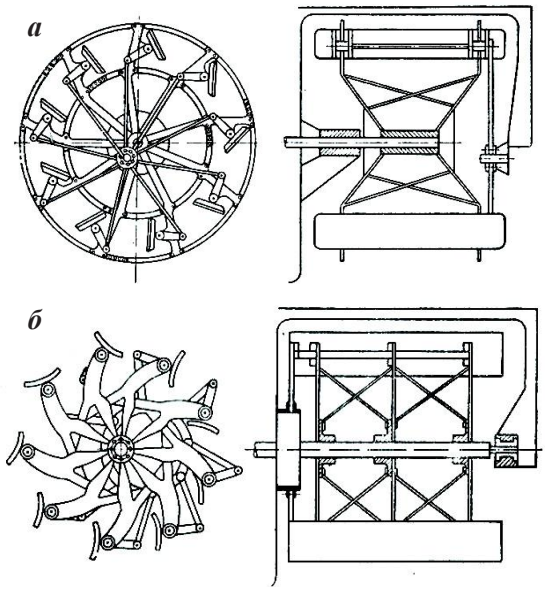


Рис. 2.16. Сучасні конструкції гребних коліс:
а – одноопорне із зовнішнім ободом конструкції Ранкіна;
б – двоопорне без зовнішнього ободу конструкції Струдлея

Гребні колеса розташовували у різних частинах корпуса судна: по бортам судна, у кормі або по бортам у кормі (рис. 2.17).

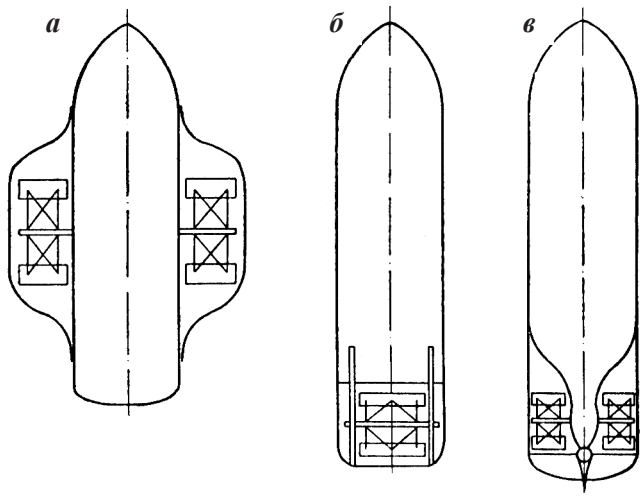


Рис. 2.17. Схеми розташування гребних коліс відносно корпусу судна:
а – бортові колеса; ***б*** – кормове колесо;
в – колеса, що встановлюються по бортам у кормі

Важливим кроком вперед було застосування У. Саймінгтоном, який у 1802 р. побудував у Англії буксирний катер «Sharlotte Dundas», парової машини Уатта потужністю 10 к. с., що за допомогою кривошипа обертала гребне колесо, розташоване у кормі (рис. 2.18). Застосування у складі цієї енергетичної установки прямої передачі від штока поршня до вала машини дозволило відмовитися від громіздкого балансира.

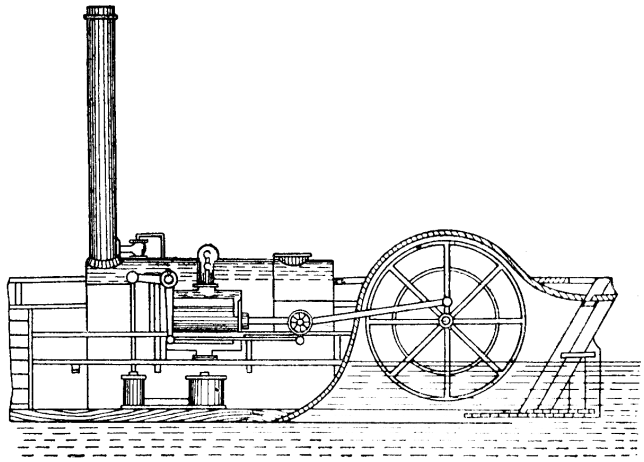


Рис. 2.18. Розміщення гребного колеса в кормі парового буксира «Sharlotte Dundas»

Випробування продемонстрували здатність побудованого судна за сильного зустрічного вітру відбуксирувати зі швидкістю 3 вузли дві баржі на відстань 18 миль. У той же час побоювання, пов'язані з можливістю розмивання берегів каналу хвилями від руху судна, призвели до заборони його використання.

Продовжувачем ідей Д. Рамсі став Роберт Фултон, який народився у США у сім'ї ірландського емігранта і протягом декількох років співпрацював з відомим винахідником, з яким він зустрівся в Англії.

Піддавши критичному аналізу креслення і розрахунки, що залишилися після Д. Рамсі, Р. Фултон провів дослідження з метою визначення оптимальних характеристик судна для зниження опору, а також установив особливості взаємодії корпусу з різними рушіями. Такі дії Р. Фултона повністю відповідали сучасним принципам проєктування суден.

Пропозиції Фултона щодо побудови запропонованого ним судна не були підтримані в Англії, і він вимушений був у 1796 році переїхати до Франції, де зустрівся з американським послом Р. Лівінгстоном, який став його партнером та меценатом. Ця зустріч привела до того, що вже у 1802 р. перший пароплав Фултона у присутності численних глядачів здійснив пробне плавання річкою Сена. Протягом трьох годин судно йшло проти течії зі швидкістю 3 вузли. Не отримавши підтримки французького уряду, Фултон у 1806 р. повернувся на батьківщину. До США він привіз виготовлену в Англії на заводі Болтона парову машину потужністю 20 к. с. і негайно приступив до побудови нового пароплава.

Уже через рік, 17 серпня 1807 року, судно «North Rivers Steamboat of Clermont», відоме як «Clermont», водотоннажністю біля 80 т, з п'ятиметровими гребними колесами, які оберталися із частотою 20 $хв^{-1}$, було спущено на воду на річці Гудзон. Через декілька днів у газетах з'явилося повідомлення про відкриття регулярного пароплавного сполучення між Нью-Йорком та Олбані, відстань між якими становила 150 миль. Ця відстань була пройдена за 32 год, тобто зі швидкістю біля 5 вузлів. Довжина дерев'яного судна була 30,5 м, ширина – 9,8 м. Бортові гребні колеса приводилися у дію паровим одноциліндровим двигуном потужністю біля 15 кВт. Діаметр циліндра двигуна складала 610 мм, хід поршня – 1220 мм.

Загальний вигляд енергетичної установки пароплава «Clermont» наведено на рис. 2.20. Саме Фултона, який не тільки застосував парову машину, але й створив придатне для повсякденної експлуатації судно, вважають творцем першого пароплава.

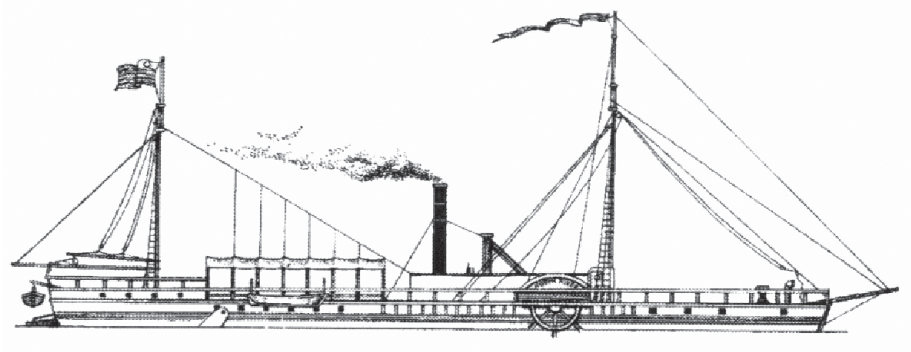


Рис. 2.19. Пароплав Р. Фултона «Clermont»

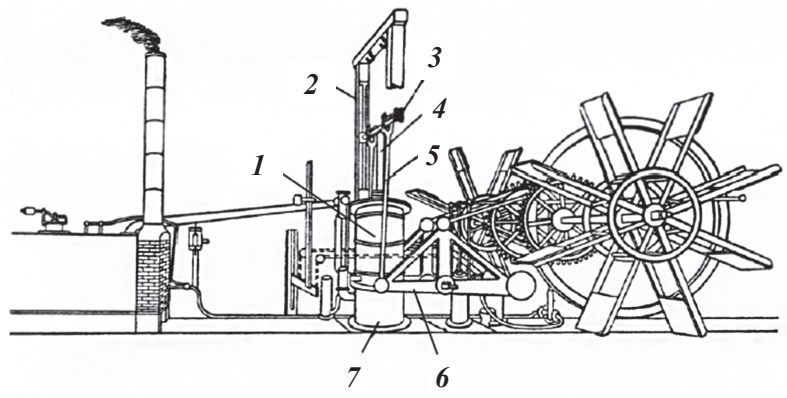


Рис. 2.20. Парова машина пароплава «Clermont»:
1 – поршень; *2* – напрямна; *3* – крейцкопф; *4* – шток; *5* – шатун;
6 – балансир; *7* – циліндр

Протягом 1811 р. Фултон побудував чотири нових пароплави, призначені для плавання Гудзоном, незабаром пароплави з'явилися на річках Міссісіпі та Огайо. Останнім проєктом винахідника став перший в історії паровий корабель – пароплав-фрегат «Demologos» водотоннажністю біля 2000 т, який пізніше було перейменовано на «Fulton-1». На цьому кораблі поряд з паровою машиною було встановлено характерне для цього класу суден вітрильне оснащення. Корабель виконано двокорпусним, в одному корпусі розташований котел, в іншому – парова машина. Розміщення гребного колеса між корпусами захищало його від бойових та навігаційних пошкоджень. На випробуваннях у 1815 р. «Demologos» досяг швидкості 5 вузлів. Усі судна, побудовані Фултоном, стали власністю першої у США вантажопасажирської компанії.

У 1812 році Генрі Белл (Англія) побудував пароплав «Comet», який перевозив пасажирів річкою Клайд.

Усі пароходи того часу плавали річками або внутрішніми водоймами. Першим пароплавом, який перетнув Атлантику, став американський пароплав «Savannah», який у 1819 р. здійснив трансатлантичний рейс за маршрутом Нью-Йорк–Ліверпуль–Петербург (рис. 2.21).

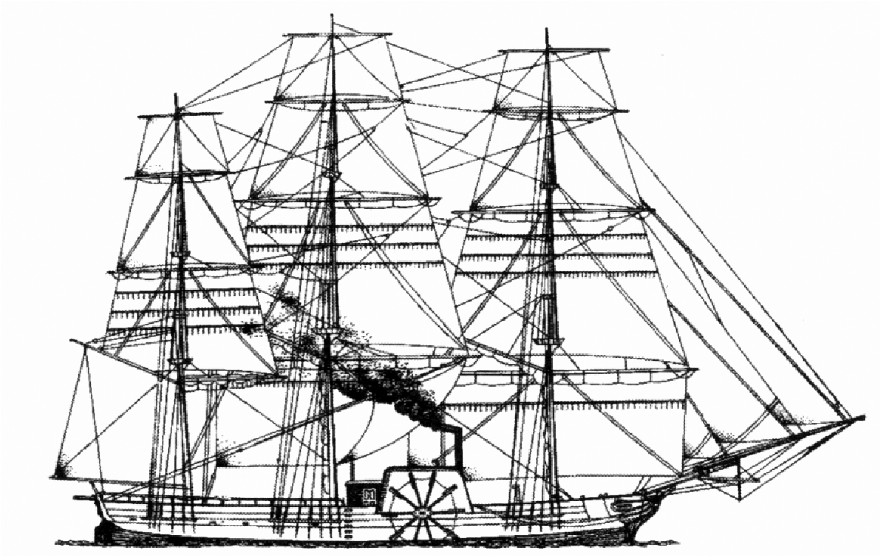


Рис. 2.21. Пароплав «Savannah»

Це було трищоглове вітрильно-парове судно довжиною 30,5 м і шириною 7,9 м, водотоннажністю 350 т. Гребні колеса могли розбиратися та перевозитися на палубі. Запас палива забезпечував роботу парової машини протягом 90 год, причому більшу частину шляху судно пройшло під вітрилами. Нахилена одноциліндрова парова машина мала діаметр циліндра 1035 мм, хід поршня 1530 мм, частота обертання вихідного вала – 16 хв$^{-1}$. У свій перший рейс «Savannah» вийшла з американського порту 22 травня 1819 р. і через 29 днів прийшла до Ірландського порту Кінсейл, причому останні 80 год судно йшло під паровою машиною. З Ірландії шлях судна лежав до Швеції, а потім до Петербурга. Під час повернення до Америки «Savannah» використовували виключно під вітрилами.

Перший перехід через Атлантику з Європи до Америки без допомоги вітрил здійснив у 1827 р. дерев'яний колісний пароплав «Curasao» водотоннажністю 440 т з паровою машиною потужністю 100 к. с. Коли у 1838 р. під паровою машиною пересік Атлантику англійський пароплав «Sirius» (рис. 2.22), у Нью-Йорку йому влаштували урочисту зустріч. Проте урочистості були захмарені об'єктивними обставинами.

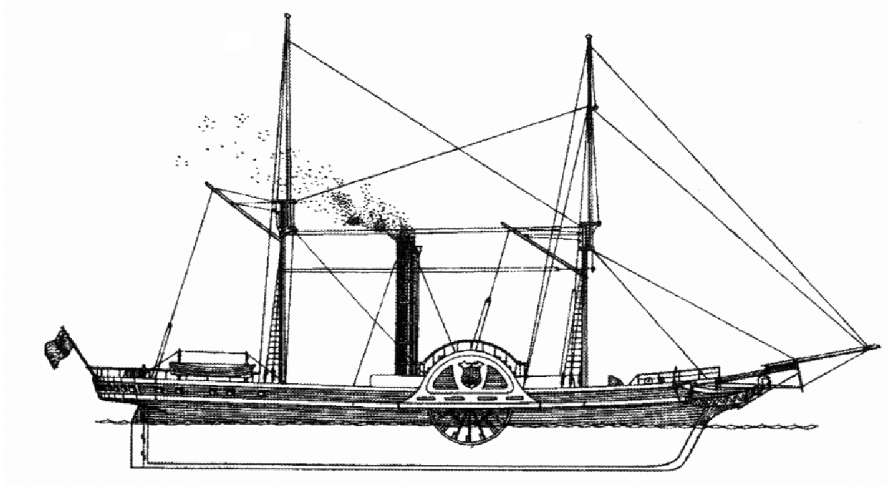


Рис. 2.22. Пароплав «Sirius»

До повного лідирування парового двигуна у суднобудуванні багато чого не вистачало.

По-перше, швидкість парових суден була менша ніж у вітрильних: якщо «Sirius» на перехід через Атлантику витратив більше 18 діб, то вітрильні судна долали цю від стань за 11…13 діб.

По-друге, дальність плавання вітрильних суден обмежувалася тільки запасами продовольства та питної води, тоді як пароплави витрачали величезну кількість палива. У топках «Sirius», наприклад, щогодинно спалювалося біля однієї тонни вугілля, за перехід це становило 440 т. До того ж вантажопідйомність судна становила всього 700 т.

По-третє, багато незручностей завдавали гребні колеса, які під час хитавиці повністю або частково виходили з води, а потім знову занурювалися у воду, що викликало значні напруження в елементах конструкції судна, аж до аварійних. Ці недоліки стримували застосування парових машин на військовому флоті.

Перші пароплави були виключно колісними. Для колісного рушія характерна наявність багатьох недоліків, унаслідок чого він має дуже низький ККД.

2.5. Від колісних рушіїв до гребних гвинтів

Достойною альтернативою гребному колесу був гребний гвинт (ГГ), тому багато винахідників пропонували свої конструкції. Найбільш вдалими були пропозиції чеха Йосифа Ресселя (патент 1827 р.), англійця

Смітта та шведа Еріксона (патент 1836 р.). Практичне застосування ГГ розпочалося лише у 40-х роках XIX ст. Першим гвинтовим пароплавом стало побудоване в Англії у 1838 р. судно «Archimed» водотоннажністю 237 т з ГГ, яке було спроєктоване О. Сміттом (рис. 2.23).

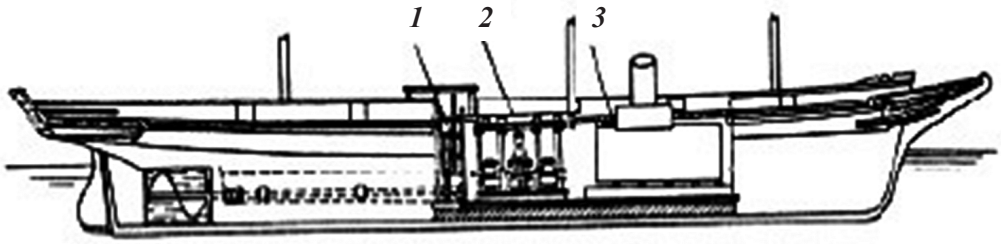


Рис. 2.23. Поздовжній переріз пароплава «Archimed»:
1 – редуктор; *2* – парова машина; *3* – паровий котел

На судні була встановлена малообертова машина, яка застосовувалася для приводу гребних коліс, у зв'язку з чим для підвищення частоти обертання гребного вала, необхідної для ефективного використання ГГ, проєктант був вимушений ввести до складу енергетичної установки мультиплікатор, втрати в якому призводили до зниження потужності, що передавалася гвинту. Наступним кроком на шляху створення пароплавів з ГГ стала побудова у США у 1843 р. шведським кораблебудівником Д. Еріксоном пароплавофрегата «Prinstone» водотоннажністю 950 т. На цьому кораблі було застосовано ГГ оригінальної конструкції, який приводився у дію двома швидкісними паровими машинами сумарною потужністю 400 к. с. із прямою передачею на гвинт. Незважаючи на те, що у 40-х рр. XIX ст. у військовому флоті гребний гвинт витісняє колісний рушій, парова машина продовжує залишатися лише допоміжним до вітрил засобом руху. Це створювало низку проблем. Так під час руху під вітрилами гвинт створював додатковий опір і разом із цим, обертаючись під дією потоку, що набігає, провертав гребний вал і машину. Під час руху під вітрилами гвинт, який шарнірно з'єднувався з гребним валом, піднімався з води, а димова труба, щоб не заважати керуванню вітрилами, опускалася та укладалася у спеціальний жолоб. Більш прогресивним рішенням було застосування гвинтів з поворотними лопатями, які під час руху корабля під вітрилами можна було розвернути вздовж осі гребного вала, знизивши до мінімуму власний опір гвинта. Крім того, такі гвинти надавали змогу регулювання роботи парових машини за рахунок зміни кроку гвинта. Це був прообраз сучасних гвинтів регульованого кроку (ГРК).

Застосування ГГ на суднах привело до появи горизонтальних парових машин, які зручно компонувалися з низько розташованим гребним валом, а також сприяли підвищенню остійності судна, зменшенню маси трюмного баласту. Але у зв'язку з підвищенням потужності парових машин (наприкінці XIX ст. потужність машин доходила до 3000 к. с.) та збільшенням їх розмірів проєктанти були вимушені врешті-решт перейти до вертикальних машин, які займали меншу площу, ніж горизонтальні. Доказом визнання парових суден на середину XIX ст. є указ, що з'явився у Франції у 1857 р., відповідно до якого всі кораблі, не оснащені паровими машинами, виключалися зі списків флоту. У той же час ефективність СЕУ з паровими машинами була дуже низькою, ККД кращих з них на середину XIX ст. не перевищував 7…9 %. Таким чином, з кожної тонни палива на корисну роботу витрачалося лише 70…90 кг, а інша кількість поглиналася втратами.

Значних неприємностей завдавав процес змішування відпрацьованої у машині пари із забортною водою у конденсаторі, у якому пара охолоджувалася. Для сконденсування одного кілограма відпрацьованої пари її необхідно було змішати із 20…25 кг забортної води. Суміш конденсату й забортної води відкачувалася насосом, більша її частина видалялася за борт, інша подавалася живильним насосом до котла, який живився майже тільки забортною водою.

Недоліки конденсаторів змішувального типу були відомі з часів появи перших парових машин, але тільки у середині XIX ст. з'явилися технічні можливості виготовлення надійних трубчастих теплообмінних апаратів. З кінця 60-х рр. на суднах почали застосовувати поверхневі конденсатори, у яких охолоджуюча вода омивала трубки, а пара проходила всередині трубок. Пізніше конструктивна схема конденсаторів зазнала змін і набула сучасного вигляду: пара із зовні омивала трубки, усередині яких прокачувалась забортна вода, охолоджувалася і конденсувалася.

Основним критерієм економічної ефективності кожної енергетичної установки є питома витрата палива, для зниження якої необхідно підвищити теплоту згоряння палива або підвищити її ККД.

Незважаючи на достатньо низку економічну ефективність використання на суднах теплосилових установок з паровими машинами, до початку XX століття було побудовано багато суден з унікальними технічними характеристиками.

Першим пароплавом, побудованим у 1837 році для трансатлантичних рейсів, став «Great Western». Це був колісний пароплав довжиною 71,6 м, обладнаний двома паровими машинами загальною потужністю 180 кВт (рис. 2.24). На рейс із Брістоля до Нью-Йорка судно витратило 15,5 діб, витративши 500 т вугілля.

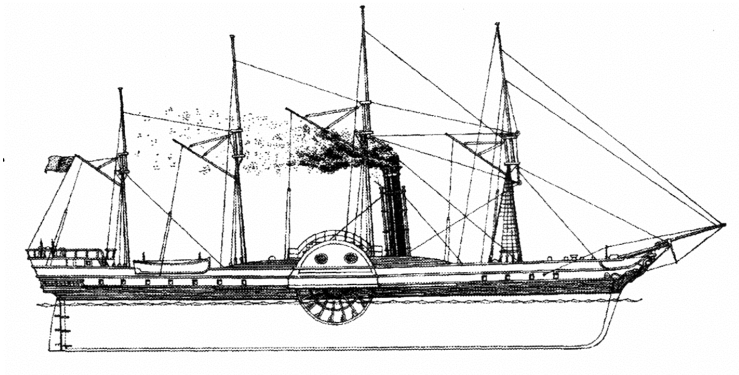


Рис. 2.24. Пароплав «Great Western»

У 1843 році у Англії також спеціально для здійснення трансатлантичних рейсів було побудовано «Great Britain» (рис. 2.25).

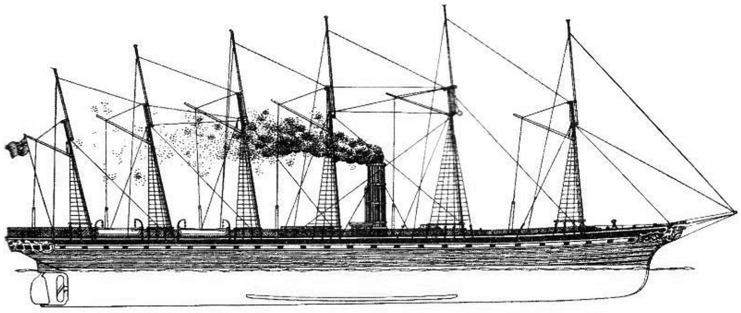


Рис. 2.25. Пароплав «Great Britain»

«Great Britain» – один з найбільших пасажирських пароплавів XIX ст. і одне з перших у світі англійських суден зі сталевим корпусом і гребним гвинтом. Водотоннажність судна 3675 т, довжина 98 м, ширина 15,4 м, осадка 4,9 м. Головним двигуном була найпотужніша на ті часи парова машина у 1500 к. с., гребний гвинт зроблено шестилопатевим, швидкість судна 12 вузлів. Судно перевозило 360 пасажирів, чисельність команди – 130 осіб. З 1843 по 1854 рр. це було найдовше судно у світі.

На судні були встановлені шість щогл для вітрил. За 8 років «Great Britain» здійснило 45 трансатлантичних рейсів. За весь час роботи на цих лініях було перевезено 33 000 пасажирів.

Цікава інформація про продовольчі запаси. У 1861 році для рейсу з Ліверпуля до Мельбурна (64 доби з 544 пасажирами на борту – 1 корова, 36 овець, 96 кіз, 1114 голів свійської птиці – курей, качок, гусей, індиків).

Суднобудівниками Англії був побудований та спущений на воду в 1858 р. гігантський для свого часу пароплав XIX ст. лайнер «Great Eastern» водотоннажністю 32,7 тис. т, розрахований на перевезення без проміжного бункерування 4 тис. пасажирів з Англії до Австралії (рис. 2.26). Судновий запас вугілля складав 12 000 т, щодобово у топках спалювалося 320 т вугілля. Довжина судна – 207 м, ширина – 25 м. Енергетичну установку судна складали дві парові машини: одна потужністю 3410 к. с. (для приводу двох бортових гребних коліс діаметром по 16,8 м і масою 185 т), друга – 4890 к. с. (для приводу гребного гвинта діаметром 7,2 м, масою 36 т). Десять вогнетрубних котлів з вугільним опаленням за тиску пари 0,26 МПа забезпечували роботу парових машин. На п'ятитрубному судні було передбачене вітрильне оснащення, розташоване на шістьох щоглах висотою 60 м. Швидкість судна – 14 вузлів.

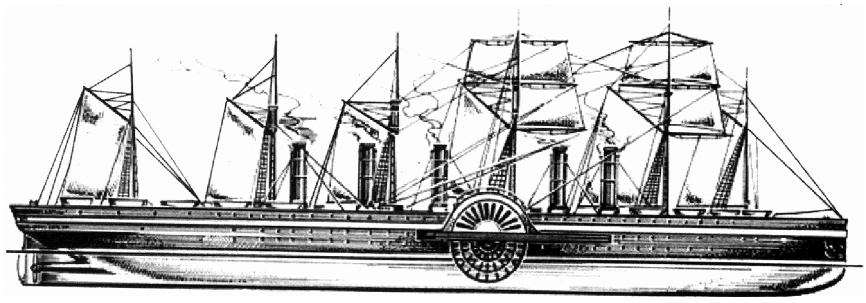


Рис. 2.26. Пароплав «Great Eastern»

Парові двигуни окремих суден мали гігантські розміри. Дві парові машини довжиною 22 м та висотою 12,8 м установлені на лайнері «Kaizer Wilhelm III» водотоннажністю 26 500 т, який був побудований у 1903 році на верфі «Вулкан» у Штеттіні. Колінчастий вал парової машини мав вагу 100 т. Парові машини потужністю по 22 000 к. с. забезпечували швидкість ходу до 23,5 вузлів.

Парові машини у складі суднових енергетичних установок відрізнялись завидною довговічністю. Сорок років експлуатувались дві вертикальні парові машини з чотирикратним розширенням пари, установлені на лайнері «Kronprinz Wilhelm» водотоннажністю 15 147 т, побудованому у 1901 р. на верфі «Вулкан» у Штеттіні. Парові машини потужністю по 17 500 к. с. забезпечили лайнеру швидкість ходу до 23,3 вузлів. Діаметр циліндра низького тиску складав 2590 мм, хід поршня – 1955 мм. Судно пішло на злам у 1940 р.

До речі, на ранньому етапі створення підводних човнів у складі їх енергетичних установок застосовувались парові машини.

У 1892 році на воду озера Ері було спущено підводний човен водотоннажністю 200 т, побудований Джорджем Бейкером (рис. 2.27).

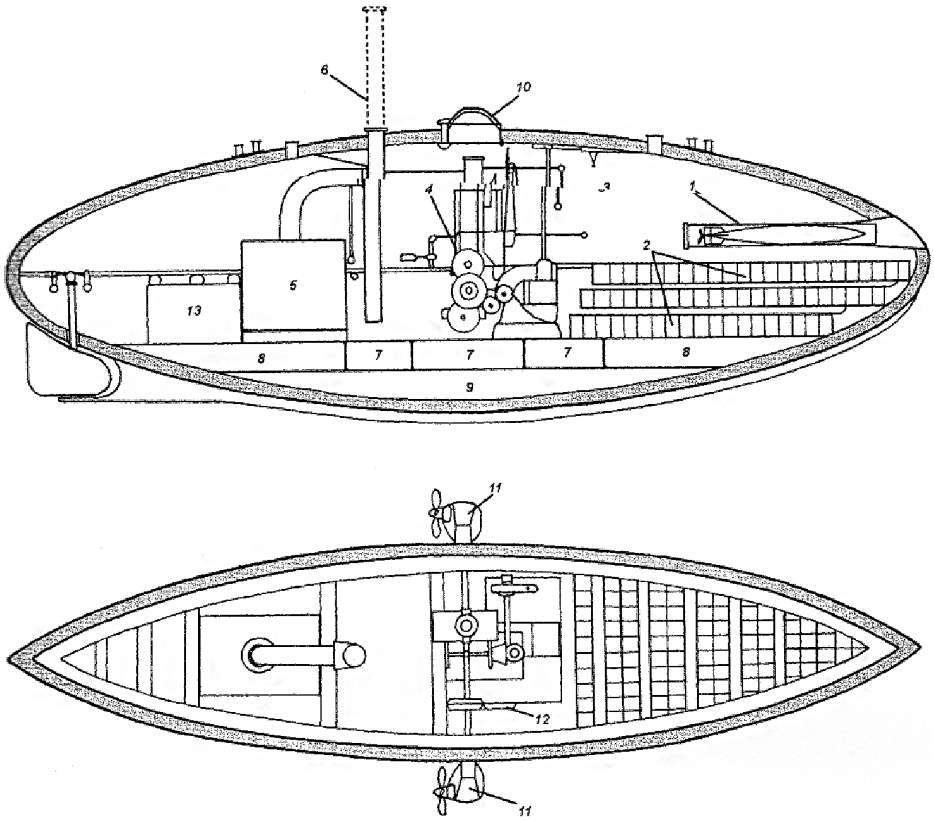


Рис. 2.27. Підводний човен Д. Бейкера:
1 – торпедний апарат; *2* – акумуляторна батарея; *3* – пост управління;
4 – парова машина і гребний електродвигун; *5* – паровий котел;
6 – димова труба; *7* – нафтові цистерни; *8* – вирівнюючі цистерни;
9 – цистерна головного баласту; *10* – оглядовий ковпак з вхідним люком;
11 – гребні гвинти; *12* – зубчаста передача; *13* – бак з водою для парового котла

До складу енергетичної установки входили: парова машина потужністю 50 к. с., гребний електродвигун потужністю 50 к. с., акумуляторна батарея із 232 елементів конструкції Вудворта, два гребних гвинта і паровий котел. Будова машини забезпечувала хід човна у надводному положенні і заряд акумуляторної батареї спільно з роботою гребного електродвигуна. Швидкість руху підводного човна – 12 вузлів, 9 вузлів – у підводному положенні.

У другій половині XIX ст. ККД парових енергетичних установок складав близько 8 %, а ККД рушія не перевищував 30 %. Таким чином,

ефективність перетворення енергії палива на роботу руху судна становила близько 2,4 %, тобто 97,6 % енергії палива втрачалося.

У 70-і рр. XIX століття у суднобудування приходить сталь. Пасажирські судна, призначені для експлуатації на лінії Англія–США, стали називатися «трансатлантиками». Оскільки розвивалось суперництво, то переможцю потрібна була нагорода. У зв'язку із цим, у 1840 р. судновласником трансатлантиків Самуелем Кунардом був запропонований символічний приз – «Блакитна стрічка Атлантики». Спочатку це був блакитний вимпел, який підіймався на щоглі, а з 1935 р. – срібний кубок [26].

Володар «Блакитної стрічки Атлантики» мав у середньому в 4 рази більше пасажирів, ніж лайнер, що не завоював почесний титул. Приз присуджувався лайнеру, який у найменший час долав трансатлантичну відстань у 3000 миль між портами, розташованими на берегах Європи та Північної Америки.

Першим судном, яке у 1840 році завоювало «Блакитну стрічку Атлантики» став колісний пароплав «Britania», який подолав відстань від Англії до Бостона за 14 діб та 8 годин. Боротьба трансатлантичних лайнерів за «Блакитну стрічку Атлантики» сприяло прогресу суднобудування та удосконаленню суднового машинобудування. Прагнення завоювати бажаний приз вимагало збільшити швидкість ходу судна, досягти цього можливо лише за рахунок потужності енергетичної установки. Більш потужна енергетична установка вимагала, поряд з іншим, збільшення розмірів трансатлантичних лайнерів.

Судно – володар «Блакитної стрічки Атлантики» – це не тільки реклама судновласника, але і держави, якому воно належить, тому провідні держави субсидували судноплавним компаніям будівництво все більш досконалих пароплавів.

Незважаючи на великі габарити, масу та значну нерівномірність обертання колінчастого вала парова машина довгий час залишалась основним типом головного двигуна суднової енергетичної установки. Навіть за станом на 1930 рік біля 75 % суден торговельного флоту світу мали енергетичні установки з паровими машинами.

За роки Другої світової війни для трансатлантичних суден типу «Лібертті» у США було побудовано 2700 парових машин трикратного розширення потужністю по 2500 к. с.

У суттєво зниженій кількості виробництво суднових парових машин тривало ще протягом 15 років після закінчення війни.

У подальшому світовий ринок суднових двигунів повністю був завойований паровими турбінами і двигунами внутрішнього згоряння, які мали безперечні переваги перед першопрохідцями віку пари.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. *Які особливості еоліпіла Герона Олександрійського у подальшому були використані під час створення теплового двигуна? Назвіть тип такого двигуна.*
2. *Розгляньте ідею водопідйомного пристрою, створеного французьким інженером Соломоном де Ко.*
3. *З чим пов'язана поява теплових двигунів на початку XVII ст.?*
4. *Назвіть призначення парової машини Томаса Севері.*
5. *Які нові технічні рішення були застосовані Томасом Севері?*
6. *Яка частка теплової енергії в машині Т. Севері використовувалась на роботу водопідйому?*
7. *Поясніть, чому Севері отримав патент на застосування «рушійної сили вогню для приведення до руху млинів всякого роду», коли його установка була виключно водопідйомною.*
8. *Розгляньте принцип дії пароатмосферного двигуна Д. Папена.*
9. *За рахунок чого поршень Д. Папена рухається донизу й піднімає вантаж?*
10. *Чому двигун Д. Папена був практично непридатним?*
11. *У чому полягає основна заслуга Севері та Папена?*
12. *Проаналізуйте відмінність принципу конденсації пари в паровій машині Ньюкомена порівняно з двигуном Д. Папена.*
13. *Застосування якого технічного рішення в машині Ньюкомена призвело до значних втрат теплоти?*
14. *Чому парова машина Ньюкомена не могла забезпечити рух судна?*
15. *Як здійснювалась передача потужності від парової машини Ньюкомена на гребні колеса судна, побудованого Д. Хуллом?*
16. *Хто є розробником і створювачем першого універсального теплового двигуна?*
17. *Яка особливість надавала машині Ползунова універсальності?*
18. *Розгляньте принцип дії парової машини І. І. Ползунова.*
19. *Як здійснюється передача робочого зусилля від поршнів парової машини І. І. Ползунова?*
20. *Як пов'язані між собою робочі органи двигуна І. І. Ползунова і споживачів потужності?*
21. *Яке конструктивне рішення, запропоноване І. І. Ползуновим, було покладене в майбутньому в основу проєктування багатоциліндрових двигунів?*
22. *Назвіть основні принципи, закладені Уаттом у конструкцію свого парового двигуна.*
23. *Як на погляд Уатта в універсальному паровому двигуні повинен відбуватися процес конденсації?*
24. *Яка, за Уаттом, основна ознака універсального теплового двигуна?*
25. *За яких умов Уатт та Болтон надавали бажаючим парові машини безоплатно?*

26. *Як у машині Уатта здійснювалося перетворення руху поршня на обертальний рух вала?*
27. *Який показник вимірювання потужності парових машин був запропонований Д. Уаттом?*
28. *Чому перша парова машина Уатта не була повністю універсальним двигуном?*
29. *Який тип парових машин застосовувався на перших суднах з гребними колесами?*
30. *Яка пропозиція англійця Д. Горнблоуера (1781 рік) забезпечила більш повне розширення пари й підвищила ефективність парової машини?*
31. *Яку назву отримала парова машина з послідовним розширенням пари у двох циліндрах?*
32. *З чим пов'язано створення парових машин з хиткими циліндрами? Назвіть типові параметри таких машин.*
33. *Наведіть термодинамічні та конструктивні засоби підвищення економічності паросилових установок та зменшення їх розмірів, застосовані у першій половині XIX ст.*
34. *Як вплинуло широке застосування гребних гвинтів на суднах на загальну будову парових машин?*
35. *Наведіть характеристики перших горизонтальних парових машин.*
36. *Чим викликаний перехід суднобудівників наприкінці 70-х рр. XX ст. до вертикальних машин?*
37. *Назвіть найбільш поширений у 70–80 рр. XIX ст. тип суднового двигуна для гвинтових пароплавів.*
38. *Розгляньте основні особливості загальної будови вертикальних суднових машин трикратного розширення, створених наприкінці XIX ст.*
39. *Надайте характеристику найбільших у світі парових машин для пасажирських лайнерів.*
40. *Застосування яких заходів привело до зниження теплових втрат через теплообмін між парою та стінками циліндрів парової машини?*
41. *Чому в першому двадцятиріччі XIX ст. парові машини з двократним розширенням стали основним типом суднового двигуна?*
42. *Наведіть основні характеристики машин трикратного розширення, які випускались на початку 90-х рр. XIX ст.*
43. *Розгляньте особливості будови типової вертикальної машини трикратного розширення.*
44. *Які суднові парові машини були найбільшими із побудованих за весь час їх існування?*
45. *Які особливості пов'язані із застосуванням у парових машинах перегрітої пари?*
46. *Який тип суднових парових машин знайшов застосування на морському флоті після 15-х рр. XX ст.? Розгляньте особливості будови.*

ГЛАВА 3. СУДНОВІ ПАРОТУРБІННІ УСТАНОВКИ

3.1. Парові турбіни: принцип дії, визначення і параметри

Безумовно, найважливішою подією військово-морського параду, який проводився у 1897 р. на честь «діамантового» ювілею англійської королеви Вікторії, стала демонстрація судна «Turbinia», яке легко обійшло найшвидкісніші кораблі. Фурор, який викликало це судно, призвів до того, що на Чарльза Парсонса, за ідеями якого було створено паротурбінну енергетичну установку «Turbinia», посипалися замовлення англійського адміралтейства на розробку подібних проєктів.

Прообразом парової турбіни (ПТ) прийнято вважати вже згадуваний еоліпіл Герона Олександрійського. Практичне втілення ідеї парової турбіни було викликане ситуацією, яка склалася наприкінці XIX століття, коли існуючі на той час парові машини, що майже 100 років успішно виконували свої функції у всіх галузях техніки, у тому числі й суднобудуванні, перестали відповідати тим вимогам, які висувала промисловість. Насамперед це було пов'язано з недостатньою їх економічністю та обмеженнями за потужністю. Саме парова турбіна стала двигуном, який за ефективністю відповідав духу й завданням того часу.

Принцип дії ПТ полягає в наступному: пара, яка утворюється у паровому котлі, підводиться до сопла чи групи сопел, де розширюється. Унаслідок цього тиск її зменшується, а швидкість витікання зростає. Струмінь розігнаної пари спрямовується на робочі лопатки вигнутої форми. Відцентрова сила частинок пари, яка при цьому виникає, здійснює тиск на лопатки й обертає робоче колесо турбіни, а разом з ним і вал, на якому воно закріплене.

Трохи теорії турбін. Існує два типи парових турбін: *реактивні* та *активні.* Еоліпіл Герона Олександрійського найяскравіше ілюструє принцип дії реактивної турбіни. У ньому пара виходить з кулі по колінчастим трубкам, загнуті кінці яких виконують функції сопел. Реактивна сила примушує кулю обертатися у бік, протилежний напрямку виходу пари. Таким чином, у кулі Герона відбувається перетворення внутрішньої енергії пари на енергію парового струменя, а також перетворення останньої на механічну роботу. До речі, механізм перетворення хімічної енергії палива на механічну роботу однаковий і у реактивній турбіні, і у ракеті.

Принцип дії активної турбіни полягає в наступному: струмінь пари розширюється у соплі, набуває підвищеної швидкості й надходить у канал між розміщеними на роторі профільованими робочими лопатками, площа прохідного перетину каналу незмінна від входу до виходу. Під час течії пари на увігнутій поверхні лопатки утворюється зона підвищеного тиску, на випуклій – пониженого. Унаслідок цього виникає сила, що впливає на лопатку та спрямована від увігнутої сторони до випуклої, і лопатки починають обертати ротор, на якому вони закріплені, забезпечуючи отримання механічної енергії.

Сукупність одного ряду (уздовж кола) соплових (у турбінах активного типу) або напрямних (у турбінах реактивного типу) лопаток і одного ряду робочих лопаток називається *ступенем турбіни*.

Одноступеневі активні турбіни застосовуються в судновій практиці лише як допоміжні, тобто для приведення в дію допоміжних механізмів малої потужності. Одноступеневі реактивні турбіни не застосовуються зовсім.

Головні суднові турбіни, які обертають ГГ, і допоміжні турбіни для приводу допоміжних механізмів завжди виконуються багатоступеневими. Багатоступеневі турбіни можуть складатися зі ступенів тиску (розширення пари від котельних параметрів до кінцевого тиску відбувається у певній кількості послідовно розташованих ступенів, у кожному з яких використовуються невеликі перепади тиску й теплоти або ступенів швидкості (кінетична енергія парового потоку, отримана під час розширення пари в соплах на початку проточної частини, перетворюється на механічну роботу не на одному вінці робочих лопаток, а на декількох послідовно розташованих на одному диску).

Розглянемо схеми турбін різних типів, які застосовуються в судновій практиці (рис. 3.1), та характер перетворення енергії, що в них відбувається [8]. У верхній частині всіх зображень наведені криві зміни тиску p і швидкості C пари під час протікання через турбіну. У нижній їх частині – розгорнуті на площину перерізи соплових, напрямних та робочих каналів.

На рис. 3.1,***а*** подана схема одноступеневої активної турбіни. Свіжа пара з тиском p_0 і швидкістю C_0 надходить у сопла *1*, де розширюється до тиску p_1, швидкість струменя пари істотно зростає і дорівнює C_1.

Із цією швидкістю пара надходить у канали робочих лопаток *2*, у яких змінює свій напрям і через вплив на лопатки примушує диск *3* і вал обертатися, виробляючи механічну роботу. Механічна робота обертання вала з диском ротора турбіни здійснюється за рахунок кінетичної енергії пари, унаслідок чого швидкість пари на виході з робочих лопаток C_2 значно знижується.

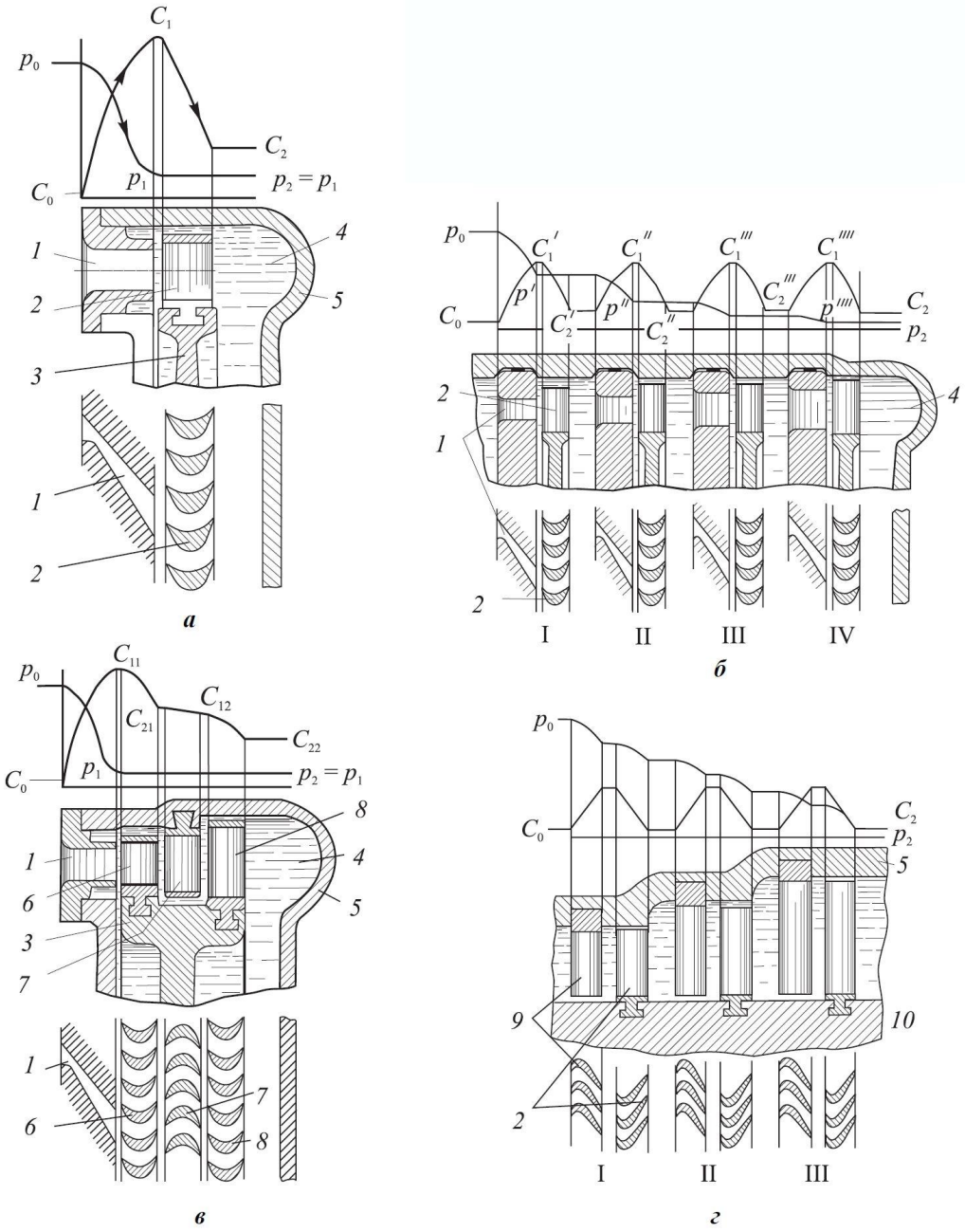


Рис. 3.1. Схеми суднових парових турбін різних типів

Схема активної турбіни зі ступенями швидкості наведена на рис. 3.1,***в***. Пара з тиском p_0 і швидкістю C_0 підводиться до сопла *1*, у якому відбувається перетворення енергії пари: тиск падає до p_1, а швидкість зростає до C_{11}. Із цією швидкістю пара надходить на перший ряд *6* робочих лопаток, у якому змінюється напрям потоку, а швидкість зменшується до C_{21} через перетворення кінетичної енергії пари на механічну роботу обертання диска *3*, тиск пари тут залишається незмінним. Далі пара зі швидкістю C_{21} надходить у напрямний вінець *7*, лопатки якого лише змінюють напрям потоку під час підведення його до лопаток *8* другого робочого вінця. Подальше перетворення кінетичної енергії пари на механічну роботу обертання того ж диска *3* супроводжується зниженням швидкості потоку до C_{22}, тиск пари залишається незмінним. Пара виходить у випускну порожнину *4* корпусу турбіни *5*.

На рис. 3.1,***б*** подана схема активної турбіни із чотирма ступенями тиску. Пара з початковим тиском p_0 і швидкістю C_0 підводиться до сопел *1* першого ступеня I. Далі у кожному ступені турбіни (II, III, IV) відбуваються процеси перетворення енергії абсолютно аналогічні тим, які мають місце в одноступеневій активній турбіні (рис. 3.1,***а***).

Рис. 3.1,***г*** подає схему реактивної турбіни, ротор 10 якої виконаний у формі барабана із закріпленими на ньому робочими лопатками *2*. Напрямні лопатки *9* закріплені у корпусі *5* турбіни. Розширення пари відбувається у каналах напрямних *9* і робочих *2* лопаток від початкового тиску p_0 послідовно, від вінця до вінця до кінцевого тиску p_2. Швидкості пари зростають та зменшуються в межах кожного ступеня відповідно до степеня розширення пари. Кількість ступенів реактивних турбін може становити 25…30 [8].

У конструкціях сучасних головних турбозубчастих агрегатів (ГТЗА) часто в межах однієї турбіни має місце поєднання ступенів швидкості й ступенів тиску [8]. Сукупність соплових (напрямних) апаратів і робочих вінців усіх ступенів утворює *проточну частину турбіни*.

У табл. 3.1 наведені порівняльні характеристики суднових парових машин і суднових парових турбін, які переконливо свідчать на користь останніх [1].

Таблиця 3.1. **Порівняльна характеристика суднових парових машин та парових турбін**

Параметр	Парова машина	Парова турбіна
Корисна робота	Здійснюється за рахунок потенціальної енергії пари	Здійснюється за рахунок кінетичної енергії струменя пари
Потужність	Розширення пари нижче 0,02…0,05 МПа неможливе через непомірне зростання розмірів циліндра низького тиску парової машини. Унаслідок цього питомі втрати пари – значні та як наслідок, низька економічність. Можлива потужність парових машин обмежена	Парова турбіна дозволяє доводити розширення пари до 0,002…0,005 МПа. забезпечуючи внаслідок цього низьку питому витрату пари та високу економічність. Можлива потужність парових турбін практично необмежена
Принцип дії	Циклічна зміна швидкості поршня, штока і повзуна при прямолінійно-поступальному русі приводить до виникнення сил інерції, які викликають вимушені коливання вузлів двигуна, що передаються фундаменту	Ротативний принцип дії. Єдиним рухомим елементом парової турбіни є ротор. Ударні навантаження з боку турбіни на судновий фундамент повністю відсутні
Розташування центру ваги	Високе, особливо у найбільш поширених вертикальних парових машинах	Більш низьке, порівняно з паровою машиною еквівалентної потужності розташування центру ваги, що сприяє підвищенню остійності судна
Компонування	Недостатня швидкість викликає труднощі компонування з електрогенератором	Ідеально компонується з електрогенератором
Контакт пари з маслом	Замаслення конденсату внаслідок змащення деталей, що контактують з парою	Повна відсутність змащуваних деталей, що контактують з парою

3.2. Карл Густав Лаваль та Чарльз Парсонс – створювачі суднових парових турбін

Багато в чому створення парової турбіни пов'язано з ім'ям талановитого шведського інженера та винахідника Густава Лаваля. Наші сучасники знають Лаваля більшою мірою за всесвітньо відомою фірмою «Alfa Laval», яка носить його ім'я. Ця фірма обіймає лідируючі позиції на світовому ринку змащувального й теплообмінного устаткування, засобів очищення палив і масел, а також засобів промислового розділення молока на жирну фракцію та сироватку.

Саме з розробки високоефективного сепаратора для відділення вершків з молока почалася плідна винахідницька діяльність Густава Лаваля. Сепаратори Лаваля знайшли розповсюдження у всьому світі.

Для того, щоб сепаратор ефективно відділяв вершки від молока, його необхідно обертати зі значною швидкістю – біля 6000…7000 об/хв. До речі, необхідність створення ще більш швидкісного приводу до сепаратора і привела Лаваля до створення парової турбіни.

Англійський патент № 1622 на «Турбіну, що працює парою та водою», виданий Г. Лавалю, у 1883 р. був першим у світі, у якому розглядався принцип дії та була наведена конструкція парової реактивної турбіни.

Історична довідка [15, 26]. Шведський інженер Карл Густав Патрік де Лаваль (1845–1913) походив зі старовинної французької сім'ї, що емігрувала до Швеції ще у XVI ст., коли в самому розпалі було переслідування гугенотів.

У 1863 р. Густав вступив до Королівського технічного університету (м. Стокгольм), після закінчення якого працював інженером на гірничих та гідротехнічних підприємствах. Відчувши, що йому не вистачає наявних знань з фундаментальних дисциплін для розв'язання серйозних інженерних задач, він отримує стипендію для продовження освіти і вступає до університету міста Упсала. Тут він поглиблено вивчає фізику, хімію, математику і після закінчення університету захищає докторську дисертацію.

Повернувшись після закінчення університету до міста Фалун, де Г. Лаваль продовжив роботу на рудниках, він з головою поринув у інженерну й винахідницьку роботу, у якій виявив не тільки особливі риси Лаваля-винахідника: сміливість, неймовірне різноманіття та несподіваність ідей, але й настійливість та енергійність у їх втіленні. Характерним є такий випадок: захопившись ідеєю виробництва скляних пляшок за новою, власною технологією, він протягом короткого часу спроєктував пляшковий завод, продуктивність якого була такою високою, що це суттєво знизило ціну на пляшки. Завод перестав приносити прибуток, і його закрили.

На території заводу, де Лаваль працював, розташовувалася невеличка молочна ферма. Якось Лавалю розповіли про машину для відділення вершків від молока, розроблену в Германії, яка через низьку частоту обертання працювала недостатньо ефективно. Молодого інженера захопила ідея створити досконалу конструкцію сепаратора неперервної дії для молока – пристрою вкрай потрібного шведським тваринникам. Для отримання вершків високої якості сепаратор, як визначив Лаваль, повинен був обертатися з великою швидкістю – 6000…12 000 $хв^{-1}$ (це майже в 10 разів перевищувало частоту обертання німецького сепаратора). Саме для приводу сепаратора Лаваль створив і застосував свою першу парову турбіну. Конструкція її була дуже спрощеною, як на погляд сучасних спеціалістів, але саме успіх сепаратора з турбінним приводом надав винахіднику кошти, необхідні для подальшої роботи над конструкціями більш досконалих парових турбін.

Ротор цієї турбіни (рис. 3.2) являє собою відлиту з бронзи *S*-подібну трубку *4* із соплами *3* на її кінцях. Трубка була з'єднана з порожнистим валом *2*, по якому до неї подавалася пара *1*. Випробування показали, що турбіна надійно працювала на частотах обертання до 42 000 $хв^{-1}$ при колові швидкості 200 м/с, але вона мала низький ККД. Це і не дивно, тому що для досягнення більш-менш високого ККД, колова швидкість турбіни повинна була бути біля 450 м/с, що було недосяжним для техніки того часу.

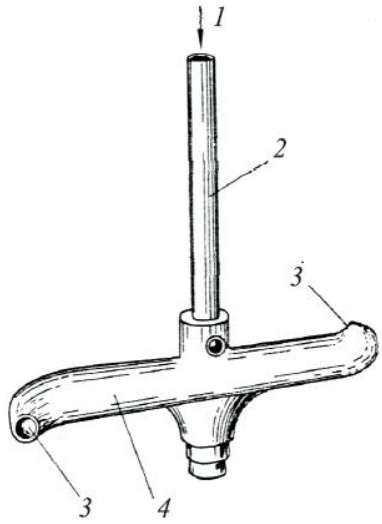


Рис. 3.2. Реактивна турбіна Лаваля

Для розв'язання проблеми створення парової турбіни Лаваль знайшов інший шлях. Це була активна турбіна (розширення пари в якій відбувається тільки у нерухомих соплах, а тиск перед і за робочими лопатками незмінний), що була запатентована ним у 1889 р. На Всесвітній виставці в Чикаго Лаваль у 1893 р. продемонстрував свою першу турбіну потужністю 5 к. с. Робота пари в активній турбіні Лаваля поділялась на два процеси: перетворення потенціальної енергії пари в соплі на кінетичну та передача кінетичної енергії пари лопаткам, розташованим по колу на валу диска. Сопло мало конічну форму, що звужується, а потім розширюється до виходу, воно стало відомим у техніці як «сопло Лаваля». Завдяки цьому соплу в разі зниження тиску пари турбіна розганялася до швидкості, що перевищувала швидкість звуку. Частота обертання турбіни становила 30 000 хв$^{-1}$, що відповідало коловій швидкості 460 м/с, вона викликала загальну увагу відвідувачів виставки. Це було вимушене рішення, тому що зі зростанням потужності одноступеневої активної турбіни, а, звісно, і теплоперепаду, який повинен спрацьовуватися у ній, для отримання максимальної ефективності необхідно збільшувати колову швидкість[5], яка має обмеження, ураховуючи міцність рухомих елементів: ротора з розташованими на ньому робочими лопатками. У 1900 році потужність турбіни Лаваля, що демонструвалася на Всесвітній виставці у Парижі, досягла вже 260 кВт.

На жаль, подальшого розповсюдження турбіна Лаваля не отримала і причина тут полягала в наступному: ці турбіни використовувалися головним чином для приводу електричних генераторів, частота обертання яких була набагато меншою, ніж у турбін; Лавалю довелося розробити для них механічну передачу – редуктор. Останній був у декілька разів більшим за масою і габаритами, ніж турбіна, та суттєво знижував її ККД (рис. 3.3). Це стало неподоланою перешкодою на шляху створення турбін більшої потужності. У той же час Лавалем було розв'язано низку проблем, завдяки чому спростилося створення нових, більш досконалих проєктів ПТ.

[5] Такий взаємозв'язок (але в різному співвідношенні залежно від типу турбін) між коловою швидкістю та швидкістю, яка залежить від наявного теплоперепаду, визначає коловий ККД парової турбіни.

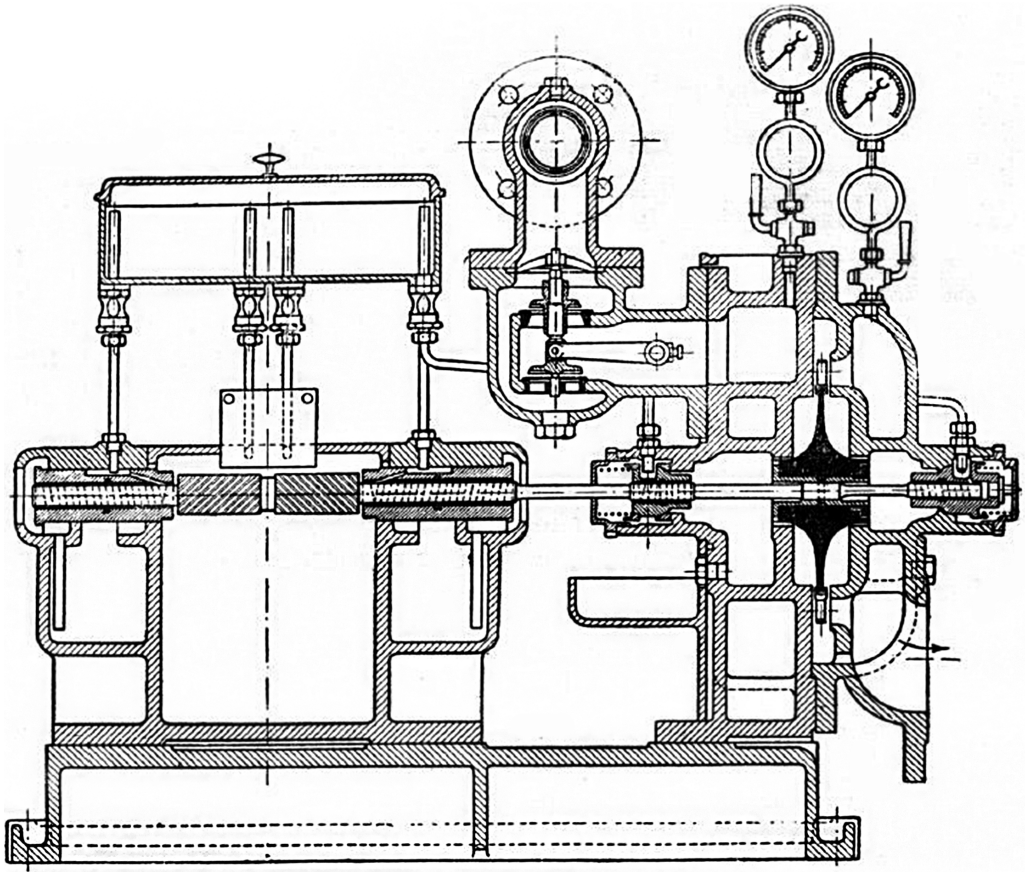


Рис. 3.3. Турбіна Лаваля потужністю 30 к. с.

До таких проблем фахівці відносять наступне:

розширення пари в розширеному соплі (сопло Лаваля);

застосування «гнучкого вала»;

застосування диска рівної міцності;

застосування кулькових підшипників;

застосування нікелевої сталі для виготовлення дисків та лопаток;

конструкція замків для кріплення робочих лопаток у диску – хвостовиків Лаваля;

застосування редуктора у складі турбінної установки.

Майже всі перераховані вище елементи сьогодні можна зустріти в сучасних ПТ.

У створенні ефективної парової турбіни англієць Чарльз Парсонс вибрав інший шлях.

Історична довідка. Чарльз Елджертон Парсонс (1854–1931) народився в Лондоні. Він був останнім, шостим, сином Вільяма Парсонса. Батько Чарльза Парсонса, президент Лондонського Королівського товариства, дав сину чудову домашню освіту, яку він продовжив у Сент-Джеймському коледжі Кембріджського університету. Незважаючи на те, що батько був відомим астрономом (у його маєтку був установлений унікальний на ті часи рефлектор з діаметром дзеркала 1,8 м), сина більше приваблювало винахідництво. Так уже у віці 12 років він зробив спробу побудувати паровий автомобіль, трохи пізніше разом з братом побудував парову машину, що була приводом для станка, на якому шліфували лінзи телескопів. Чарльз Парсонс спроєктував та побудував ротаційну парову машину й епіциклоїдальний паровий двигун. Отже, він був повністю підготовлений для основної справи свого життя – винайдення та створення парової турбіни [1].

Після закінчення коледжу Чарльз Парсонс розпочав працювати на машинобудівному заводі Армстронга у Ньюкаслі – одному з найпередовіших заводів Англії тих часів. На заводі Парсонс пройшов чудову школу і сформувався як інженер. Після цього він працював у Лідсі на паровозобудівному заводі Джеймса Кітсона, який випускав парові машини потужністю 10 та 20 к. с. за проєктом Парсонса. Саме тут Парсонс зрозумів, що парові машини не мають перспектив і почав активно працювати над створенням парової турбіни. У 1894 році разом з друзями Парсонс засновує «Marine Steam Turbine Company» й отримує патенти на парові турбіни для морського застосування.

Основна ідея, що була покладена в розробку Парсонса, полягала в наступному: усю енергію пари, що необхідно спрацювати, слід поділити на декілька часток і спрацьовувати кожну з них у окремому ступені.

Утіленням цієї ідеї стала багатоступенева турбіна, що складається з декількох ступенів, розташованих по ходу пари. Кожен із цих ступенів, подібно до турбіни Лаваля, складається із сопел (соплового апарата) і робочого колеса у вигляді диска з лопатками. Усі робочі колеса закріплюються на загальному валу. Завдяки цьому енергія пари, що припадає на один ступінь, може бути такою, щоб швидкість виходу пари із сопел, з точки зору максимального ККД, і оптимальна колова швидкість були помірними. Таким чином, багатоступенева турбіна дозволяє варіювати колову швидкість шляхом зміни кількості ступенів. В одноступеневій турбіні Лаваля це було неможливим, тому її автор повинен був для збільшення потужності підвищувати колову швидкість і частоту обертання турбіни.

Потрібно згадати, що багатоступенева турбіна з'явилася дещо раніше, ніж її запропонував Чарльз Парсонс (англійці – Гілман у 1837 р. та Вільсон у 1848 р., французи – Леруа у 1840 р. і Турнер у 1853 р.). Але турбіна Парсонса, яка була запатентована у 1884 р., мала низку особливостей, що сприяли її практичному застосуванню. По-перше, розширення пари відбувалося не тільки в соплах, але й у каналах робочих лопаток кожного ступеня (канали між робочими лопатками були звуженими, а швидкість пари на виході була більшою, ніж на вході). Такі турбіни мають назву

«*реактивних*». На даний час це основний тип турбіни, який застосовується в потужних енергетичних установках.

По-друге, у багатоступеневих реактивних турбінах, де тиск перед першим робочим колесом значно більший, ніж за останнім робочим колесом, виникає осьова сила, яка може досягати великих значень. Якщо цю силу не усунути або суттєво не зменшити, проблема працездатності підшипників серйозно ускладнюється. Парсонс знайшов оригінальне рішення цієї проблеми. Він запропонував турбіну, у якій пара підводилася до середньої частини ротора, завдяки чому тиск пари з обох боків ротора однаковий і осьова сила, що впливає на підшипники, відсутня. Разом із цим Парсонс розробив також конструктивний варіант розвантаження ротора однопотокової реактивної турбіни від осьових навантажень.

Перша турбіна, побудована у 1884 році за патентом Парсонса на машинобудівному заводі у м. Гетсхеді (Англія), мала потужність 4 кВт (до речі, саме Парсонс уперше почав виражати потужність турбін у цих одиницях, які раніше застосовувалися лише в електротехніці) і частоту обертання 1000 хв$^{-1}$. Порівняно невеликі оберти дозволили безпосередньо з'єднати вали турбіни й генератора, позбувшись зубчастої передачі, що привело до істотного здешевлення турбогенератора загалом.

За станом на 1889 р. кількість побудованих на заводі у Гетсхеді турбін Парсонса досягла 300 одиниць, потужність їх зросла до 75 кВт.

У подальшому, унаслідок ускладнення відносин з компаньйонами, Чарльз Парсонс був вимушений, як це не парадоксально, працювати над створенням турбіни нового типу, здатної витіснити його розробку. Це були багатоступеневі реактивні радіальні турбіни, які являли собою послідовно з'єднані за парою робочі колеса, подібні до колеса Герона Олександрійського. Промислові зразки такої турбіни, створеної Парсонсом у 1890 р., досягали потужності 32 кВт (рис. 3.4).

Але ці турбіни не виправдали надій, що на їх покладалися, вони не дали очікуваних результатів, економічність радіальних турбін була меншою, ніж осьових турбін.

Видатну роль в історії розвитку парових турбін відіграло саме судно «Turbinia», з епізоду про який розпочався цей матеріал.

Це відносно невелике судно довжиною 30 м і водотоннажністю 44,5 т було побудоване у 1894 р. «Компанією суднових парових турбін», очолюваною Чарльзом Парсонсом. Він запропонував англійському адміралтейству застосувати на судні парову турбіну й гарантував досягнення нечуваної на той час швидкості – 37 вузлів. На перших випробуваннях у 1897 р. судно «Turbinia», обладнане паротурбінною установкою (ПТУ) з турбіною потужністю 1400 кВт, розвинуло лише 19,7 вузли.

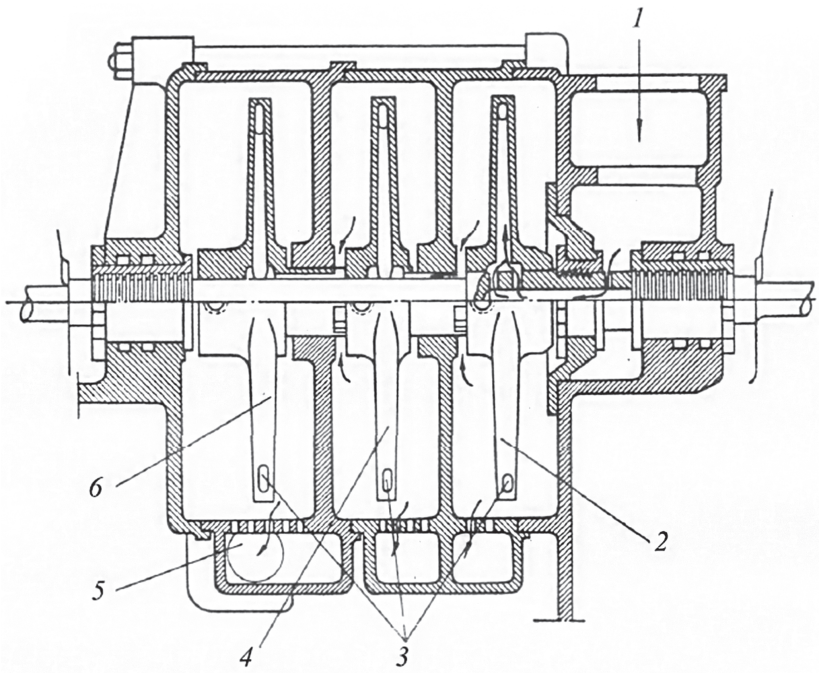


Рис. 3.4. Багатоступенева реактивна турбіна «Герон»:
1, *5* – підведення та відведення пари відповідно; *2*, *4*, *6* – робочі колеса відповідно першого, другого і третього ступенів; *3* – сопло

Причиною було надзвичайно інтенсивне скипання води, що обтікала лопаті гвинта, унаслідок чого його ефективність різко знижувалася. Причина була на поверхні: гвинти застосували такі, як і на судні з паровими машинами, а частота обертання турбін була набагато більшою. Суднобудівники чи не вперше зіткнулися з явищем кавітації, для усунення її почали проводити експерименти з гвинтами різної форми, достатньо складні й не завжди успішні. Парсонс запропонував оригінальне рішення: тривальну енергетичну установку з приводом кожного вала від послідовно розташованих по ходу пари турбін високого, середнього та низького тисків. На кожному валу послідовно розташовувалися по три гребні гвинти. Частота обертання гвинтів була знижена до 2000 хв$^{-1}$ [1, 37].

Таким чином, у результаті турбіна складалася з трьох послідовно з'єднаних груп ступенів, кожна з яких являла собою багатоступеневу турбіну. Вали турбін і гвинти були з'єднані напряму, без передач. Конструкція пропульсивного комплексу «Turbinia» була остаточно відпрацьована у 1896 році. Судно показало надзвичайно високі характеристики: швидкість його була доведена до 32,8 вузлів, а після збільшення потужності

турбінної установки до 1760 кВт та проведення низки конструктивних удосконалень швидкість досягла 34,5 вузлів. [1].

Що ж дозволило «Turbinia» досягти такої швидкості, яка і на сьогодні є непоганим досягненням для суден та кораблів? Основна причина полягала в тому, що на судні водотоннажністю 44,5 т завдяки високим масогабаритним показникам ПТУ була розміщена енергетична установка потужністю 1760 кВт. Загальноприйнятою на ті часи була енергооснащеність судна (відношення потужності енергетичної установки до водотоннажності судна) 12…14 кВт/т, а у «Turbinia» цей показник сягав майже 40 кВт/т.

Англійське адміралтейство, ураховуючи переваги, які надавала парова турбіна військовим кораблям, прийняло рішення про обладнання турбінами двох нових міноносців та крейсера, спущених на воду в 1904 р. Одночасно з ними були виготовлені три однотипні крейсери, на яких було встановлено парові машини. Спільні випробування кораблів підтвердили вагомі переваги парових турбін.

У 1906 році в Англії був побудований броненосець «Drednout» водотоннажністю більше 18 000 т, з неймовірною для такого велетня швидкістю – біля 23 вузлів, яку забезпечувала ПТУ потужністю 18 000 кВт.

Створення цього судна викликало фурор у всьому світі, кожна країна, яка мала військово-морський флот намагалася придбати у Чарльза Парсонса патент на суднову парову турбіну.

3.3. Застосування парових турбін на суднах (1900–1940 рр.)

Трохи теорії турбін. Суднові парові турбіни за основними ознаками поділяються на декілька видів.

1. За призначенням виділяють такі турбіни:

головні, що обертають гребний вал (вони також поділяються на турбіни *переднього* й *заднього ходів*);

допоміжні, які приводять у дію електрогенератори та допоміжні механізми, що обслуговують головні турбіни й котли, а також механізми загальносуднового призначення (наприклад, вантажні й живильні насоси).

2. За кількістю корпусів:

однокорпусні, що використовують як допоміжні або головні з електричною передачею – у вигляді турбоелектричного агрегата;

багатокорпусні, проточна частина яких розміщена у декількох корпусах, об'єднаних одною зубчастою передачею і зв'язаних послідовним потоком пари; їх установлюють тільки як головні.

3. За характером робочого процесу:

активні, у ступенях яких повне розширення пари відбувається в соплах, а перетворення кінетичної енергії на механічну відбувається на робочих лопатках одного ступеня (ступінь тиску) або декількох – двох чи трьох – рядах робочих лопаток (ступінь

швидкості); такі турбіни виконуються багатоступеневими (турбіни головних та допоміжних турбоагрегатів), з першим – регулювальним – ступенем у вигляді ступеня швидкості або одноступеневими, зі ступенем швидкості (турбіни приводу допоміжних механізмів);

реактивні, що складаються з великої кількості ступенів, у яких перетворення потенціальної енергії пари на кінетичну відбувається як у соплах, так і каналах, утворених робочими лопатками. Перетворення кінетичної енергії на механічну відбувається, як і в активних ступенях, на робочих лопатках.

4. За тиском пари на випуску:

конденсаційні, у яких випуск пари відбувається в конденсатор, у якому підтримується низький надмірний тиск. Усі головні турбіни є конденсаційними;

з протитиском, у яких тиск пари під час випуску вищий за атмосферний. Це зазвичай суднові допоміжні турбіни.

5. За способом передачі обертального моменту:

прямодіючі, які застосовуються тільки як допоміжні турбіни;

з передачами (механічними, електричними, гідравлічними).

6. За напрямом обертання:

реверсивні, що мають проточну частину для переднього й заднього ходів;

нереверсивні.

Комплекс, який складається з турбін, конденсатора й передачі, називається «*головним турбоагрегатом*». Головний турбоагрегат, до складу якого входить зубчаста передача, називається «*головним турбозубчастим агрегатом*», а турбоагрегат з електричною передачею – «*турбоелектричним агрегатом*» (ГТЕА).

Турбоелектричні агрегати найчастіше виконують однокорпусними, у той же час більшість сучасних турбозубчастих агрегатів – дво- або трикорпусні (у цьому випадку перша за рухом пари турбіна – ТВТ, друга – ТСТ, третя – ТНТ).

У двокорпусному агрегаті перший за ходом пари корпус, у який вона надходить з котла, називається «*турбіною високого тиску*», а другий корпус, з якого пара надходить до конденсатора, – «*турбіною низького тиску*».

До складу трикорпусного агрегата, окрім ТВТ та ТНТ входить проміжна турбіна, яка називається «*турбіною середнього тиску*». Пара до ТСТ надходить з ТВТ або проміжного пароперегрівника (ППП), а входить до ТНТ.

Турбіна є нереверсивним двигуном, тому для забезпечення руху судна заднім ходом застосовується спеціальна турбіна заднього ходу, яка складається з декількох ступенів і розміщується у корпусі ТНТ. Перепуск пари з одного корпусу до іншого, а також з ТНТ до конденсатора забезпечується трубами великого діаметра – ресиверами.

Зубчаста передача (редуктор) призначена для зниження частоти обертання під час передачі обертального моменту від турбін на гребний гвинт, розміщена між турбінами й валопроводом. Конденсатор зазвичай розташовують під ТНТ, він призначений для конденсації пари та створення низького надмірного тиску. Разом з ГТЗА часто компонуються головний упорний підшипник, валоповоротний пристрій, масляні насоси, охолодник масла, повітряний ежектор тощо.

З початку XIX століття парова турбіна почала застосовуватися і на торгових суднах. Першим судном з паровою турбіною потужністю 2600 кВт стало англійське пасажирське судно «King Eduard» водотонажністю 650 т, яке з 1901 року забезпечувало перевезення річкою Клайд. Успішна експлуатація цього судна сприяла підвищенню довіри до ПТ.

У 1906 р. на трансатлантичну лінію Ліверпуль–Нью-Йорк вийшов англійський турбінний лайнер «Carmania», який за умовами контракту повинен був протягом чотирьох місяців плавати з опломбованими корпусами турбін, що повністю виключало можливість ремонту проточної частини й навіть огляду. Випробування пройшли успішно і вже у 1907 р. за замовленням фірми «Cunard Line» розпочалося будівництво двох величезних однотипних пасажирських лайнерів «Mavritania» та «Lusitania» водотоннажністю по 50 000 т. Швидкість у 26 вузлів забезпечувалася паровими турбінами потужністю по 68 000 к. с. Ці судна призначалися для виконання трансатлантичних рейсів (час прийшов, згадаймо «Great Eastern»), причому «Mavritania» двадцять років утримувала першість на цих лініях за швидкістю.

На цій стадії розвитку суднових ПТ вони з'єднувалися безпосередньо з гребними валами. Частота обертання гребного гвинта для досягнення високого ККД повинна бути порівняно невисокою, для транспортних суден вона становить 80…200 хв$^{-1}$. Турбіни з такою частотою обертання повинні мати значну кількість ступенів, а відповідно, значні маси й габарити.

Цікавий факт! На «Mavritania» була застосована схема пропульсивного комплексу з безпосереднім з'єднанням валів турбіни та гребних гвинтів, частота обертання яких становила 200 хв$^{-1}$. Для отримання за таких обертів оптимальної колової швидкості турбіна повинна була мати дуже велику кількість ступенів і значний їх діаметр. На турбіні з кількістю робочих ступенів 200 подавалась насичена пара тиском 1,5 МПа з 29 котлів. Питома витрата вугілля становила 0,816 кг/(кВт · год). Діаметр турбіни високого тиску (ТВТ) становив 2,6 м, низького (ТНТ) – 3,94 м. Маса роторів турбіни була дуже великою – 200 т, у тому числі маса роторів ТВТ – 74 т, ТНТ – 126 т. Маса двох ТВТ з роторами діаметром 2,6 м та довжиною 7 м становила 144 т, а двох ТНТ з роторами діаметром 3,94 м і довжиною 5,6 м – 252 т.

На рис. 3.5. наведена однокорпусна суднова парова турбіна побудови 1913 р., яка працювала безпосередньо на вал гребного гвинта.

Потужність турбіни складала 8800 кВт за частоти обертання 600 хв$^{-1}$. До складу турбіни входять як активні, так і реактивні ступені, ступені заднього ходу розміщені в загальному корпусі із ступенями переднього ходу.

Основними елементами турбіни є нерухомий корпус *7* (статор) і ротор, що складається із барабана 8, який з'єднується з валом *3*.

Пара подається до турбіни переднього ходу через патрубок *6* і спрацьовує спочатку у першому активному ступені тиску, який має чотири ступені швидкості.

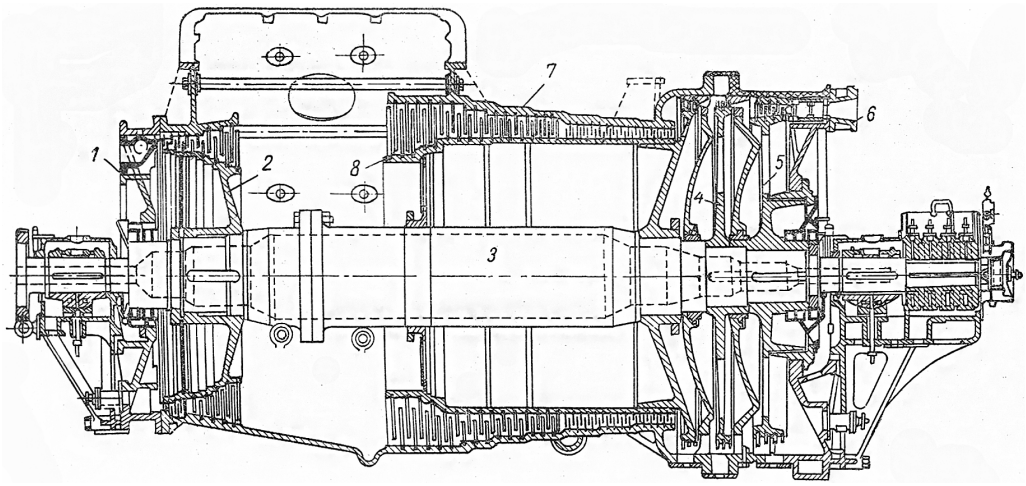


Рис. 3.5. Суднова турбіна заводу «Вулкан»
для безпосередньої передачі потужності на гребний гвинт

Далі пара проходить ще два активних ступені, кожен з яких складається із трьох ступенів швидкості, і, нарешті, розширюється у 35 реактивних ступенях. До турбіни заднього ходу *2* пара надходить через патрубок *1* і розширюється у десяти активних ступенях. Регулювання подачі пари до турбіни здійснюється маневровими клапанами.

Більш проста конструкція характерна для турбін «Brown Boveri». Вони складались з активного регулювального ступеня з чотирма ступенями швидкості й реактивних ступенів. Турбіна заднього ходу складалась з активного колеса з чотирма ступенями швидкості та восьми реактивних ступенів. До складу ротора турбіни входили два вали – носовий та кормовий і барабан, що був насаджений на вал. Обидві турбіни мали багатогребінчасті упорні підшипники.

Як це часто буває в техніці, розв'язання проблеми зниження габаритних розмірів суднових турбін було знайдене майже випадково. Під час проведення модернізації енергетичної установки транспортного торгового судна «Vespasian» тихохідну парову машину замінили на парову турбіну, залишивши старий ГГ. Оскільки частота обертання гвинта була набагато меншою ніж у парової турбіни, проєктанти вимушено застосували редуктор. Ураховуючи відносно помірні оберти парової турбіни, габарити редуктора також стали помірними. Компонування СЕУ вийшло надзвичайно вдалим, і з цього часу такі агрегати, які отримали назву «*головних турбозубчастих*», почали широко застосовуватися в суднобудуванні. На початку 1912 р. на американських лінійних кораблях уперше була застосована електрична передача. Застосовувалися спроби використання

з паровими турбінами гідравлічної передачі, у складі якої турбіна приводила в дію гідравлічний насос, що під високим тиском подавав масло на гідравлічну турбіну, безпосередньо зв'язану з ГГ. Гідравлічна передача не набула поширення внаслідок значних втрат, які досягали 15 %.

Корисна інформація! Навіщо турбіні редуктор? Перші турбінні установки, які були прямодіючими, створювали суттєві незручності. З одного боку, парова турбіна працює з високим ККД лише за значною частотою обертання, у той же час оптимальний режим роботи ГГ потребує значно меншої частоти обертання.

Спроби підняти ККД прямодіючої турбіни за рахунок підвищення тиску та температури пари на вході, за рахунок чого зростала швидкість пари на вході на лопатки, не здобули успіху. У теорії турбін є поняття оптимального співвідношення швидкості пари та колової швидкості лопаток. Підвищуючи швидкість пари, необхідно підвищувати й колову швидкість, тобто діаметр ротора турбіни. Інший шлях підвищення економічності парових турбін, пов'язаний зі збільшенням кількості їх робочих ступенів, призводив до зростання маси та розмірів турбінної установки.

Вихід із цієї ситуації пов'язаний з потребою застосування розташованої між турбіною і гвинтом спеціальної передачі (це може бути механічна, електрична чи гідравлічна). Така передача дозволяла встановити для турбіни і гребного гвинта різні й найвигідніші частоти обертання.

Суднове паротурбобудування набуло злету в часи, що передували Першій світовій війні, коли величезні кошти вкладалися у будівництво нових кораблів, більшість яких обладнувалися ПТУ. «Компанія суднових турбін Парсонса» працювала з великим напруженням, за часи війни тільки на кораблях британського флоту були встановлені ПТ загальною потужністю 800 тис. кВт. На той час суднові й корабельні турбіни вироблялися й іншими фірмами за ліцензіями Парсонса. Загалом британському флоту було поставлено парових турбін Парсонса потужністю біля 2,4 млн кВт.

Такими ж турбінами були оснащені флоти не тільки Великобританії, але і її союзників: Франції, Італії. Ліцензії були куплені й супротивниками Антанти: Німеччиною та Австрією. Як це не парадоксально, але один з найпотужніших дредноутів німецького флоту будувався під особистим наглядом Парсонса.

Після закінчення Першої світової війни паротурбобудування і надалі розвивалося потужними темпами. Завдяки науково-технічним досягненням того часу рівень технології та конструювання парових котлів підвищився настільки, що тиск пари зріс до 5,0 МПа за істотного підвищення температури.

На відміну від парової машини, ПТ мала багато переваг, проте мала й деякі недоліки. Одним з них було більш значне, порівняно з паровою

машиною, зниження економічності по мірі зниження навантаження. Аналогічна закономірність має місце і у парових машинах, але в парових турбінах зниження ККД проходить значно швидше. Першим зважив на те, що наведена ситуація суттєво знижує привабливість ПТ як корабельного двигуна, Чарльз Парсонс. Він уже у 1903 р. запропонував для винищувача «Velox» швидкістю 26 вузлів комбіновану чотиривальну турбомашинну установку, на внутрішні вали якої працювали ТВТ, а на зовнішні – ТНТ та розташовані перед ними парові машини потужністю 80 кВт. Парові машини забезпечували малі ходи і реверс, за швидкості більше 13 вузлів парові машини відключалися і пара подавалася безпосередньо до турбіни [1].

Турбіни відпрацьованої пари в турбопоршневих комбінованих установках являють собою особливий різновид суднових ПТ. У поршневих парових машинах неможливо здійснювати розширення пари до тисків нижче 0,15…0,20 бар, а парові турбіни здатні забезпечити розширення пари до тисків 0,04…0,05 бар. Крім того, у ділянці низьких тисків парова турбіна значно більш економічна, ніж парова машина. Для отримання додаткової роботи й підвищення економічності всієї паросилової установки відпрацьована пара парової машини додатково розширюється в турбіні.

Пара з поршневої машини надходить в турбіну за тиску 0,55…0,60 бар, що дозволяє останній розвивати до 30 % загальної потужності установки. Турбіни відпрацьованої пари не мають ступенів заднього ходу, тому під час маневрів їх відключають, спрямовуючи пару з циліндра низького тиску парової машини безпосередньо в конденсатор.

Аналогічний проєкт комбінованої установки потужністю 20 тис. к. с. було розроблено для броненосного крейсера «Рюрик» водотоннажністю 15 тис. т, який будувався в Англії. На жаль, морське міністерство не погодилося з цією розумною пропозицією, яка дозволяла зменшити витрату палива на 20 % при зниженні маси установки на 60 т, і судно було оснащено звичайною енергетичною установкою з паровою машиною.

На міноносці «Ластівка», придбаному у 1904 р. в Англії, була застосована тривальна комбінована турбомашинна установка, у якій на бортові вали (кожен з двома гвинтами) працювали парові турбіни, а на середній вал з одним ГГ – парова машина, яка забезпечувала реверс і економічний хід. На повному ходу парові машина й турбіни працюють спільно.

У 1907 році в Англії для Нової Зеландії був побудований пароплав «Otaky» водотоннажністю 950 т, обладнаний комбінованою тривальною установкою потужністю 3350 к. с. У цій енергетичній установці парові машина й турбіна були термодинамічно зв’язані між собою послідовним увімкненням за парою. Це дало можливість використання переваг обох

типів двигунів: парової машини в області пари високого тиску з її високою густиною і парової турбіни в області низького тиску пари. Валопроводи, розташовані по бортам, приводяться в дію паровими машинами, відпрацьована у них пара подається до турбіни, яка обертає середній вал. Порівняно з однотипним пароплавом, оснащеним паровою машиною, економія палива на «Otaky» становила біля 11 %. Дещо пізніше, у 1908–1912 рр., подібні комбіновані установки були встановлені на декількох суднах, серед яких розкішні трансатлантичні лайнери – пароплави «Olympic» та «Titanic». На цих суднах було по три гвинта. Бортові вали приводилися від поршневих машин, а на середній працювала турбіна відпрацьованої пари.

Цікава інформація! 1911 р., Англія. Побудовано пасажирський лайнер «Titanic», однотипний зі спущеним на воду роком раніше лайнером «Olympic». Водотоннажність судна – 52 320 т, довжина – 252 м, ширина – 28 м, осадка – 11 м, пасажиромісткість – 2500 пасажирів. Енергетична установка потужністю 36 800 кВт складалася з двох чотирициліндрових парових машин трійного розширення потужністю по 11 800 кВт і однієї турбіни відпрацьованої пари потужністю 13 200 кВт, які працювали на три ГГ: парові машини – на бокові, турбіна – на центральний. Пара для парових машин тиском 1,4 МПа вироблялася 29 котлами, які працювали на вугіллі, 24 з них були шеститопкові, 5 – тритопкові (на «Olympic» було застосовано нафтове опалення котлів). Перепуск пари з парових машин до турбіни відпрацьованої пари відбувався за тиску 0,17…0,2 МПа.

Судно «загинуло» 14 квітня 1912 р. у першому ж рейсі. Ця трагічна подія багато в чому ініціювала прийняття Міжнародних норм з рятування людського життя на морі.

На початок 20-х років XX століття конструкція суднових турбін набула значних змін. У більшості випадків стали застосовувати двокорпусні турбіни з послідовним розширенням пари в корпусах ТВТ і ТНТ.

Основні елементи двокорпусного турбозубчастого агрегата побудови 1922 р. наведені на рис. 3.6, 3.7, 3.8.

Частота обертання ТВТ складає 4500 хв$^{-1}$, ТНТ – 3400 хв$^{-1}$, турбіни з'єднані з валом гребного гвинта, частота обертання якого 75 хв$^{-1}$, через двоступеневу зубчасту передачу. Потужність ГТЗА 11 250 кВт за тиску свіжої пари 1,45 МПа.

ТВТ переднього ходу виконана у вигляді диску з двома ступенями швидкості, до якого пара підводиться через патрубок *1* (рис. 3.6), та 24 реактивних ступенів. Після розширення пари в реактивних ступенях вона спрямовується до ТНТ через патрубок *4*. ТВТ заднього ходу являє собою диск з двома ступнями швидкості, пара до неї надходить через патрубок *2* та виходить до ТНТ через патрубок *3*.

До складу ТНТ переднього ходу входить 22 реактивних ступенів, а ТНТ заднього ходу – 8 реактивних ступенів. Барабани роторів турбін

з одного боку виконані суцільними з валом, а з іншого з'єднуються з ним за допомогою шпильок. Запобіжні вимикачі *5* автоматично перекривають доступ пари в разі підвищення частоти обертання на 10 % вище за розрахункову (рис. 3.6). Під ТНТ розташований конденсатор. Загальний вигляд даного ГТЗА наведений на рис. 3.8.

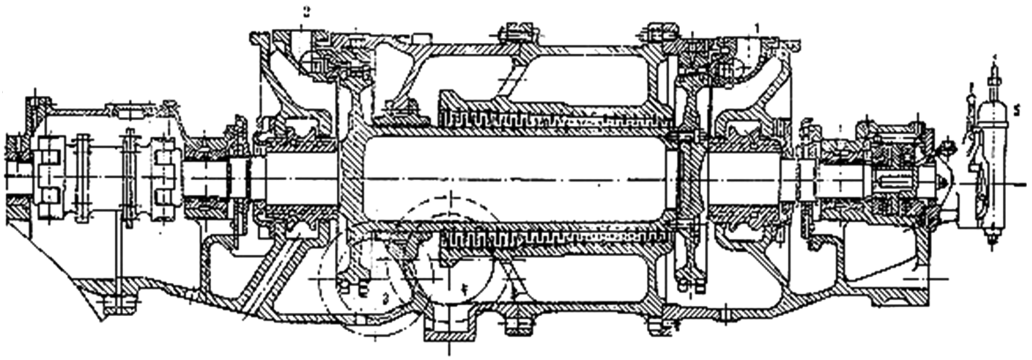


Рис. 3.6. ТВТ ГТЗА побудови 1922 р.

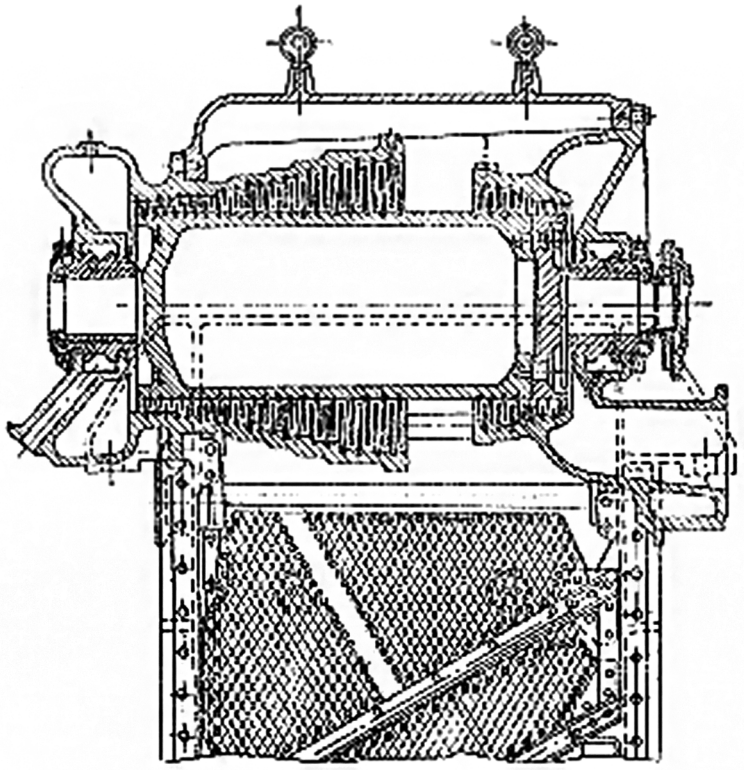


Рис. 3.7. ТНТ ГТЗА побудови 1922 р.

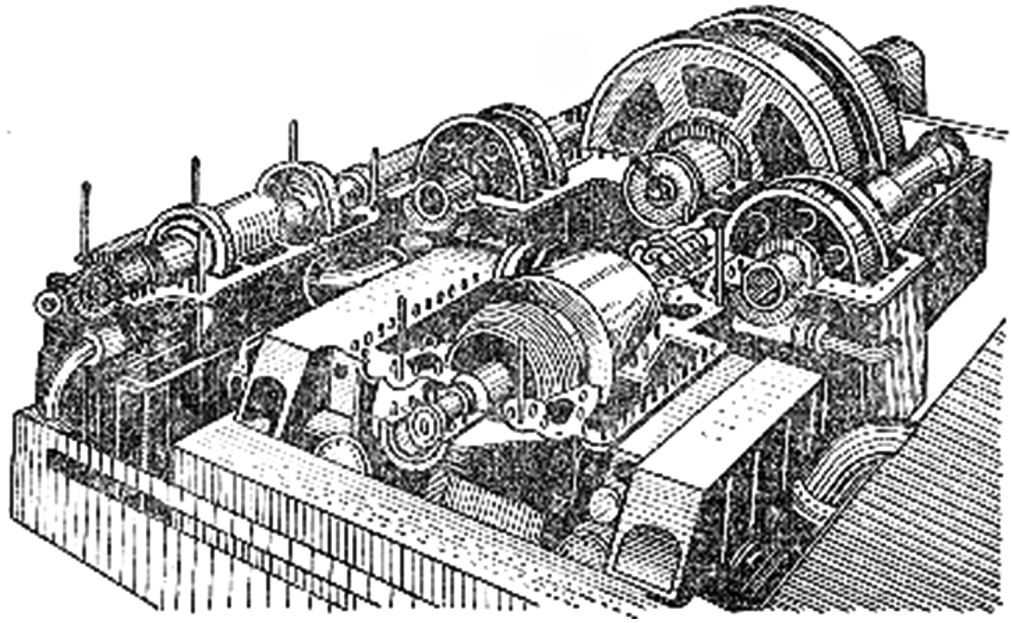


Рис. 3.8. Загальний вигляд ГТЗА

Подальший розвиток суднових турбін був спрямований на збільшення потужності турбоагрегатів і підвищення початкових параметрів пари.

На кінець 20-х – початок 30-х рр. суднові ПТ використовувалися з реактивними ступенями і з одним активним регулювальним ступенем. Турбінні агрегати складалися з трьох турбін – високого, середнього (ТСТ) і низького тисків та одноступеневого зубчастого редуктора.

Корисна інформація! Прикладом суднової ПТУ високої потужності є установка італійського пасажирського пароплава «Rex» водотоннажністю 51 075 т, призначеного для перевезення 2250 пасажирів, який був побудований у 1932 р. На чотиригвинтовому судні було встановлено чотири турбозубчасті агрегати загальною потужністю 95 000 кВт, що забезпечувало судну швидкість 28,92 вузлів [8]. Ця швидкість була рекордною на ті часи і у 1933 р. «Rex» став володарем призу «Блакитна стрічка Атлантики» [16]. Параметри пари наступні: початковий тиск складав 2,7 МПа, температура – 380 °С. Частота обертання ТВТ та ТНТ 2500 хв$^{-1}$. Кожен агрегат включає в себе три турбіни та одноступеневий редуктор. Турбіна високого тиску має активний регулювальний ступінь і 42 реактивних ступенів; ТСТ має 22 реактивних ступенів, в одному корпусі з ТСТ розташована ТВТ заднього ходу, яка складається з активного колеса з двома ступенями швидкості. У ТНТ переднього та заднього ходів пара рухається подвійним потоком. Ці турбіни складаються: перша із 8 реактивних ступенів, друга – із 7 реактивних ступенів. Робочі лопатки переднього ходу розташовані на дисках, а робочі лопатки заднього ходу – на порожнистому барабані. Довжини корпусів високого, середнього та низького тисків складають відповідно 3,7, 5,6 та 6,9 м, зовнішні діаметри корпусів – 1,6; 2,5 і 3,6 м.

Подальше підвищення початкових параметрів пари і скорочення кількості ступенів дозволили зменшити габарити й масу турбін. У зв'язку із цим усе більшого поширення в суднових турбінах набув активний принцип. Активні ступені застосовували спочатку в ТВТ, а потім і у ТНТ. Трикорпусні агрегати стали використовувати рідко у зв'язку з тим, що всі ступені за їх невеликої кількості можна розмістити у двох корпусах.

Ураховуючи те, що один ступінь зубчастого редуктора паротурбінного агрегата за високої частоти обертання роторів турбіни (2000…4000 $хв^{-1}$) не може забезпечити потрібного зниження частоти обертання вихідного вала (тому що великі розміри веденого колеса складно розмістити в корпусі) значного поширення почали набувати двоступеневі зубчасті редуктори. Це дозволило виконувати турбіни більш швидкохідними (3000…6000 $хв^{-1}$), а тому й більш легкими та компактними. Потужність окремих паротурбінних агрегатів до 1940 р. досягла 50 000 к. с.

Електрична передача на суднах з турбінними агрегатами застосовувалася обмежено через недоліки, притаманні їй: значна вартість установки; великі габарити гребних електродвигунів; значні витрати при подвійному перетворенні енергії, які сягають 8–10 % проти 2–3 % при зубчастій передачі. Перевагами установок з електричною передачею є у більш простій конструкції турбін – відсутності турбін заднього ходу. Головні турбіни агрегатів з електричною передачею виконувалися однокорпусними.

Характерним прикладом застосування турбін зі спрощеною загальною будовою є турбіни ГТЗА фірми «Frezer&Chulmers», побудованого на початку 30-х рр. XX ст. Потужність агрегата 5800 кВт за частоти обертання 4000 $хв^{-1}$. ТВТ і ТНТ передають обертання через двоступеневий редуктор на вал ГГ, частота обертання якого складає 75 $хв^{-1}$.

До складу ГТЗА входять ТВТ переднього ходу, ТВТ заднього ходу, турбіни низького тиску переднього та заднього ходу (рис. 3.9).

ТВТ переднього ходу складається з регулювального ступеня у вигляді диска Кертіса з двома ступенями швидкості (пара до неї підводиться через патрубок *1*) та трьох активних ступенів тиску, після яких пара спрямовується через патрубок *2* до ТНТ. ТВТ заднього ходу (ЗХ), виконана у вигляді колеса Кертіса з двома ступенями швидкості, розташована у спільному з ТВТ переднього ходу (ПХ) корпусі. Пара до ТВТ ЗХ подається через патрубок *3*, а потім через патрубок *4* надходить до ТНТ. До складу ТНТ ПХ входить шість активних ступенів тиску, ТНТ ЗХ – два активні ступені тиску (рис. 3.10).

У подальших конструкціях суднових парових турбозубчастих агрегатів набула зміни концепція турбіни заднього ходу. Зважаючи на значні вентиляційні втрати, які мали місце під час роботи вхолосту ступенів

заднього ходу, у корпусі ТВТ через високі параметри пари (через її густину) ступені заднього ходу почали розташовувати тільки у ТНТ. Відсутність ступенів заднього ходу у ТВТ сприяла суттєвому спрощенню загальної будови турбіни й підвищила її ефективність.

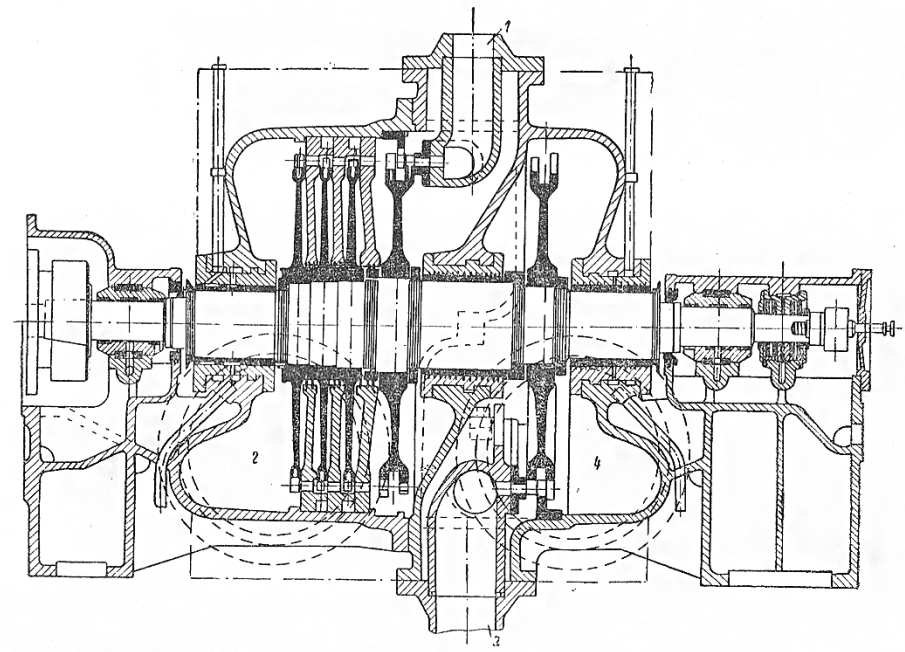


Рис. 3.9. Турбіна високого тиску «Frezer&Chulmers»

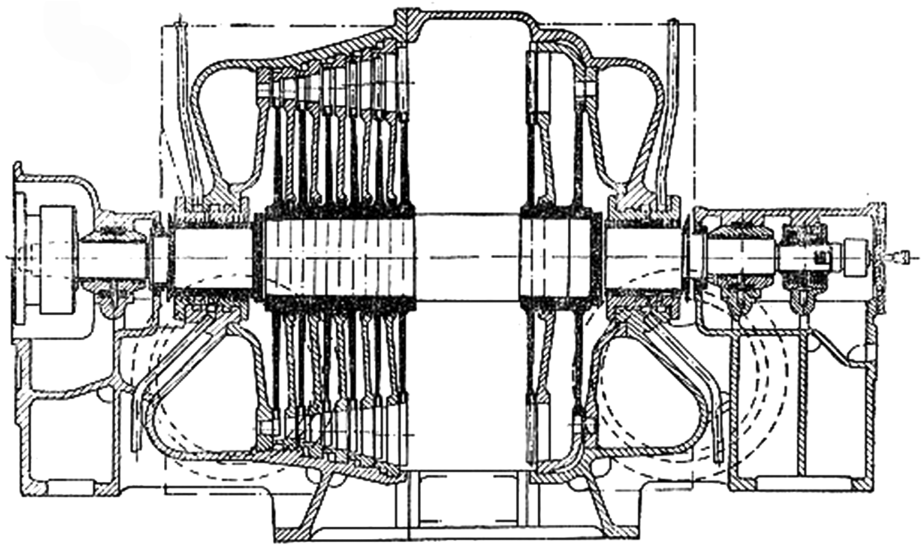


Рис. 3.10. Турбіна низького тиску «Frezer&Chulmers»

Типовими для 40-х рр. XX ст. є турбіни ГТЗА стандартного вантажного судна, побудованого у США. ТВТ складається із восьми активних ступенів тиску, перший ступінь, якій є регулювальним має підвищений діаметр (рис. 3.11). Подача пари до регулювального ступеня відбувається через соплові (регулювальні) клапани.

Після четвертого активного ступеня виконаний відбір пари для підігріву живильної води. Диски та вал виконані із суцільної поковки.

Особливістю турбін 40-х рр. американської побудови є широке застосування графітових (контактних) ущільнень. З боку впуску пари ущільнення виконане лабіринтовим з додатковими чотирма графітовими кільцями.

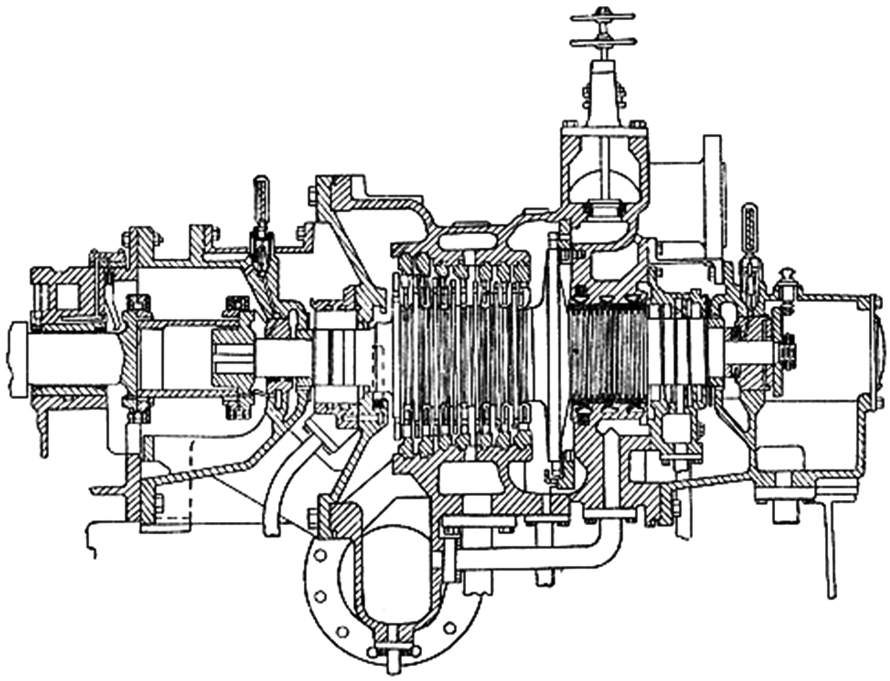


Рис. 3.11. Турбіна високого тиску стандартного вантажного судна

У ТНТ розташовані 8 активних ступенів тиску та 2 ступені заднього ходу, першій із них має 2 ступені швидкості (рис. 3.12).

Ущільнення з обох сторін здійснюється графітовими кільцями. Під ТНТ розташовується конденсатор.

Принципова відмінність ГТЗА, що розглядається, від побудованих раніше складається в тому, що в ньому застосований одновінцевий регулювальний ступінь, що характерно для майже всіх наступних конструкцій, навіть у сучасному періоду розвитку суднових парових турбін.

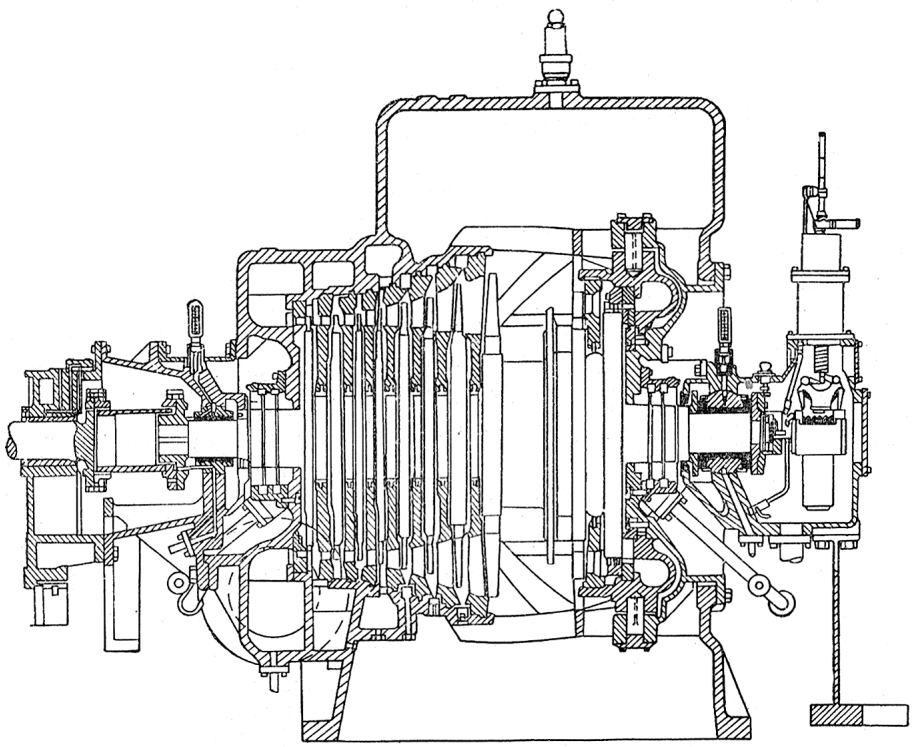


Рис. 3.12. ТНТ стандартного вантажного судна

Більш просту будову мають головні турбіни турбоелектричних установок, що пояснюється відсутністю ступенів заднього ходу та легкістю розташування потрібної кількості ступенів у одному корпусі.

На рис. 3.13 наведена загальна будова турбіни турбоелектрохода, призначеної для приводу електричного генератора потужністю 5500 кВт за 3715 хв$^{-1}$. Параметри свіжої пари: тиск 3,1 МПа, температура 382 °С. Тиск у конденсаторі складає 0,005 МПа.

До складу турбіни входять регулювальний ступінь з двома ступенями швидкості та десять активних ступенів тиску. Відбір пари для підігріву живильної води передбачений після першого, четвертого й шостого ступенів.

Подальшого розвитку в 40-ві рр. XX ст. набули суднові турбопоршневі комбіновані установки з турбінами відпрацьованої пари. Вважаючи на те, що в поршневих парових машинах неможливе розширення пари до тисків нижче 0,020–0,015 МПа, а в парових турбінах можливе розширення пари до тисків 0,005–0,006 МПа, то додаткове розширення в турбіні пари, відпрацьованої в паровій машині, підвищує економічність усієї установки та її сумарну потужність. Пара із парової машини до турбіни надходить за

тиску 0,05–0,06 МПа, що дозволяє турбіні розвивати до 30 % усієї потужності установки.

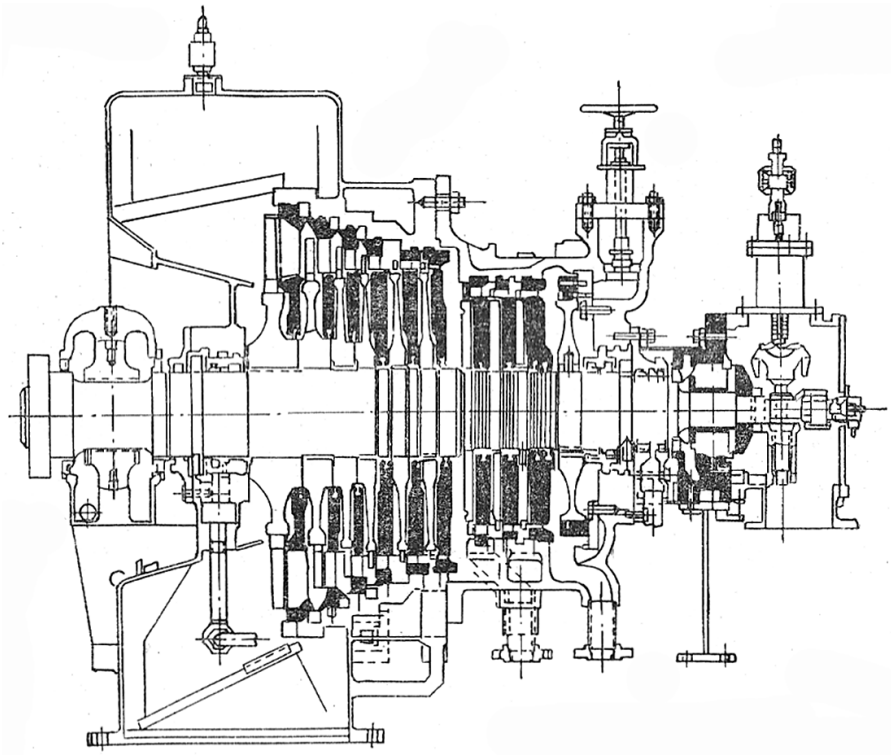


Рис. 3.13. Турбіна турбоелектрохода

Загальна будова такої турбопоршневої комбінованої установки наведена на рис. 3.14. Відпрацьована пара від поршневої парової машини надходить до реактивної турбіни *3*, до складу якої входить 7 ступенів тиску. Шестерня *2* розташована на кінці вала турбіни, знаходиться в зачеплені з колесом *6*, яке валом *4* з'єднано з лівим ведучим колесом *1* гідромуфти. Ведене колесо *8* гідромуфти розташоване на порожнистому валу *7*, на якому закріплена шестерня *5*, зчеплена з великим колесом *9*. Колесо *9* закріплено на порожнистому валу *12*, який валом *11* з'єднується з фланцем *10* валу *13* парової машини, який проходить усередині валів *12* та *11*.

Вважаючи на те, що парова машина має більший ККД в області високих тисків, а турбіна – в області низьких тисків, то комбіновані турбопоршневі установки за потужностей до 3000 кВт та помірних тисків могли мати більшу економічність, ніж чисто турбінні установки такої ж потужності.

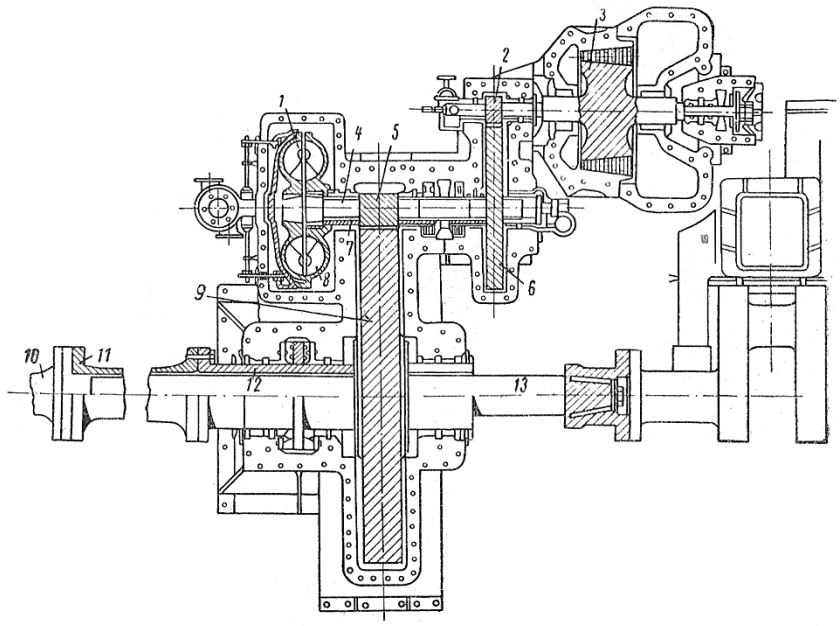


Рис. 3.14. Турбопоршнева комбінована установка

3.4. Розвиток теплових схем суднових паросилових та паротурбінних установок

Перші парові установки як головний двигун використовували парові машини. У суднових енергетичних установках з паровими машинами першої половини XIX ст. уся пара, що вироблялася котлами, споживалась виключно головними паровими машинами. Живильні та конденсатно-повітряні насоси виконувались навішеними, тобто отримували привід від головного двигуна. Теплова схема такої установки наведена на рис. 3.15. Насичена пара із парових котлів *1* подається до парової машини *2*. Відпрацьована пара надходить до змішувального конденсатора *3*, до якого, під дією розрідження надходила забортна вода. Суміш охолоджувальної води, конденсату та повітря відкачувалась з конденсатора конденсатно-повітряним насосом *4*, більша частина цієї суміші відкачувалась за борт, а інша спрямовувалась до теплого ящика *5*, звідкіля вода живильним насосом *6* подавалась до парових котлів.

Середина XIX ст. ознаменувалась застосуванням у суднових паросилових установках поверхневих конденсаторів та застосуванням допоміжних механізмів з паровим приводом, застосуванням пари для опалення та господарсько-побутових потреб. По-перше, відпрацьована пара

допоміжних механізмів (ДМ) і конденсат із системи опалення на ходу судна скидали до конденсатора, а на стоянці відпрацьована пара скидалась до атмосфери.

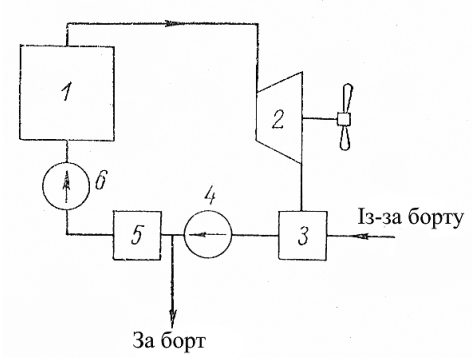


Рис. 3.15. Теплова схема установки зі змішувальним конденсатором

Надалі, з метою підвищення економічності паросилових установок відпрацьовану пару ДМ почали застосовувати для підігріву живильної води. Конденсат системи опалення потрапляв до теплого ящика. Відпрацьована пара ДМ на стоянці подавалась до головного чи допоміжного конденсатора.

Теплова схема паросилової установки, характерна для першого десятиліття XX ст., наведена на рис. 3.16.

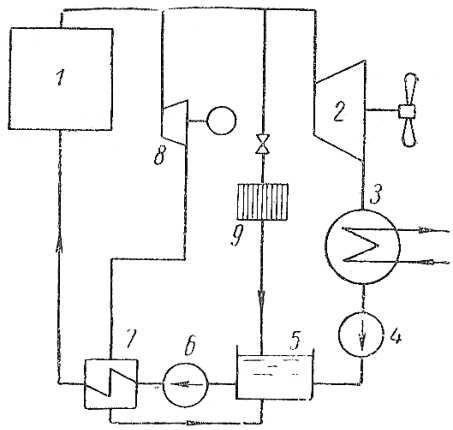


Рис. 3.16. Теплова схема установки
з одним ступенем підігріву живильної води

Насичена пара котлів *1* надходила до головної парової машини *2*. Відпрацьована пара надходила до поверхневого конденсатора *3*,

охолоджуваного забортною водою. З конденсатора *3* конденсат конденсатним насосом *4* перекачувався до теплого ящика *5*. Живильний насос *6* подавав воду з теплого ящика до котлів через поверхневий підігрівник *7*. Відпрацьована пара з таких ДМ, як рульова машина, парові насоси, пародинамо, котельний вентилятор *8* надходила на обігрів цього підігрівника. Опалювальна система використовувала свіжу редуковану пару, конденсат цієї системи *9* потрапляв до теплого ящика. Підігрів живильної води в установках, виконаних за цією схемою, забезпечував підвищення її температури до 90–95°С.

У другому десятилітті ХХ ст. у паросилових установках як із паровими машинами, так із паровими турбінами стали застосовувати перегріту пару для підігріву живильної води (ЖВ). Почали застосовувати пару, що відбиралась із турбін, або із ресивера між ними, двоступінчастий підігрів живильної води підвищував ККД енергетичних установок на 7–10 %.

Усі ці проєктні рішення у тому чи іншому вигляді, частково або повністю використовуються у теплових схемах сучасних паротурбінних установок.

Принципова теплова схема паросилової установки з двоступінчастим підігрівом живильної води наведена на рис. 3.17.

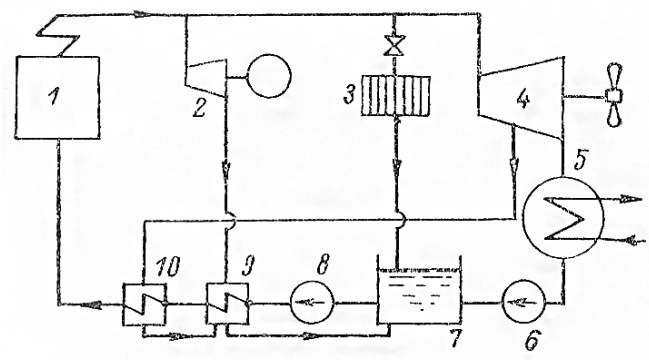


Рис. 3.17. Теплова схема установки
з двома ступенями підігріву живильної води

Пара з котла *1* надходить на головний двигун *4* – парову турбіну або парову машину, а також у парові двигуни *2* ДМ. Відпрацьована пара головного двигуна надходить до конденсатора *5*, з якого конденсат конденсатним насосом *6* подається до теплого ящика *7*. Живильний насос *8* подає воду з теплого ящика через підігрівники живильної води (ПЖВ) *9* та *10* до котла *1*. У підігрівнику *9* застосовується відпрацьована

пара ДМ тиском 0,15–0,25 МПа, що забезпечує підігрів ЖВ до температури 110–115°С.

До підігрівника *10* подається пара з тиском 0,4–0,6 МПа, яка відбирається із головного двигуна, що дає можливість довести температуру живильної води до 130–145 °С. Конденсат гріючої пари з ПЖВ *10* подається до ПЖВ *9*, а із нього – до теплого ящика, куди надходить і конденсат із системи опалення і господарських потреб *3*.

На стоянці судна відпрацьована пара ДМ конденсується у допоміжному конденсаторі, конденсат із якого потрапляє до теплого ящика.

Усі розглянуті вище теплові схеми передбачають застосування відкритої системи живлення котлів, основним недоліком якої є насичення живильної води у теплому ящику атмосферним повітрям, що може призвести до корозії метала котлів у разі підвищеного тиску пари.

Розпочинаючи із 40-х рр. XX ст. у ПТУ застосовують закриту систему живлення котлів, за якою конденсат та ЖВ не контактують з атмосферним повітрям. Поряд із цим, для зниження вмісту кисню у ЖВ до встановлювальних норм, застосовують спеціальні апарати – деаератори. Відбір пари з головної турбіни найчастіше відбувається у трьох точках, причому деаератор є другим ступенем підігріву ЖВ.

Спрощена теплова схема суднової паротурбінної установки, яка є основою теплових схем сучасних суднових ПТУ, наведена на рис. 3.18. Із котла *1* перегріта пара спрямовується до головного турбоагрегата, який складається із ТВТ *2* та ТНТ *3*, після чого надходить до конденсатора *4*, що охолоджується забортною водою. Утворений конденсат насосом *5* подається до підігрівника низького тиску (ПНТ) *6*, де підігрівається парою, яка відбирається з проміжного ступеня ТНТ. Конденсат із ПЖВ НТ спрямовується до конденсатора. Живильна вода з ПЖВ НТ подається до деаератора *7*, у якому вона підігрівається та вивільнюється від розчинених газів (деаерується). До деаератора подається пара, яка відбирається із ресивера (перепускного паропроводу) між ТВТ і ТНТ.

До деаератора пара подається під тиском 0,2–0,4 МПа, а при змішування пари з водою температура живильної води підвищується до 120–130 °С. Для надійного прийому води насосів *8* деаератор розташовується на висоті 10–12 м над ним. Із деаератора ЖВ насосом *8* подається до підігрівника живильної води високого тиску. Підігрів ЖВ у ПВТ відбувається парою, що відбирається із проміжного ступеня ТВТ. Дренажний конденсат із цього підігрівника спрямовується до деаератора.

На спрощеній схемі не показані допоміжні споживачі пари та додаткові теплообмінні апарати. Перегріта пара звичайно подається ще і до допоміжних турбогенераторів, а охолоджена пара із котла використовується

як робоча пара у пароструминних повітряних ежекторах, турбоприводних живильних насосах і підігрівниках палива.

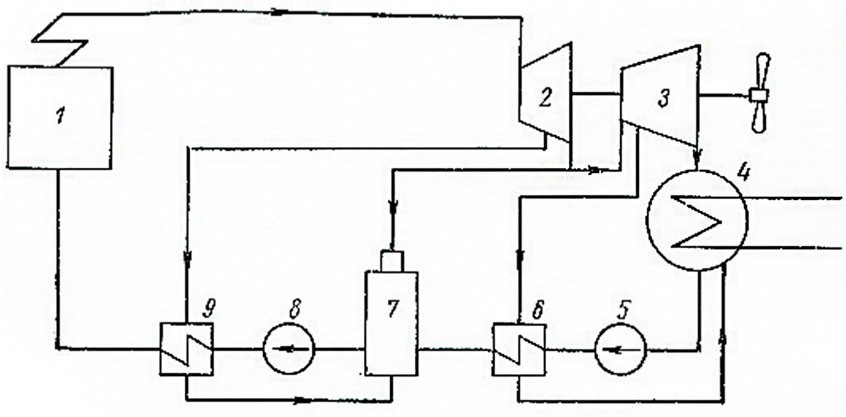


Рис. 3.18. Спрощена теплова схема суднової ПТУ

У реальних установках на напірній магістралі конденсатного насоса (до ПЖВ НТ) установлюються такі теплообмінні апарати, як конденсатори відпрацьованої пари пароструминних ежекторів, конденсатор випарної установки, конденсатор пари, що відсмоктується від ущільнень турбін, охолодник дренажних конденсатів. Дренажний конденсат із цих теплообмінних апаратів спрямовується до стічної цистерни гарячих конденсатів, із якої дренажним насосом подається до деаератора. Тепло, що виділяється під час конденсації пари й охолодженні її конденсату у названих вище апаратах, використовується для підігріву ЖВ, що підвищує економічність ПТУ.

Принципова схема суднової ПТУ. Визначення, характеристики

У паротурбінній установці робоче тіло безперервно циркулює по замкненому контуру, воно піддається циклічній зміні свого стану (вода–пара–вода …).

Головними елементами найпростішої ПТУ (рис. 3.19) є паровий котел ПК, парова турбіна Т, конденсатор К та живильний насос ЖН. У паровому котлі за рахунок теплоти згоряння палива вода підігрівається до температури кипіння, кипить за постійної температури, після чого отримана пара перегрівається до заданої температури T_1. Ці процеси здійснюються за постійного тиску p_1. Теплота, витрачена на утворення пари та її перегрів, q_1, кДж/кг, дорівнює різниці ентальпій перегрітої пари й води, що надходить до котла.

Далі перегріта пара з тиском p_1 та температурою T_1 надходить до турбіни й розширюється у ній. Отримана механічна енергія від вала

турбіни Т через редуктор Р передається гребному гвинту, упор якого сприймається ГУП для руху судна.

Відпрацьована у турбіні пара подається в конденсатор К, у якому за постійного тиску й температури конденсації віддає свою теплоту забортній воді ЗВ і перетворюється на живильну воду, що насосом знову подається в паровий котел. Забортній воді передається теплота q_2, кДж/кг.

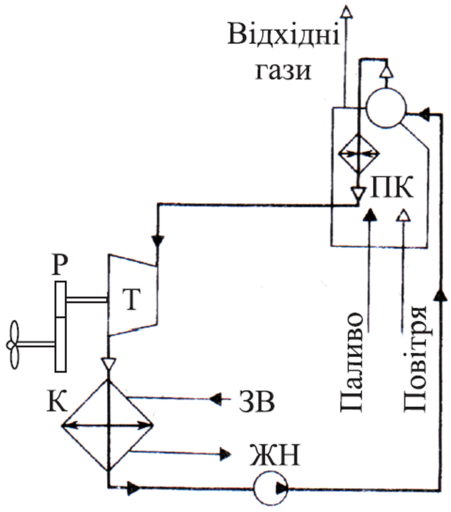


Рис. 3.19. Принципова схема найпростішої паротурбінної установки

Цикл, за яким працює така ПТУ, називається *циклом Ренкіна* на честь відомого шотландського вченого. Термічний ККД цього циклу

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

Термічний ККД враховує тільки втрати, пов'язані з відведенням теплоти до холодного джерела (у конденсаторі). У той же час реальні процеси перетворення енергії в ПТУ супроводжуються втратами енергії у різних її елементах. Ці втрати визначаються відповідними значеннями ККД котла $\eta_к$, ГТЗА η_e, валопроводу $\eta_{ВП}$, рушія $\eta_р$ та коефіцієнта $\eta_{д.м}$, який ураховує витрати енергії на привід допоміжних турбомеханізмів (турбонасосів, турбогенераторів, що живляться парою від головного ПК) та інші потреби ПТУ, а також витоки, втрати тиску й теплоти у пароперегрівнику, паропроводах та конденсатно-живильному трубопроводі.

З урахуванням викладеного вище, вираз для ККД пропульсивної ПТУ буде мати наступний вигляд:

$$\eta = \eta_t \cdot \eta_к \cdot \eta_e \cdot \eta_{ВП} \cdot \eta_р \cdot \eta_{д.м}.$$

З метою підвищення ефективності процесів перетворення енергії в сучасних ПТУ, тобто термічного ККД, застосовуються наступні заходи: підвищення початкових параметрів пари, регенеративний підігрів живильної води та проміжний перегрів пари (ППП). Щодо підвищення початкових параметрів пари існує ціла низка обмежень, які перешкоджають значному їх зростанню. Для сучасних ПТУ характерний наступний рівень початкових параметрів пари: тиск $p_1 = 15…20$ МПа, температура $t_1 = 510…560$ °С.

Принцип регенеративного підігріву полягає в тому, що живильну воду перед її подачею до котла підігрівають у проміжних водопідігрівниках – ПЖВ. Таким чином, у регенеративному циклі порівняно зі звичайним, нерегеративним, підвищується середня температура підведення теплоти й підвищується термічний ККД. Теоретично живильну воду при нескінченній кількості ПЖВ можна підігріти від температури конденсації до температури кипіння. Практично ж при кількості ПЖВ більше трьох, зростання η_t уповільнюється. У реальних ПТУ звичайно використовується не більше п'яти проміжних підігрівників.

Підігрівання живильної води забезпечується парою, яка відбирається від проміжних ступенів головних турбін (застосовується найчастіше), або парою, відпрацьованою у допоміжних турбомеханізмах і теплообмінних апаратах (використовується в обмеженій кількості ПТУ).

При проміжному перегріві пара, що розширилася у декількох ступенях турбіни (звичайно у проточній частині ТВТ), знову подається до котла, у якому вона нагрівається за постійного тиску (більш низькому, ніж p_1) до початкової температури й надходить у ступені наступних турбін для подальшого розширення. Збільшення термічного ККД циклу з ППП забезпечується підвищенням середньої температури у процесі підведення теплоти у котлі. Підвищення ККД установки складає 4…5 %. У сучасних ПТУ проміжний перегрів пари застосовується в комплексі з регенеративним підігрівом живильної води. На рис. 3.20 наведено теплову схему ПТУ танкера «Крим», яка працює за подібним циклом.

Паротурбінна установка має наступні початкові параметри пари: тиск – 7,65 МПа, температуру – 510 °С, ППП – до 510 °С за тиску 1,46 МПа і розвинену п'ятиступеневу систему регенеративного підігріву живильної води. У складі головного обладнання установки передбачені: головний паровий котел з основним та проміжним перегрівниками пари; ГТЗА, що включає в себе ТВТ, ТСТ і ТНТ; редуктор (на схемі не показаний), головний конденсатор. Генератор (ЕГ) суднової електростанції та головний живильний насос приводяться через допоміжний редуктор ДР від ТСТ. На режимах маневрування приводом для ЕГ та живильного насоса є допоміжна парова турбіна, відпрацьована пара якої відводиться до ГКН.

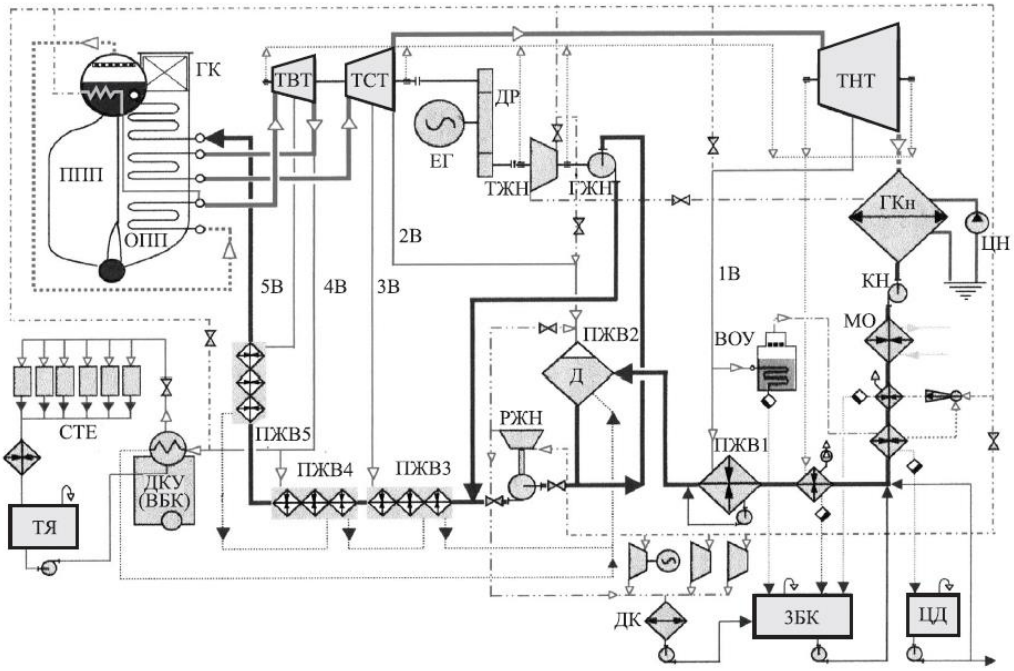


Рис. 3.20. Теплова схема паротурбінної установки ТС-3 танкера «Крим»:
1В, 2В, 3В, 4В, 5В – п’ять відборів пари; ВБК – випарник брудних конденсатів; ВОУ – водоопріснювальна установка; ГЖН – головний живильний насос; ГК – головний котел; ГКн – головний конденсатор; Д – деаератор; ДК – конденсатор допоміжних турбомеханізмів; ДКУ – допоміжна котельна установка; ДР – допоміжний редуктор; ЕГ – електрогенератор; ЗБК – збірник брудних конденсатів; КН – конденсатний насос; МО – маслоохолодник; ОПП – основний перегрівник пари; ППП – проміжний перегрівник пари; ПЖВ1, ПЖВ2, ПЖВ3, ПЖВ4, ПЖВ5 – відповідно підігрівники живильної води першого, другого, третього, четвертого та п’ятого відборів; РЖН – резервний живильний насос; СТЕ – споживачі теплової енергії; ТЖН – живильний насос з приводом від головної турбіни; ТЯ – теплий ящик; ЦД – цистерна дистиляту; ЦН – циркуляційний насос

Резервний живильний насос має свій турбопривід зі скиданням відпрацьованої пари в деаератор, а залишків пари – у ГКН. Турбіни ЕГ та РЖН працюють на охолодженій парі, яка надходить з пароохолодника ГК.

Теплова схема ПТУ передбачає п’ятиступеневий регенеративний підігрів живильної води та п’ять відборів пари з корпусів турбін. Перший ступінь регенеративного підігріву від ТНТ використовується для ПЖВ1 та роботи ВОУ. Як другий ступінь підігріву з ТСТ використовується деаератор, у який також надходить конденсат з ПЖВ1 та ПЖВ3. Третій (пара з ТСТ), четвертий (пара з ТВТ), п’ятий (пара з ТВТ) ступені підігріву складають підігрівники живильної води поверхневого типу ПЖВ3, ПЖВ4, ПЖВ5. Конденсат гріючої пари третього, четвертого та п’ятого ступенів

скидається послідовно в розташовані нижче ПЖВ, кінцевою точкою для них є деаератор. Поряд із цим, споживачем четвертого відбору є ДКУ, яка в нормальних умовах експлуатації (на ходу та стоянці) працює в режимі випарника брудних конденсатів. Цей режим забезпечується подачею пари відбору в змійовики, які розташовані в пароводяному колекторі допоміжного котла. Конденсат пари відбору скидається у деаератор, а отримана насичена пара використовується для роботи суднових СТЕ. Конденсат від цих споживачів потрапляє у теплий ящик, з якого живильним насосом подається у пароводяний колектор.

У разі виходу з ладу головного котла передбачена подача насиченої пари допоміжного котла до ТВТ, що забезпечує аварійний хід судну.

3.5. Суднові парові турбоагрегати (1950–1960 рр.)

Для цього часового періоду характерне різке зростання виробництва суднових парових турбін і різноманіття їх конструкцій.

На рис. 3.20, 3.21, 3.22 подані основні елементи трикорпусного ГТЗА суховантажного судна, побудованого у 1952 р. англійською фірмою «Metropoliten Vikkers». Застосування трикорпусної конструкції пояснюється, за думкою фахівців, недостатньою впевненістю у стабільності двокорпусної конструкції в разі високих параметрів пари.

Потужність агрегата складає 5300 кВт за 112 $хв^{-1}$ гребного гвинта. Габарити агрегата з урахуванням редуктора та конденсатора: довжина вздовж діаметральної площини судна 7470 мм, ширина 6200 мм плюс 1400 мм на виїмку трубок конденсатора, повна висота 5400 мм, температура 510 °С, на задньому ході температура пари знижується до 400 °С.

ТВТ (рис. 3.21) складається з регулювального ступеня у вигляді двовінцевого колеса швидкості та восьми активних ступенів тиску.

Верхня та нижня половини корпусу турбіни виконані з легованої молібденової сталі. Ротор ТВТ виконаний цільнокованим з ванадієвої сталі. Діафрагми набірні, тіло діафрагми з молібденової сталі, лопатки цільнофрезеровані з напівпроцентної молібденової сталі. Сопловий апарат регулювального ступеня складається з трьох груп, облаштованих сопловими клапанами з ручним управлінням: на сім сопел (потужність 3700 кВт), на три сопла (відкриття двох груп дає потужність 5300 кВт) і на два сопла (відкриття третьої групи забезпечує перевантажувальну потужність у 6000 кВт). Частота обертання ТВТ 6000 $хв^{-1}$.

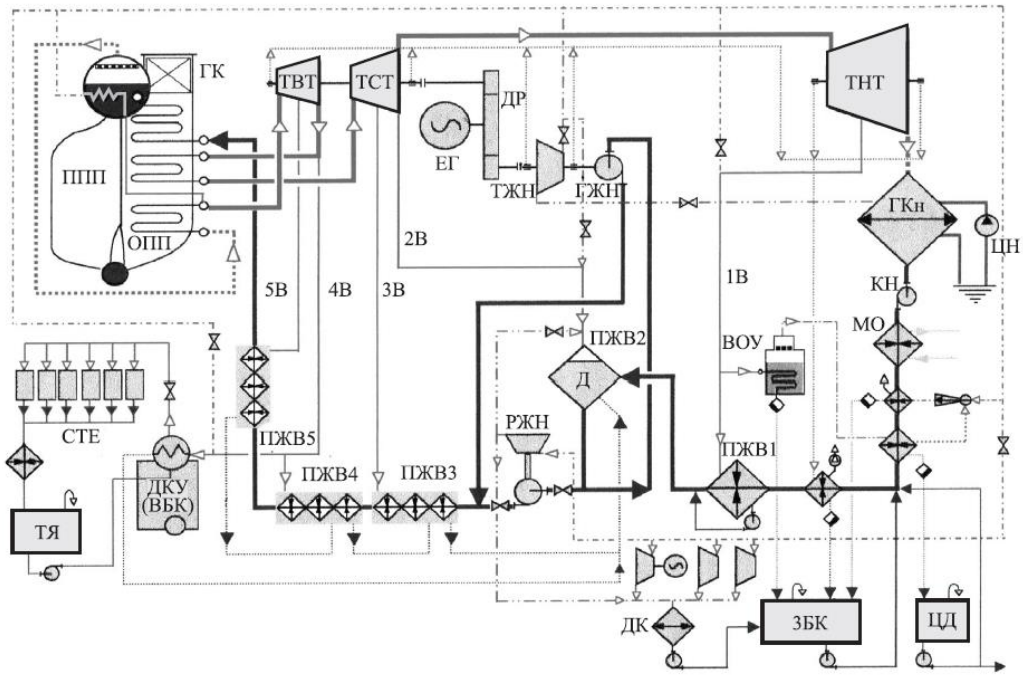


Рис. 3.21. Турбіна високого тиску суднового ТЗА фірми «Metropoliten Vikkers»

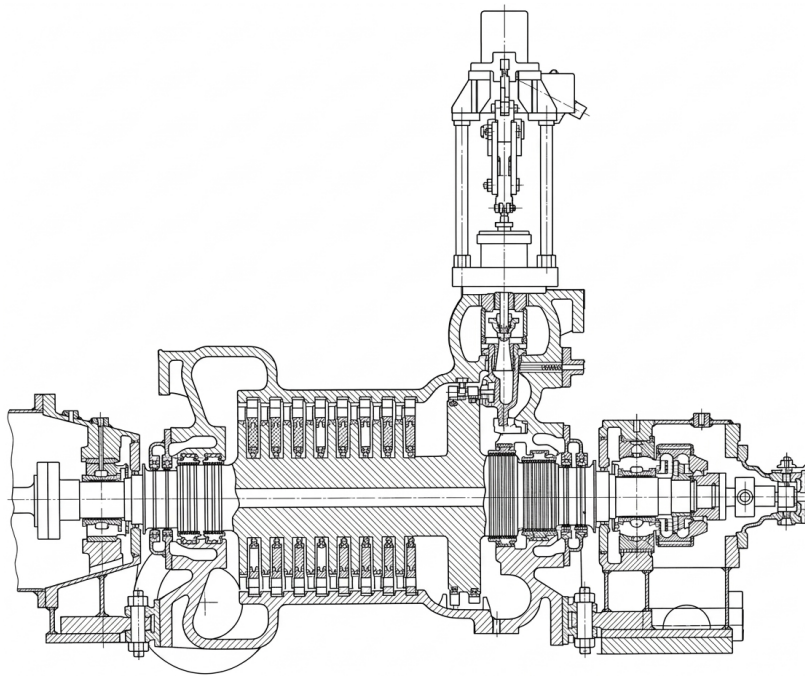


Рис. 3.22. Турбіна середнього тиску суднового ТЗА фірми «Metropoliten Vikkers»

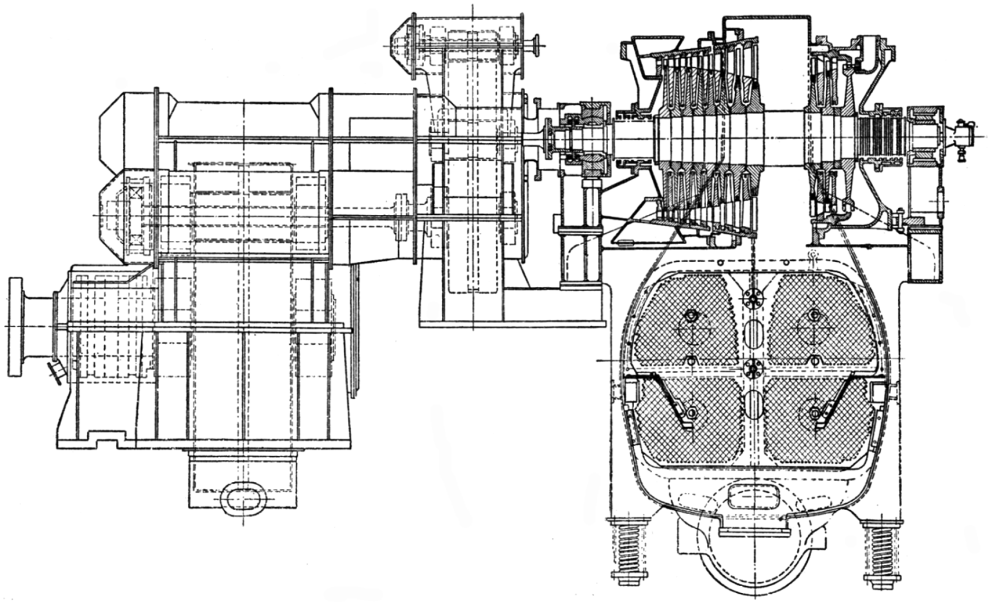


Рис. 3.23. Турбіна низького тиску суднового ТЗА фірми «Metropoliten Vikkers»

До складу ТСТ входить 13 активних ступенів тиску (рис. 3.22). Корпус турбіни виконаний з вуглецевої сталі, ротор цільнокований, діафрагми такі ж, як і у ТВТ.

ТНТ переднього ходу має вісім одновінцевих ступенів, частота її обертання 3000 хв$^{-1}$ (рис. 3.23). У корпусі ТНТ розташована турбіна заднього ходу (ТЗХ), яка складається з одного двовінцевого колеса швидкості і двох одновінцевих. Корпус ТНТ зварнолитий, нижня його частина виконана спільно з корпусом конденсатора. Тиск пари на вході до ТНТ дорівнює 0,035 МПа.

Головний конденсатор двоходовий, забезпечує підтримання вакууму 95 % за витрати 2510 т/год циркуляційної води з температурою 24 °С.

Зубчаста передача двоступінчаста, ланцюгового типу. Зубчасті колеса обох пар складеної конструкції з литими чавунними ступицями й насадними зубчастими вінцями з хромо-нікель-молібденової сталі. З цієї ж сталі виконані всі шестерні. Частота обертання проміжних валів 800 хв$^{-1}$ за 112 хв$^{-1}$ гребного гвинта.

На рис. 3.24 наведений загальний вигляд *турбозубчастого агрегата фірми «AEG»* побудови 1955 р. для пасажирського пароплава. ГТЗА працює парою з тиском 4,2 МПа та температурою 427 °С. Потужність агрегата складає 7830 кВт за 115 хв$^{-1}$ гребного гвинта. ТВТ (частота обертання 7500 хв$^{-1}$) складається з регулювального ступеня та шести активних ступенів, усі ступені одновінцеві. Ротор ТВТ цільнокований, сопловий

апарат регулювального ступеня складається з чотирьох груп сопел, які керуються вручну.

ТНТ (3800 хв$^{-1}$) складається з п'яти активних ступенів. Турбіна заднього ходу розташовуються у корпусі ТНТ, до її складу входить двовінцеве колесо швидкості і один активний одновінцевий ступінь.

Із корпусу ГТЗА здійснюються три відбори пари для підігріву живильної води за тисків 1,12; 0,38 та 0,077 МПа.

У чавунному литому корпусі редуктора розташована зубчаста передача гніздового типу.

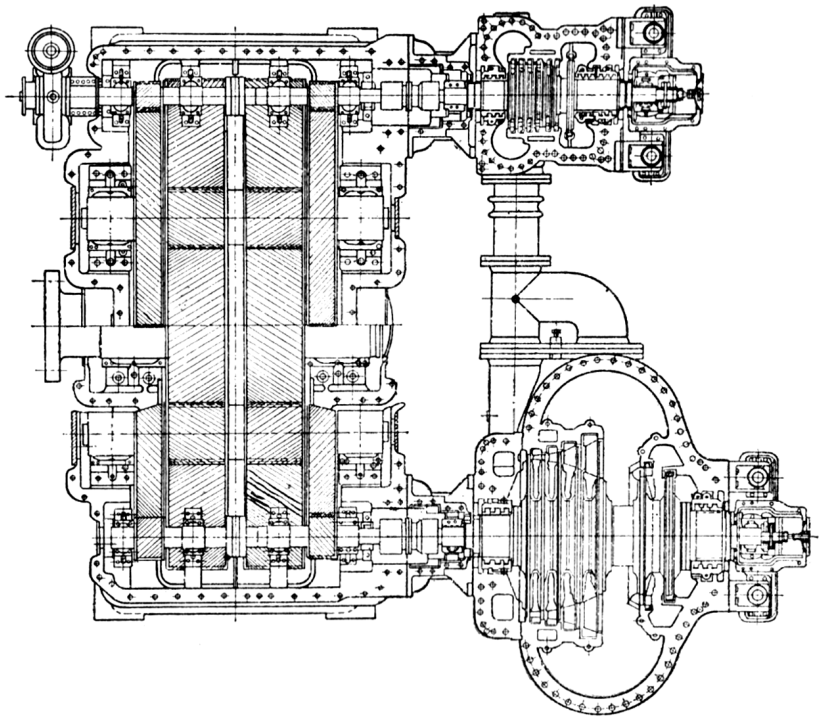


Рис. 3.24. Загальний вигляд ТЗА фірми «AEG»

Питома витрата нафтового палива на агрегат та турбогенератор складає 362 г/(кВт · год).

ГТЗА одногвинтового танкера вантажопідйомністю 25 тис. т був виготовлений у 1951 р. фірмою «Vikkers» за проєктом «Vikkers Pametrada». Початкові параметри пари: 3,2 МПа та 400 °С.

У сталевому литому корпусі *1* ТВТ розташовані чотирнадцять активних ступенів рис. 3.25. Свіжа пара подається через патрубок *2*. Перший ступінь має дві групи сопел – одну з 16 сопел (некеровану) та другу з дев'яти сопел (з керуванням клапаном). Випуск пари – через верхній патрубок *7* та

нижній *8*. На консольному кінці *9* ротора ТВТ розташована ТЗХ високого тиску, яка має проточну частину у вигляді двовінцевого колеса швидкості. З корпусу ТВТ здійснюється відбір пари для підігріву ЖВ.

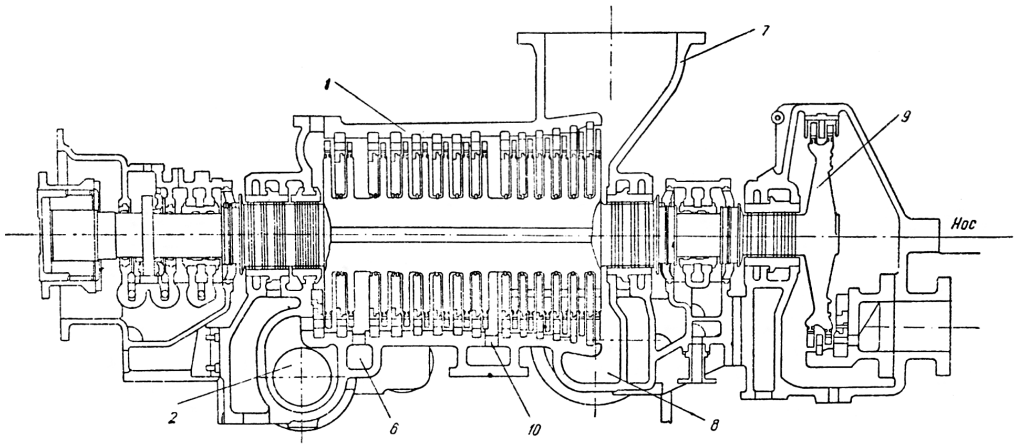


Рис. 3.25. Турбіна високого тиску ГТЗА «Vikkers Pametrada»

ТНТ (рис. 3.26) має два потоки по 15 реактивних ступенів, напрямні лопатки турбіни набрані у внутрішньому литому сталевому корпусі *1* переднього ходу. ТЗХНТ розташована у корпусі ТНТ переднього ходу, вона складається з двох одновінцевих активних ступенів. Корпус *2* ТЗХНТ відлитий зі сталі, зовнішній корпус ТНТ зварний. Корпуси *1* та *2* закріплені у корпусі *3* на лапах *4*, які допускають вільне розширення корпусів під час нагрівання. Впускний патрубок *5* з'єднаний з корпусом *3* гнучкою діафрагмою. Відбійний лист *7* призначений для захисту непрацюючих ступенів ТНТ від корозії.

Головний конденсатор регенеративного типу забезпечує підтримання вакууму 95 % за температури циркуляційної води до 24 °С.

Зубчаста передача двоступенева, ланцюгового типу.

Оригінальну конструкцію має ТВТ, розроблена у 1955 році фахівцями англійської дослідницької асоціації «Pametrada» (рис. 3.26). Ця турбіна входить до складу двокорпусного ГТЗА, її потужність складає 3000 кВт за 5870 хв$^{-1}$, призначена для роботи на парі з високою початковою температурою 475–650 °С, тиск пари на вході 4,2 МПа, на виході з ТВТ – 0,18 МПа.

До складу ТВТ входить регулювальний ступінь у вигляді двох активних ступенів та чотирнадцять активних ступенів тиску. Особливістю конструкції ТВТ є двійний корпус: внутрішній – литий сталевий, зовнішній – зварний сталевий, який одночасно є випускною порожниною

з температурою в ньому до 200 °С. Опорні підшипники розташовані на внутрішньому боці стінок зовнішнього корпуса. Внутрішній корпус облаштований рухомими кріпленнями, які забезпечують йому вільні теплові деформації.

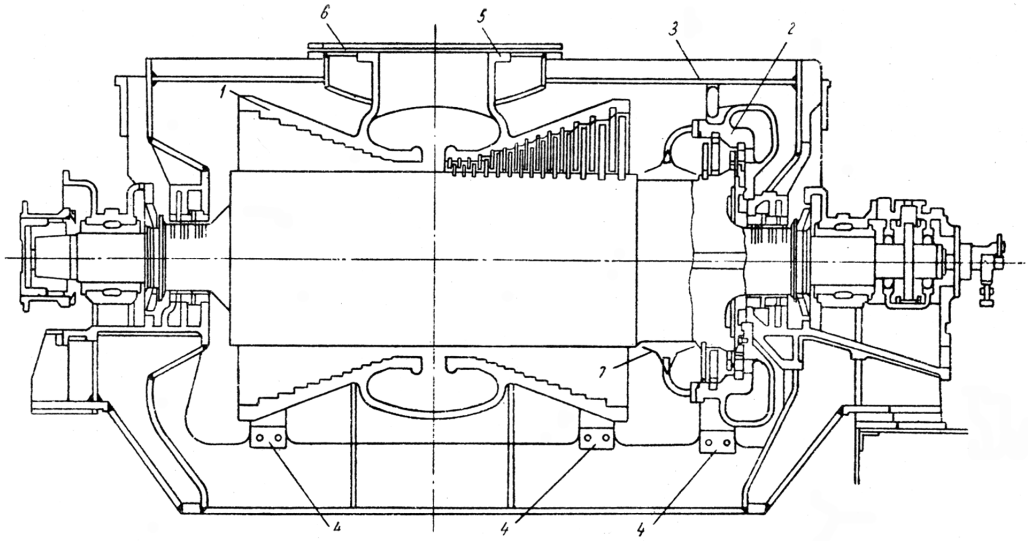


Рис. 3.26. Турбіна низького тиску ГТЗА «Vikkers Pametrada»

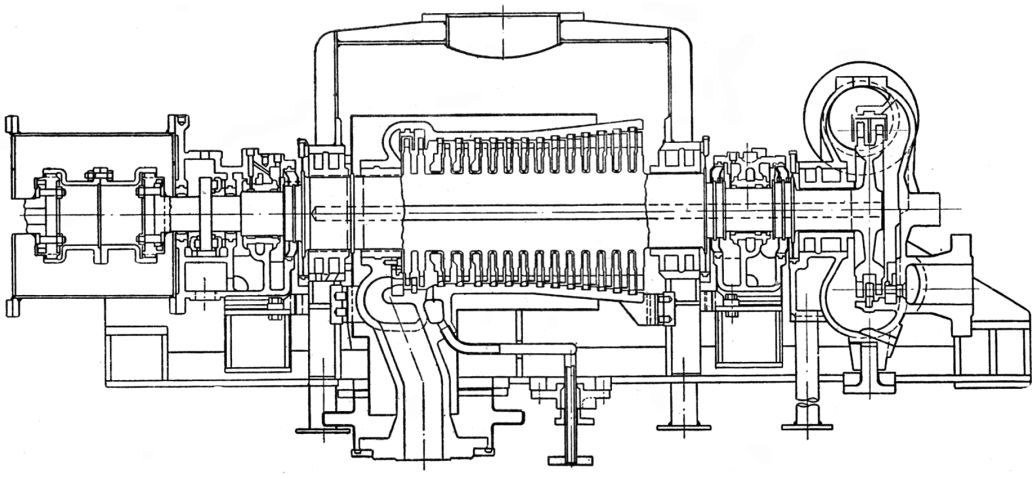


Рис. 3.27. Турбіна високого тиску асоціації «Pametrada»

Корпус турбіни заднього ходу високого тиску розташований окремо від корпусу турбіни переднього ходу, проточна частина ТВТЗХ розміщена на консольному кінці ротора ТВТПХ. Підведення пари до регулювального ступеня здійснюється знизу, за регулювальним ступенем

розташований додатковий підвід пари для забезпечення перевантажувальної потужності.

На рис. 3.28, 3.29, 3.30 наведені основні елементи ГТЗА, побудованого у 1954 р. фірмою «Vezer». Потужність агрегата – 8100 кВт за 97 хв$^{-1}$ гребного вала.

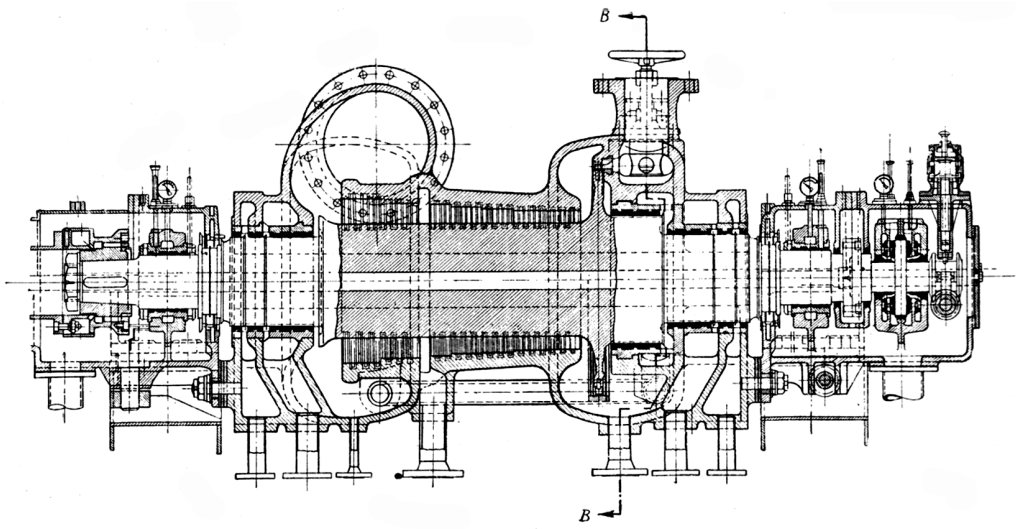


Рис. 3.28. Турбіна високого тиску фірми «Vezer»

Регулювальний ступінь ТВД (рис. 3.28, 3.29) виконано у вигляді активного одновінцевого ступеня з трьома групами сопел: на дванадцять сопел (нерегульована група), на три і п'ять сопел з різним керуванням клапанів. За регулювальним колесом розташовані двадцять реактивних ступенів з відбором пари між чотирнадцятим і п'ятнадцятим ступенями. Частота обертання ТВТ – 5000 хв$^{-1}$.

ТНТ (рис. 3.30) складається з дев'ятнадцяти реактивних ступенів з відбором пари між дванадцятим та тринадцятим ступенями, частота обертання ТНТ 3100 хв$^{-1}$. У корпусі ТНТ розташована ТЗХ,

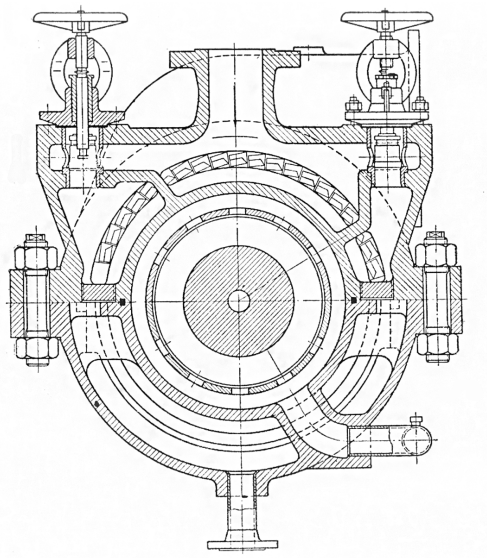


Рис. 3.29. Схема підведення пари до регулювального ступеня ГТЗА фірми «Vezer»

до складу якої входить одновінцеве колесо швидкості і два одновінцеві активні ступені тиску. Потужність ТЗХ дорівнює 40 % сумарної потужності переднього ходу. Питома витрата нафтового палива за потужності повного переднього ходу становить 340 г/(кВт · год).

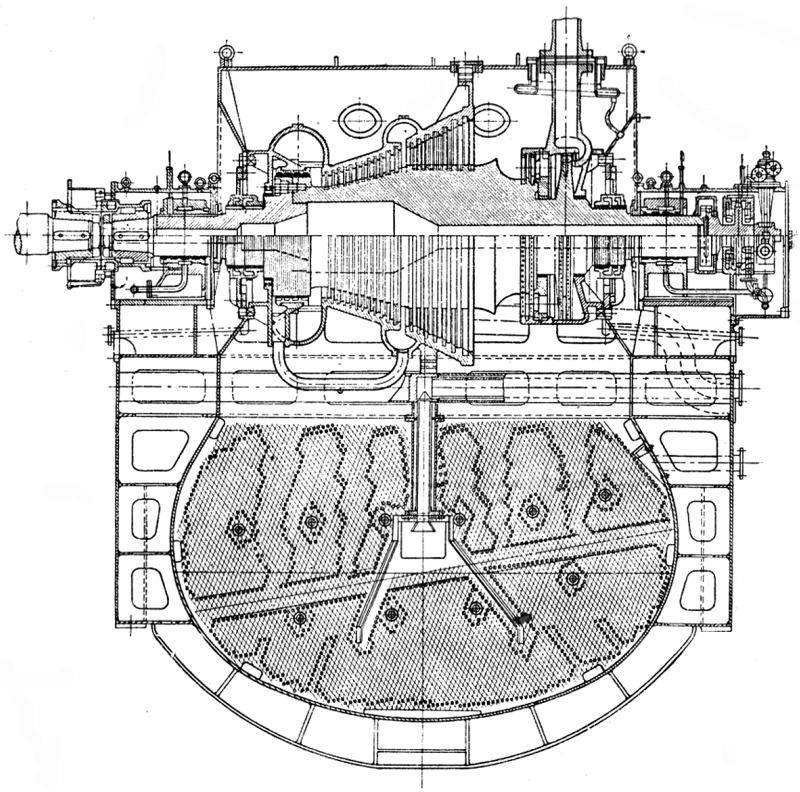


Рис. 3.30. Турбіна низького тиску ГТЗА фірми «Vezer»

ГТЗА для суховантажних суден водотоннажністю 13 400 т.

Перші головні ТЗА ТС-1 цих суден були побудовані у 1959 р., потім вони виготовлялись протягом майже 15 років і встановлювались на наступні судна однієї серії. Для ГТЗА, які будувались наприкінці 50-х та у 60-х рр. XX ст. були характерні більша швидкохідність, економічність, мінімальні маси й габарити порівняно з попередніми конструкціями. ГТЗА виконувались переважно двокорпусними з двоступеневими зубчастими редукторами. Застосовані ступені турбін були активного типу. Ступені заднього хода розташовувалися у корпусі ТНТ. Найбільш поширеними параметрами пари були: тиск 4–5 МПа, температура 450–500 °С.

ГТЗА ТС-1 повністю відповідав цим тенденціям створення паротурбінних агрегатів.

Загальні характеристики ГТЗА ТС-1:	
Потужність ТПХ, кВт:	
мінімальна за частоти обертання гребного вала 100 хв$^{-1}$	9560
максимальна при 105 хв$^{-1}$	10 520
Потужність ТЗХ за частоти обертання ГГ 73 хв$^{-1}$, кВт	3820
Початкові параметри пари перед БЗК:	
тиск, МПа	4,8
температура, °С	480
вакуум у конденсаторі, кПа	4,9
робочий тиск у котлі, МПа	4,4
питома витрата палива на установку, г/(кВт · год)	330–350
ефективний ККД агрегата	75 %

ГТЗА складається з ТВТ *3*, ТНД *5* і ТЗХ, розташованої в корпусі ТНТ, головного конденсатора *10*, двоступеневого редуктора *7* з головним упорним підшипником і валоповоротною будовою *8*, ресивера *4* (рис. 3.31).

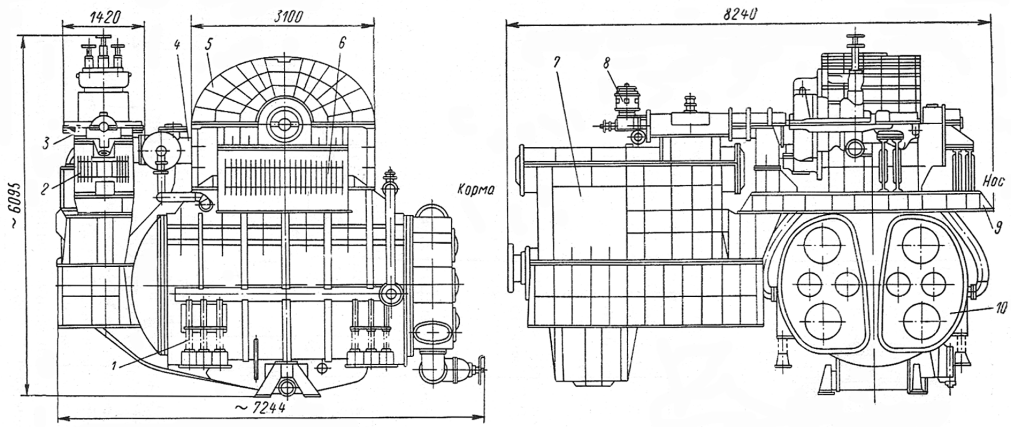


Рис. 3.31. Загальний вигляд ГТЗА суховантажного судна

ТВТ змонтована на фундаментній рамі *9*, один кінець якої опирається на редуктор, другий – на судновий фундамент. ТНТ спирається корпусом кормового підшипника на редуктор, а корпусом носового – на гнучку опору *6* і судновий фундамент. З боку редуктора турбіни закріплені нерухомо, а носові стільці встановлені на гнучкі опори *2* та *6*, які сприймають теплові розширення корпусів.

Головний конденсатор розташований під ТНТ. Він приварений приймальним патрубком до її випускної частини і спирається на чотири пружні опори *1*.

У турбозубчастому агрегаті здійснюються три відбори пари від турбін – перший на ПВТ, другий – деаератор, третій – на ПНТ.

На рис. 3.32 наведений загальний вигляд агрегата ТС-1. До складу проточної частини ТВТ активного типу входять одновінцевий регулювальний ступінь *4* та дев'ять ступенів тиску. Лопатки з'єднані у пакети по 8–12 шт. бандажем, на якому виконані ущільнювальні кільцеві пояски. У регулювальному ступені радіальні ущільнення виконані на кільці *5*, розташованому в корпусі турбіни. Ступені тиску розділені діафрагмами *3* зварно-набірного типу. Сопловий апарат *6* регулювального ступеня закріплений у сопловій коробці. Корпус *8* турбіни литий з хромомолібденової сталі, він обладнаний випускним патрубком *18*, патрубками *16* та *17* для відбору пари. Перший відбір здійснюється за п'ятим, другий – за останнім ступенем.

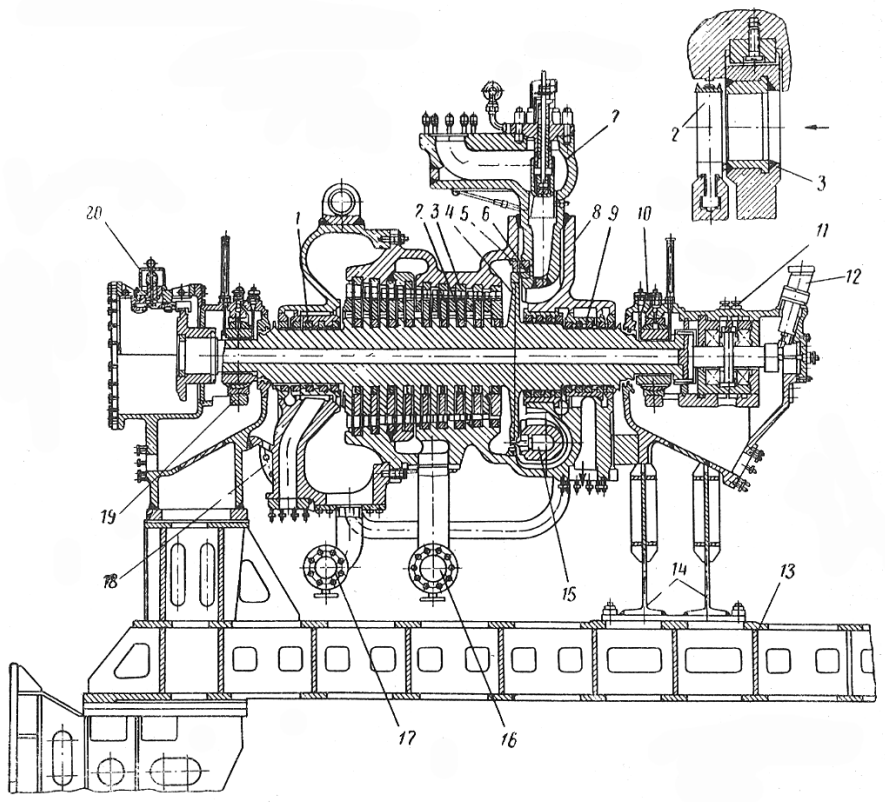


Рис. 3.32. Турбіна високого тиску ГТЗА ТС-1

Цільнокований ротор турбіни розташований на двох самоустановних опорних підшипниках – носовому *10* та кормовому *19*. До носового кінця ротора приєднаний гребінь упорного підшипника *11*, тут установлений вимикач граничної частоти обертання та блок захисту *12* від осьового

зсуву. У місцях виходу ротора із корпусу турбіни розташовані кінцеві ущільнення лабіринтового типу *1* та *9*.

З боку редуктора корпус турбіни закріплений на фундаментній рамі нерухомо, а носовий кінець корпусу – з використанням гнучкої опори *14* – рухомий для компенсації теплового осьового переміщення, застосовується для вимірювання розбігу ротора *20*.

Свіжа пара від маневрового пристрою підводиться у нижню *15* та верхню *7* соплові коробки. Нижня соплова коробка соплового клапана не має, у ній розміщена перша група сопел *15*, які працюють на всіх режимах. У верхній сопловій коробці розташовані три групи сопел, кожна з яких обладнана своїм сопловим клапаном. Комбінацією повністю відкритих соплових клапанів можна отримати необхідні значення потужності ГТЗА.

Відпрацьована в ТНТ пара надходить через випускний патрубок *18* до ТНТ. Проточна частина ТНТ складається з дев'яти активних ступенів тиску *3* (рис. 3.33). На носовому кінці турбіни розташована турбіна заднього ходу, яка складається з одного двовінцевого ступеня швидкості *8* та двох одновінцевих ступенів тиску *4*. Робочі лопатки всіх ступенів з'єднані бандажами в пакети, робочі лопатки, розпочинаючи з четвертого ступеня, виконуються зі змінним профілем по висоті. Корпус ТНТ *16* зварно-литий, з вуглецевої сталі, з горизонтальним та вертикальним розніманнями. У носовій частині корпуса у горизонтальному рознімані підвішений корпус ТЗХ *14*. Патрубок підведення свіжої пари до ТЗХ приєднаний до соплової коробки за допомогою компенсатора *6* мембранного типу.

Паровідбійний щит *15*, що перешкоджає потраплянню відпрацьованої пари з ТЗХ до ТНТ та зворотному напряму, кріпиться до корпусу ТЗХ. Корпус опорно-упорного підшипника *19* пов'язаний з корпусом ТНТ за допомогою вушка *17* та шпонки *18*, яка спільно з двома горизонтальними шпонками лап фланця нижньої половини корпуса забезпечує збереження центрування корпуса турбіни з корпусом підшипника.

Сопла *1* ТНТ набираються у пази верхньої та нижньої половини кормової частини турбіни. Сегменти сопел ТЗХ *7* виготовлені у вигляді диска з двох половин з виконаними у них сопловими каналами. Діафрагма другого ступеня *5* ТЗХ – сталева, останнього ступеня – чавунна.

Ротор турбіни низького тиску цільнокований з хромо-молібденової сталі. На його кормовому кінці виточені гребінь упорного підшипника *22* і напівмуфта *21* для з'єднання турбіни з редуктором.

На роторі проточені канавки і гребні для кінцевих ущільнень *9* та *25*. До носового кінця ротора приєднано вал *12* з робочим колесом вимірника

швидкості *13*, що подає імпульс регулятору швидкості, який утримує оберти турбін у діапазоні 103–108 % номінальних. Блок захисту від осьового зсуву, ущільнення *9* та *25*, масловідбійні будови *10* та *24*, опорні *11* та *23* та упорний *22* підшипники за будовою аналогічні відповідним деталям ТВТ і відрізняються лише розмірами.

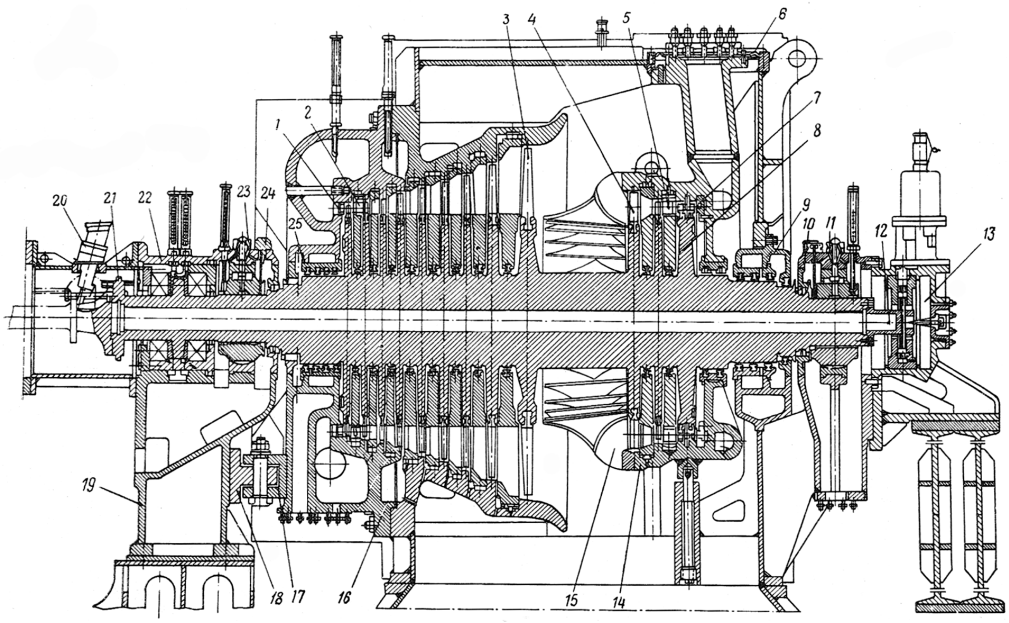


Рис. 3.33. Турбіна низького тиску ГТЗА ТС-1

Незважаючи на те, що переважно, розпочинаючи з 50-х рр., у конструкціях суднових турбін застосовувались активні ступені тиску, окремі провідні турбобудівні об'єднання у проєктах своїх суднових ГТЗА застосовували реактивні турбіни.

Прикладом застосування таких реактивних турбін є ГТЗА англійського турбобудівного об'єднання «Pametrada», побудований на початку 60-х рр. XX ст. Двокорпусний ГТЗА складається з ТВТ та ТНТ, розташованих у ніс від зубчатої передачі.

Проточна частина ТВТ включає в себе регулювальний двовінцевий ступінь і 17 реактивних ступенів (рис. 3.34). Ротор турбіни цільнокований, барабанного типу. Поршень думміса відкований спільно з ротором.

Спеціальна інформація! Думміс – елемент реактивної парової турбіни, розвантажувальний поршень, призначений для зрівноваження осьової складової тиску пари, спрямованої по ходу руху пари в турбіні, яка виникає внаслідок розширення пари на робочих лопатках реактивного ступеня. Являє собою відрізок барабанного ротора,

на якому розміщені лабіринтові ущільнення. Порожнина за думмісом трубопроводом пов'язана з останнім ступенем або вихлопним патрубком турбіни, у ній установлюється мінімальний тиск. З другого боку цей поршень знаходиться під тиском пари, що входить до турбіни. Унаслідок різниці тисків виникає зусилля на поршень, спрямоване у бік, протилежний основному осьовому зусиллю.

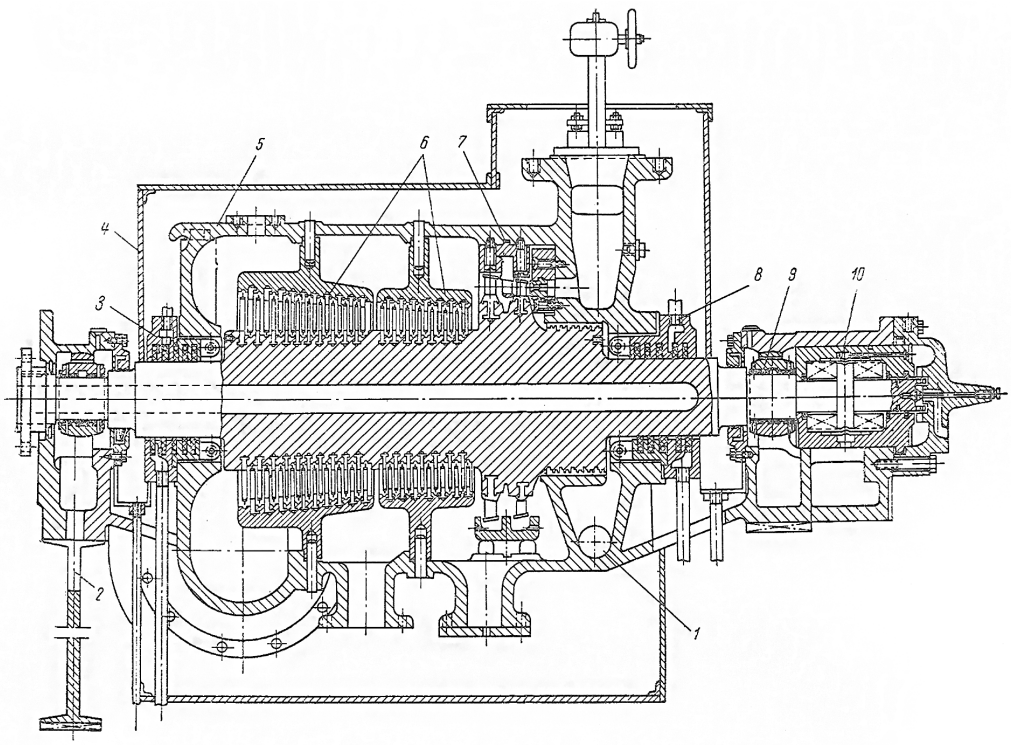


Рис. 3.34. ГТЗА об'єднання «Pametrada»

У корпусі *5* встановлені напрямні лопатки, набрані в обойми *6*, та обойма *7* з напрямними лопатками регулювального ступеня. Стільці підшипників відлиті сумісно з нижньою половиною корпусу. Кормовий стілець установлений на гнучкій опорі *2*, що забезпечує компенсацію теплових розширень корпусу. Зовні корпус закритий кожухом *4*. Опорний *9* та упорний *10* підшипники виконані самоустановлювальними. У зовнішніх ущільнювальних коробках *3* та *8* розташовано по п'ять графітових кілець. Пара, що просочується через ущільнення думміса відводиться через трубу *1*.

До складу проточної частини ТНТ входять дві групи по п'ять реактивних ступенів, два останні з яких виконані з перемінним за висотою профілем. Проточна частина ТЗХ складається з двох двовінцевих ступенів швидкості. Турбіни ПХ і ЗХ розділені загальною випускною камерою, поєднаною з конденсатором. Корпус ТЗХ виконаний у вигляді вставної

соплової коробки, що розташована у корпусі ТНТ. Думміс ТНТ розташований у кормовій частині турбіни. Інші деталі та вузли ТНТ виконані аналогічно вузлам та деталям ТВТ.

У ТЗА виконано два відбори пари: перший після першої групи реактивних ступенів, а другий із ТНТ після п'ятого ступеня. Пара з камери думміса відводиться по зрівнювальному каналу в порожнину другого відбору.

3.6. Паротурбінні агрегати сучасних морських суден

3.6.1. Головний турбозубчастий агрегат

На рис. 3.35 на прикладі двокорпусного ГТЗА ТС-3 танкера «Крим» наведене типове компонування ГТЗА сучасного судна [1].

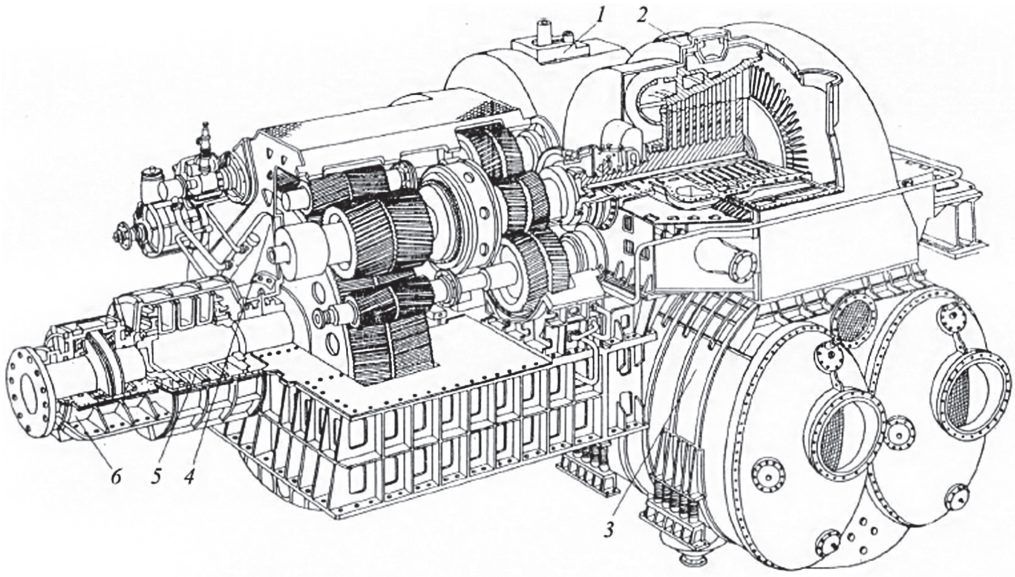


Рис. 3.35. Загальне компонування ГТЗА танкера «Крим»

Головний турбозубчастий агрегат складається з ТВТ, розміщеної в одному корпусі *1* із ТСТ та ТНТ *2*, з'єднаних ресивером, конденсатора *3*, редуктора *4*, з'єднувальної муфти *5* та ГУП *6*, розміщеного в окремому корпусі, що призначений для сприйняття осьового зусилля від гребного гвинта й передачі його через фундамент редуктора на корпус судна. Розташований поперек судна під ТНТ конденсатор призначений для конденсації пари і створення розрідження за ТНТ. З'єднувальна муфта передає обертальний момент від редуктора гребному валу.

Технічні характеристики ГТЗА ТС-3:	
Потужність номінальна	22 060 кВт
Частота обертання, $хв^{-1}$:	
ротора ТВТ–ТСТ	5370
ротора ТНТ	2850
гребного вала	85
Параметри пари перед швидкозапірним клапаном:	
тиск	7,6 МПа
температура	510 °С
Параметри пари проміжного перегріву:	
тиск	1,46 МПа
температура	510 °С
Тиск у конденсаторі	0,0051 МПа
Ефективний ККД	0,79 %
Маса	300 т

У корпусі ТВТ (рис. 3.36) [1] розташовані проточні частини турбін високого та середнього тисків. Свіжа пара тиском 7,6 МПа і температурою 510 °С підводиться до середньої частини корпусу ТВТ, проходить проточну частину ТВТ, у якій розширюється і за тиску 1,6 МПа спрямовується до ППП котла. У ППП температура пари знову доводиться до початкового значення 510 °С. Після ППП пара з тиском 1,46 МПа і температурою 510 °С потрапляє знову в корпус ТВТ, але вже у проточну частину середнього тиску.

Після розширення у ступенях середнього тиску пара спрямовується до ТНТ, а потім у конденсатор. Для компенсації осьових зусиль потоки пари у ступенях високого та середнього тисків спрямовані у протилежні напрями, між проточними частинами високого та середнього тисків розташована проміжна перебірка з внутрішнім лабіринтовим ущільненням. У разі аварії однієї з турбін можлива робота енергетичної установки на іншій турбіні.

Турбіна високого тиску виконана активною, ступені – одновінцеві. Проточна частина високого тиску має п’ять ступенів, проточна частина середнього тиску також складається з п’яти ступенів. Корпус турбіни сталевий зварно-литий. Ротор суцільнокований, із центральним отвором. Диски мають постійну товщину, лопатки виконані з постійним профілем по довжині, їх хвостовики мають Т-подібну форму.

Корпус опирається на стільці за допомогою спеціальних конструктивних пристроїв. Кормова опора жорстка, а носова – гнучка. Опорні підшипники є самовстановлювальними. Упорний підшипник двосторонній із самовстановлювальними сегментами.

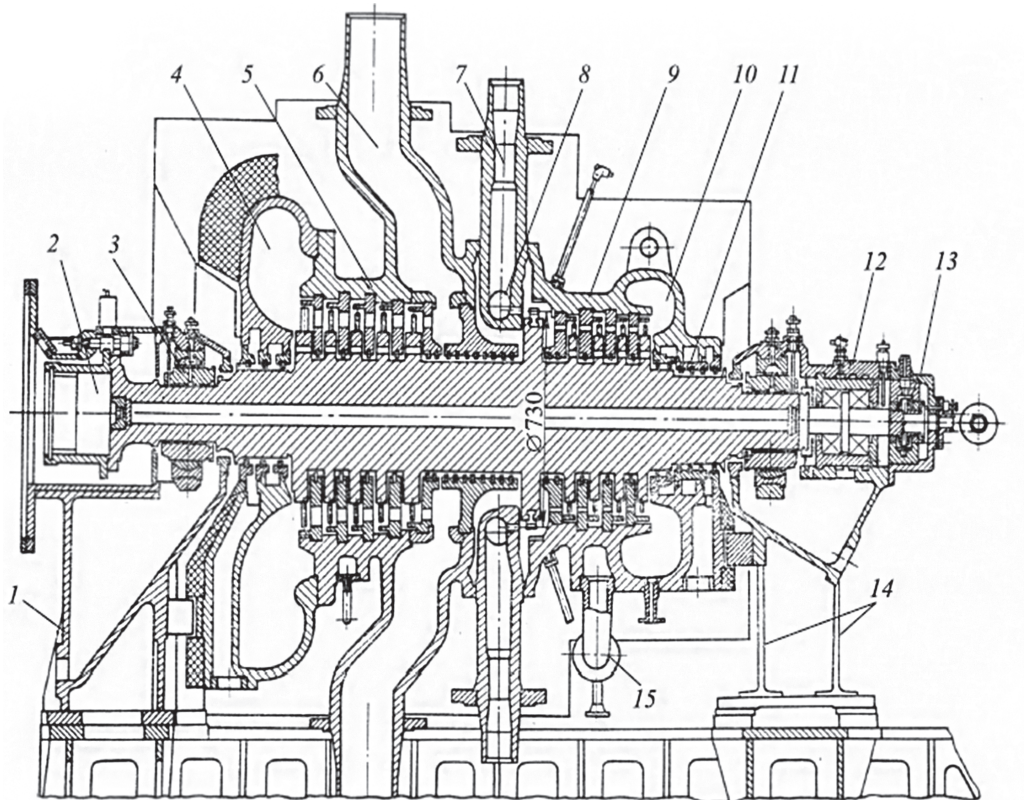


Рис. 3.36. Турбіна високого тиску – турбіна низького тиску ГТЗА ТС-3:

1 – кормовий стілець; *2* – зубчаста муфта; *3* – опорний підшипник; *4* – відвід пари до ТНТ; *5* – ТСТ; *6*, *10* – відповідно підвід та відвід пари з/до ППП; *7* – підвід свіжої пари; *8* – соплова коробка ТВТ; *9* – ТВТ; *11* – кінцеве ущільнення; *13* – імпелер; *14* – гнучка опора; *15* – відбір пари

Турбіна низького тиску (рис. 3.37) однопотокова, з десятьма активними одновінцевими ступенями тиску. Підведення пари до турбіни здійснюється з кормової частини нижньої половини, з боку упорного підшипника, корпус турбіни зварно-литий, ротор суцільнокований, із центральним отвором. Лопатки перших шести ступенів мають постійний профіль по всій довжині, а із сьомого по десятий ступінь – змінний профіль по всій довжині для забезпечення безударного входу пари.

Корпус кріпиться за допомогою стільців. Носова опора гнучка, кормова – жорстка, кормовий підшипник опирається на корпус редуктора.

Уявлення про компонування ГТЗА інших фірм дають наступні дві схеми: на рис. 3.38 наведене типове компонування ГТЗА типу MST фірми «General Electric».

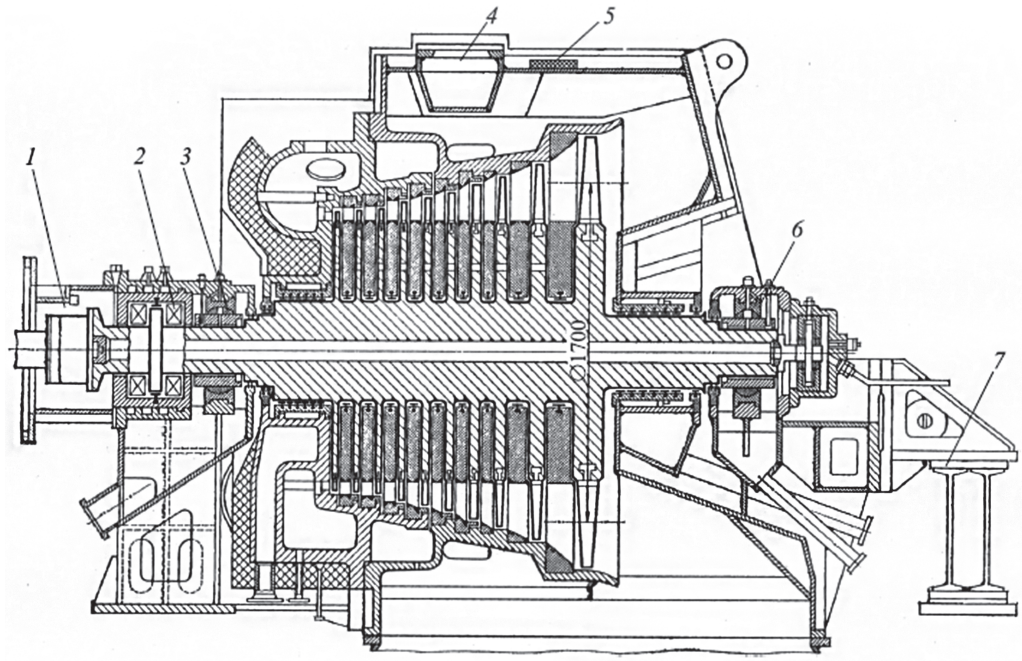


Рис. 3.37. Турбіна низького тиску турбоагрегата ТС-3:
1 – зубчаста муфта; *2, 3*, *6* – упорний та опорні підшипники відповідно;
4 – аварійне скидання пари з ТВТ; *5* – корпус турбіни, *7* – гнучка опора

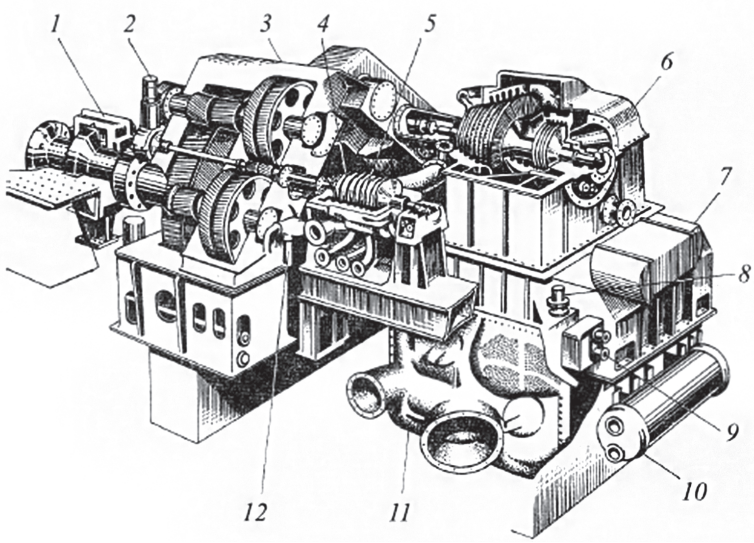


Рис. 3.38. Компонування ГТЗА типу MST з проміжним перегрівом пари:
1 – ГУП; *2* – валоповоротний пристрій; *3* – редуктор; *4* – ТСТ; *5* – ТВТ;
6 – ТНТ; *7* – повітряний ежектор; *8* – масляний насос; *9* – масляний фільтр;
10 – охолодник масла; *11* – головний конденсатор; *12* – стічна масляна цистерна

Особливістю цих турбоагрегатів є те, що ТНТ розташовуються на конденсаторі, який розміщений поперек судна, ТВТ і ТНТ виконуються з активним облопачуванням. Зубчаста передача – двоступенева з роздвоєнням потужності, ГУП розміщений в окремому корпусі. Конструкція агрегата дозволяє здійснювати привід живильного насоса й генератора від ротора ТВТ, з розташуванням їх у ніс від турбіни.

До особливостей ГТЗА типу АР шведської фірми «Stal Laval» (рис. 3.39), який працює без проміжного перегріву пари, належать однопланове компонування його елементів і наявність у редукторі планетарного ступеня [1]. Головний редуктор на лінії ТВТ – триступеневий, перші два ступеня планетарні, а на лінії ТНТ – двоступеневий, останній ступінь – циліндричний. Розміщення конденсатора з осьовим випуском пари в одній горизонтальній площині з головними турбінами дозволяє зменшити висоту ГТЗА і розташувати парогенератор над редуктором або конденсатором. Завдяки одноплановому компонуванню ГТЗА полегшуються фундаменти та забезпечується зручний доступ до всіх його вузлів, що дуже важливо під час проведення монтажних і ремонтних робіт.

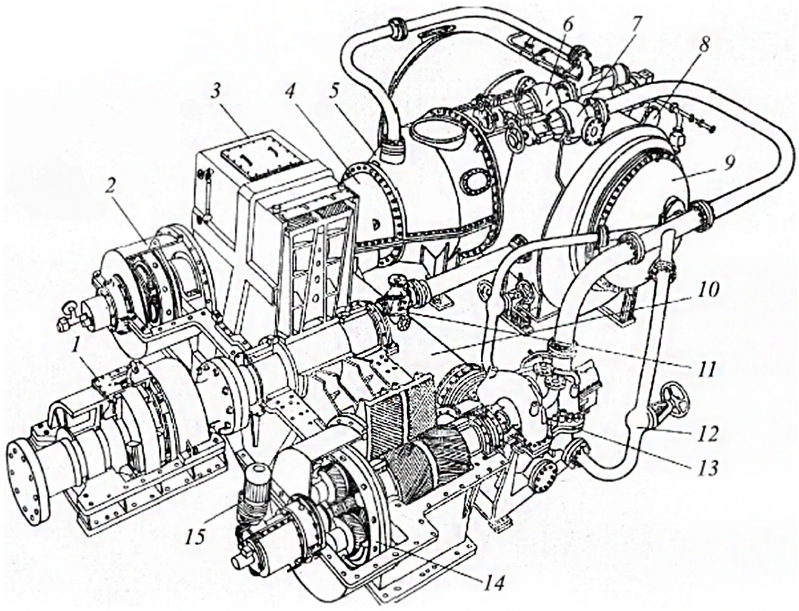


Рис. 3.39. Компонування ГТЗА без проміжного перегріву фірми «Stal Laval»:
1 – ГУП; *2*, *14* – перші (планетарні) ступені ТНТ і ТВТ відповідно;
3 – другий ступінь редуктора; *4* – ТНТ; *5* – ТЗХ; *6*, *7* – відповідно маневрові клапани ТЗХ та ТВТ; *8* – конденсатор ежектора відсмоктувача пари від ущільнень;
9 – головний конденсатор; *10* – ресивер перепуску пари на ТНТ; *11* – масляний насос;
12 – сопловий клапан; *13* – соплова коробка ТВТ; *15* – валоповоротний пристрій

3.6.2. Головний турбоелектричний агрегат

Типовими представниками ГТЕА є агрегати енергетичних установок атомних криголамів типу «Арктика». Два головних турбогенератора сумарною потужністю 55 150 кВт входять до складу кожної такої СЕУ. Турбогенератор складається з турбіни та трьох послідовно з'єднаних з нею електрогенераторів змінного струму.

Технічні характеристики головних турбогенераторів:

Потужність номінальна	27 575 кВт
Параметри пари перед швидкозапірним клапаном:	
тиск	2,94 МПа
температура	300 °С
Частота обертання ротора	3500 $хв^{-1}$
Тиск у конденсаторі	0,0069 МПа
Ефективний ККД	72 %
Маса	2000 т

Турбіна головного турбогенератора однокорпусна (рис. 3.40). З метою зниження висоти лопаток вона виконана двопотоковою, що розвантажує ротор від осьових зусиль. Перший ступінь – активний радіальний двосторонній. Підведення пари до турбіни центральне. Потік пари, що спрямовується до турбіни роздвоюється: половина загальної кількості пари проходить по носовій, а половина – по кормовій групам сопел.

Після проходження радіального ступеня пара надходить у носову та кормову проточні частини, кожна з яких складається із 15 реактивних ступенів.

Корпус турбіни, окрім горизонтального, має вертикальні рознімання. Турбіна працює на електрогенератор, навантаження на який залежить від режиму роботи гребних електродвигунів: на режимах малих навантажень та «стоп» роботи гвинтів турбіна може суттєво охолодитися. Для запобігання цьому навколо основного корпусу передбачено додатковий корпус, який обігрівається парою. Для огляду останніх ступенів без розкриття корпусу виконані спеціальні горловини.

Суцільнокований, із центральним отвором ротор розташований у двох жорстких опорних підшипниках. Упорний підшипник одногребінчастий з вирівнювальним пристроєм, змонтований на окремому валу, який з'єднаний фланцем з ротором. У носовій частині турбіни розміщені валоповоротний механізм і регулятор граничної частоти обертання.

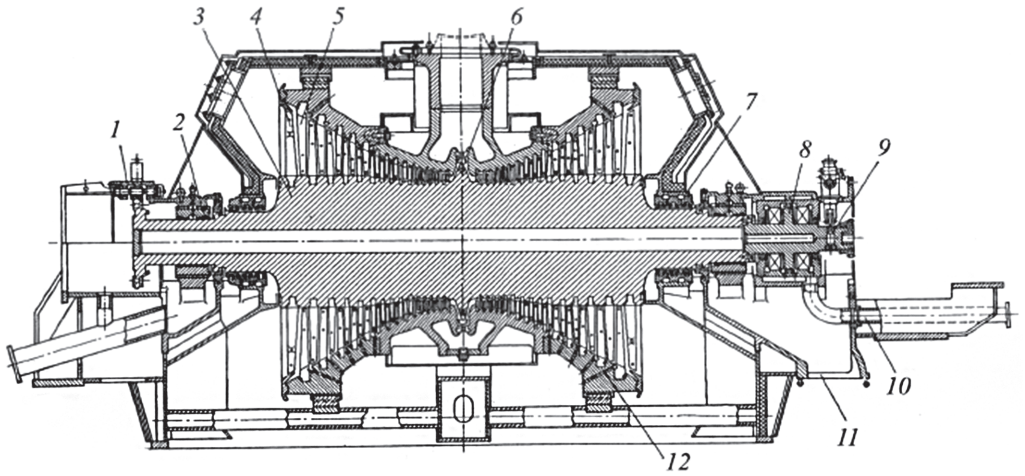


Рис. 3.40. Однокорпусна турбіна атомного криголама:
1 – пристрій для вимірювання осьового переміщення ротора; *2*, *8* – опорний та упорний підшипники відповідно; *3* – ротор; *4*, *5* – відповідно робоча й соплова лопатки; *6* – радіальний ступінь; *7* – ущільнення; *9* – граничний регулятор; *10*, *11* – підведення і злив масла відповідно; *12* – дренажний канал

3.6.3. Допоміжний паровий турбогенератор

Найчастіше виконується у вигляді турбоблока, який складається з багатоступеневої турбіни, одноступеневого редуктора, конденсатора та іншого обладнання і систем, які компактно розташовані на спільній рамі.

Загальну будову допоміжного парового ТГ розглянемо на прикладі агрегата ТД-600. Турбогенератор складається з турбіни, конденсаційної установки та електрогенератора змінного струму потужністю 600 кВт.

Турбіна, редуктор і генератор зі збудником, охолодник масла та щит приладів змонтовані на фундаментній рамі, усередині якої розташовані масляні баки й насоси.

Технічні характеристики ТД-600:

Потужність ТГ	600 кВт
Частота обертання ротора	8500 хв$^{-1}$
Параметри пари перед швидкозапірним клапаном:	
тиск	4,05 МПа
температура	440 °С
Тиск у конденсаторі	0,006 МПа
Ефективний ККД	0,62 %

На рис. 3.41 наведений поздовжній переріз турбіни, проточна частина якої складається з двовінцевого регулювального ступеня та шести активних ступенів тиску. Перші два ступені виконані з парціальним впуском

для підвищення висоти лопаток. Одновінцеві ступені виконані з радіальним ущільненням між бандажами робочих лопаток і виступами діафрагм.

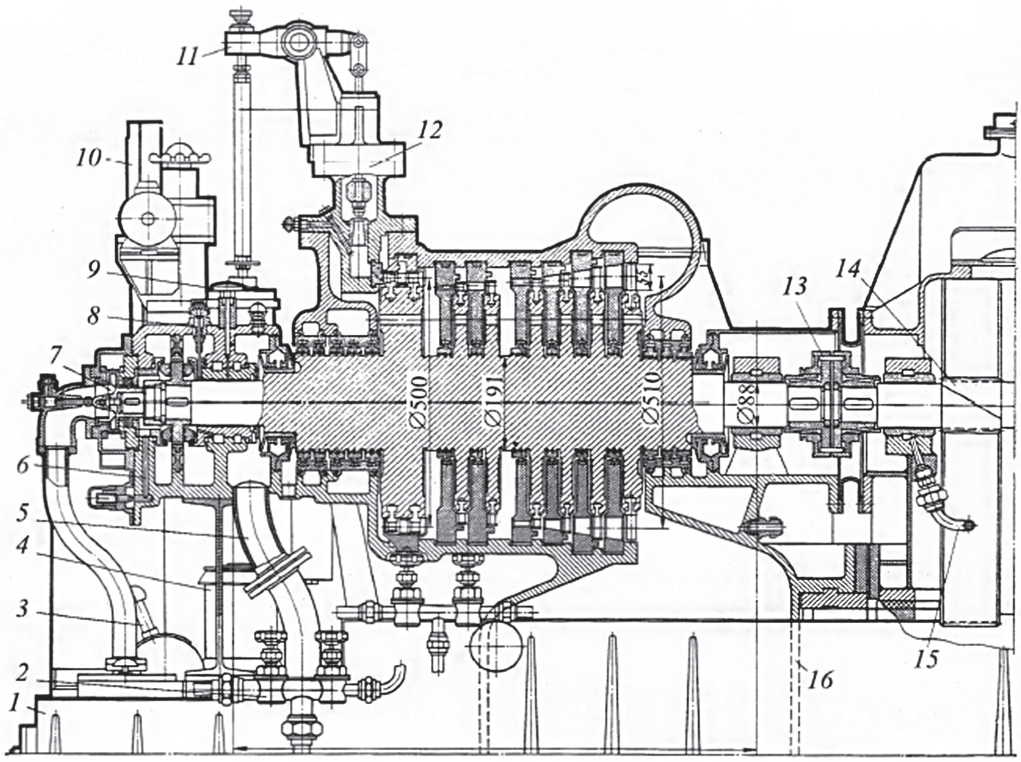


Рис. 3.41. Турбіна допоміжного турбоагрегата ТД-600:
1 – фундаментна рама; *2* – клапани регулювання тиску в ущільненнях; *3* – ручний пусковий насос; *4* – пусковий насос; *5* – трубопровід зливу масла; *6* – трубопровід підведення масла до упорного підшипника; *7* – імпелер; *8* – мікрометри; *9* – термометри опору; *10* – щит приладів; *11* – механізм керування сопловими клапанами; *12* – соплова коробка; *13* – еластична муфта; *14* – редуктор; *15* – підведення масла до підшипників редуктора; *16* – випускний патрубок

Ротор суцільнокований, без центрального отвору. Диски постійного перерізу виконані з розвантажувальними отворами. Задній кінець ротора з'єднується із шестернею редуктора за допомогою еластичної муфти. На передньому кінці ротора закріплена крилатка масляного насоса, яка також є вимикачем граничної частоти обертання.

Корпус турбіни – з горизонтальним рознімання. Стільці турбіни відлиті спільно з корпусом, передній стілець з'єднаний з фундаментною рамою гнучкою опорою. На опорних підшипниках установлені термометри опору для контролю теплового стану та мікрометри для визначення радіального положення ротора. Турбогенератор ТД-600 має власну

конденсаційну установку, яка складається з конденсатора, двоступеневого ежектора, циркуляційного й конденсатного електронасосів.

3.6.4. Допоміжні парові турбоприводи

На суднах з паротурбінними установками окремі допоміжні механізми (живильні насоси, вантажні насоси) обладнуються приводом від допоміжної парової турбіни, яка може бути як одно-, так і багатоступеневою.

На рис. 3.42 наведений турбопривід головного живильного насоса продуктивністю 75 т/год котельної установки суховантажного судна.

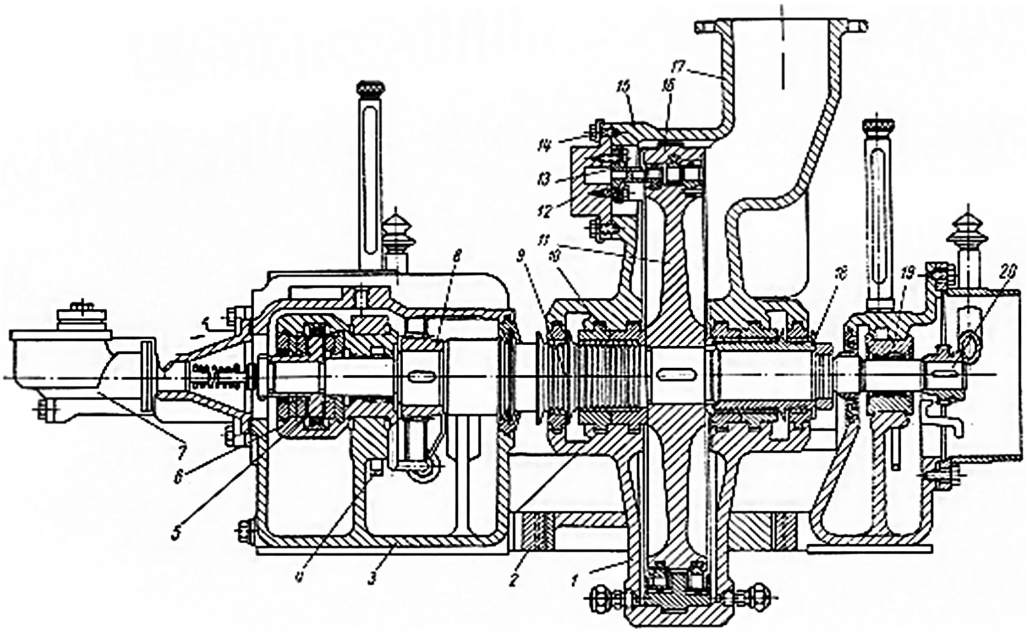


Рис. 3.42. Допоміжна турбіна головного живильного насоса

Напір, створюваний насосом складає 6,5 МПа, тиск пари перед соплами турбіни 4 МПа, температура 290 °С, тиск відпрацьованої пари 0,3 МПа, частота обертання 600 хв$^{-1}$. Проточна частина турбіни складається з двовінцевого колеса *11*. Корпус *1* та кришка *15* турбіни виконані литими, кришка відлита спільно з патрубком відпрацьованої пари *17*. До кришки *15* болтами *14* прикріплена соплова коробка *12* із сегментом сопел *13*, у розточці кришки встановлено сегмент напрямних лопаток *16*. На виході вала із корпусу знаходяться обойми лабіринтних ущільнень *10*.

У корпусі редуктора *3* розміщено опорно-упорний підшипник *6*. На другому кінці турбоприводу розміщено опорний підшипник *19*. Змащення опорних підшипників кільцеве за допомогою кілець *4*.

Ротор турбіни складається з кованого стального вала, на який насаджено двовінцеве колесо. З боку виходу пари на вал насаджена втулка *18* лабіринтного ущільнення *9*. На передньому кінці вала закріплено упорний диск *5*, тахометр *7* і шестерня *8* для привода масляного насоса. Передача обертання споживачеві потужності – триступеневому живильному насосу відбувається за допомогою зубчастої напівмуфти *20*.

Живильний турбонасос допоміжного котла суховантажного судна змонтований на загальній рамі (рис. 3.43). Свіжа пара надходить через патрубок *5* і через швидкозапірний клапан спрямовується до соплової коробки *8*, звідкіля спрямовується до проточної частини, де розширюється до кінцевого тиску і виходить через патрубок *4*.

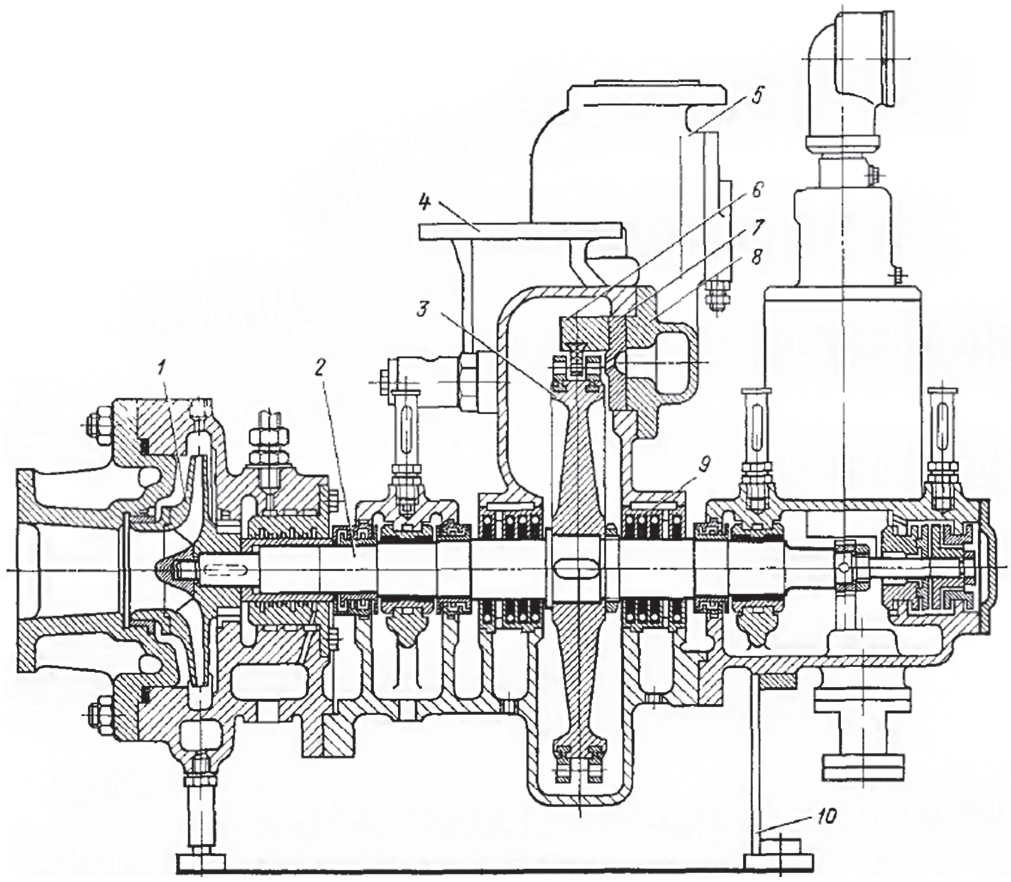


Рис. 3.43. Живильний турбонасос допоміжного котла

Сталевий корпус турбіни складається з двох частин, верхня половина його відлита разом з патрубком відпрацьованої пари. До соплової коробки кріпляться сопловий сегмент *7* та сегмент *6* з напрямними лопатками. Ротор

турбіни утворений валом *2* з розташованим на ньому двовінцевим диском *3*. На валу ротора також закріплено робоче колесо насоса. Вал розташований на двох підшипниках. Корпус підшипника у переднього кінця вала обладнаний гнучкою опорою *10*. Турбонасос має графітові ущільнення *9*.

На рис. 3.44 показаний *вертикальний турбопривід вантажних і зачисних насосів ТП-320* застосовуваних на танкерах і нафторудовозах.

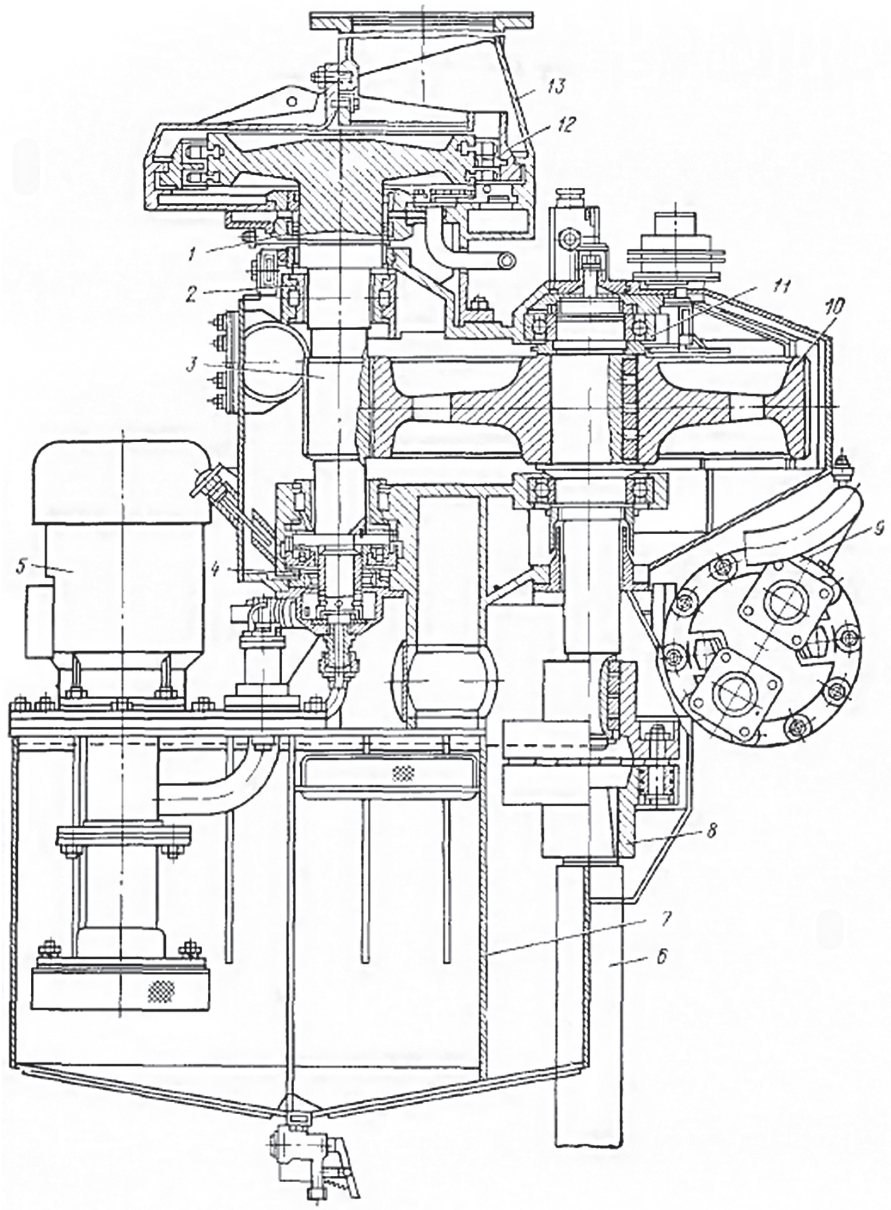


Рис. 3.44. Турбопривід ТП-320 вантажних насосів

Основні характеристики турбоприводу:

Потужність – 235 кВт, частота обертання турбіни 9000 хв$^{-1}$, насоса – 1350 хв$^{-1}$.

Тиск пари: перед турбіною 1,4 МПа, відпрацьованої 0,12 МПа; витрата пари на турбіну 4400 кг/год.

Турбопривід *12* і редуктор розташовані на спільній фундаментній рамі. Сумісний корпус турбіни і редуктора має горизонтальний роз'єм. Ротор турбіни консольного типу виконаний спільно з двовінцевим диском турбіни й шестернею *3* редуктора. Ротор обертається у двох підшипниках: верхньому опорному *2* і нижньому опорно-упорному *4*. Ущільнення *1* турбіни – лабіринтне.

Зубчасте колесо *10* редуктора розташовано на вихідному валу *6*, який через муфту *8* з'єднується з валом насоса. Вихідний вал обертається у кулькових підшипниках *11*. На фундаментній рамі, окрім турборедуктора, змонтовані масляний електронасос *5* та охолодник масла *9*. Турбопривід установлюється на судновий фундамент за допомогою бокових лап.

3.6.5. Конденсатори суднових паротурбінних установок

Головні й допоміжні суднові парові турбіни для приводу електрогенераторів працюють з конденсацією відпрацьованої пари. У процесі конденсації теплота відпрацьованої пари відбирається забортною охолоджуючою водою, яка подається у конденсатор циркуляційним насосом. Відпрацьована пара має об'єм, що у багато разів перевищує об'єм її конденсату. Так, за абсолютного тиску 7 кПа об'єм пари у 20 тис. разів перевищує об'єм конденсату. Очевидно, що під час конденсації пари у замкнутому просторі виникає розрідження.

Водяна пара завжди містить певну кількість змішаного з нею повітря, яке не конденсується, залишається у конденсаторі та створює деякий тиск. Якщо підключити до конденсатора установку для відкачування повітря, яке виділяється з пари під час конденсації, можна безперервно отримувати в конденсаторі низький надмірний тиск.

Таке підтримання низького надмірного тиску в конденсаторі, а це значить і за останнім ступенем розширення пари у турбіні, є одним зі способів підвищення її потужності та економічності. У конденсаторі головного турбоагрегата тиск зазвичай складає 4…6 кПа, подальше його зниження не є раціональним, тому що це призвело б до значного збільшення розмірів конденсатора, підвищення потужності насосів, що економічно недоцільно.

У суднових ПТУ набули поширення поверхневі конденсатори, у яких конденсація пари відбувається на холодній поверхні трубок, усередині

яких циркулює охолоджуюча забортна вода. Поверхня трубок, що називається охолоджуючою, поділяє конденсатор на паровий та водяний простір.

У сучасних конденсаційних установках як циркуляційні й конденсатні застосовуються відцентрові або осьові насоси, а як повітряні – пароструминні насоси (ежектори) чи вакуумні електронасоси.

У звичайній циркуляційній системі головного конденсатора циркуляційний насос приймає забортну воду через кінгстон або бортовий льодовий ящик і подає її в конденсатор, з якого вода видаляється за борт по відливному трубопроводу.

На сучасних суднах широкого застосування знайшли системи самопроточної циркуляції охолоджуючої води головних конденсаторів. У таких системах для прокачування води через конденсатор використовується динамічний напір потоку, що набігає, утворений під час руху судна. Циркуляційний насос у цьому випадку використовується лише для прокачування води на задньому ходу, під час маневрування та на малих ходах. Подача, напір та потужність такого насоса значно менші, ніж насоса звичайної циркуляційної системи. Системи самопроточної циркуляції надійніші, простіші в експлуатації. Така система була застосована на великотоннажному танкері «Крим» (рис. 3.45) [1].

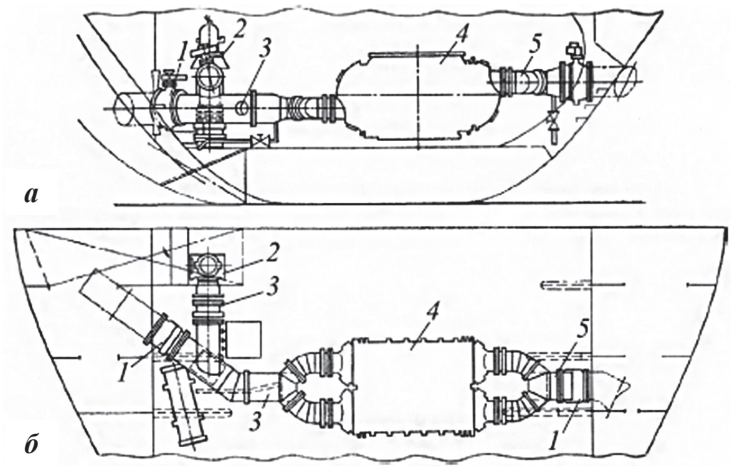


Рис. 3.45. Схема самопроточної циркуляції танкера «Крим»:
а **–** вигляд у ніс судна; ***б*** **–** план трюму;
1 – поворотний затвор; *2* – циркуляційний електронасо с; *3*, *5* – приймальний та відливний трубопроводи відповідно; *4* – конденсатор

Забортна вода надходить через профільований прийомний пристрій. Надалі вона по приймальному трубопроводу проходить у два паралельно розташовані трубні жмутки головного конденсатора, а потім через один

спільний відливний трубопровід – у відливний пристрій. Допоміжний циркуляційний електронасос установлено на окремому приймальному патрубку. Цей насос автоматично вмикається у випадку зменшення швидкості судна до значення, за якого самопроток не забезпечується.

Конструкцію типового конденсатора суднової ПТУ розглянемо на прикладі конденсатора ГТЗА суден типу «Крим» (рис. 3.46). Цей конденсатор поверхневого типу, одноходовий з двома паралельними потоками. Верхня частина сталевого корпусу являє собою горловину з прямокутним фланцем *6*, яка забезпечує приймання відпрацьованої в турбінах пари. До фланця *5* приєднується трубопровід відпрацьованої пари від автономного привода турбоблока навішаних механізмів.

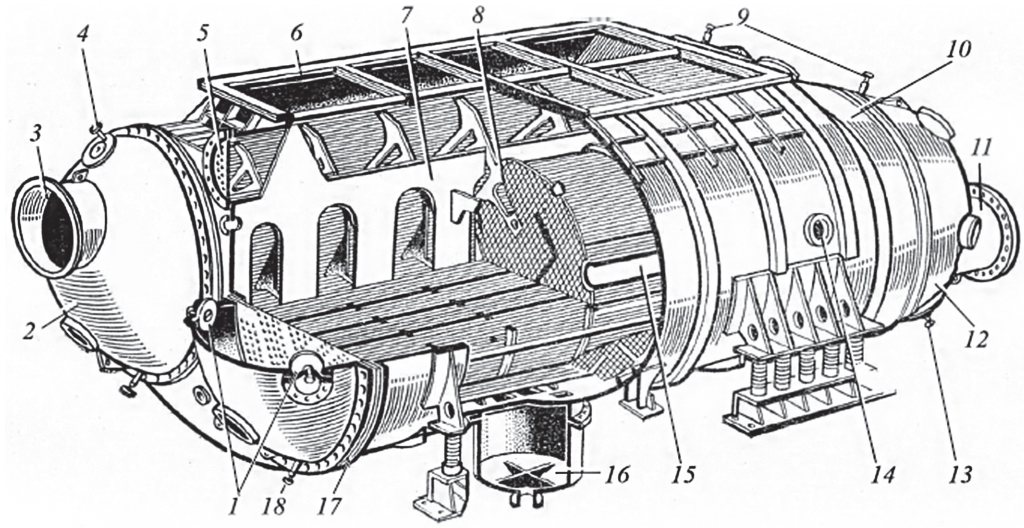


Рис. 3.46. Конденсатор головного турбозубчастого агрегата танкера «Крим»:
1 – протектори; *2*, *12* – кришки водяних камер; *3*, *11* – відповідно зливний і приймальний водяний патрубки; *4*, *9* і *13*, *18* – повітряні та водяні клапани відповідно; *5* – фланець приймання відпрацьованої пари від турбомеханізмів; *6* – горловина приймання пари; *7* – лист жорсткості; *8* – перебірка; *10* – компенсатор теплових розширень; *14* – отвір для відсмоктування повітря; *15* – колектор; *16* – збірник конденсату; *17* – трубна дошка

Мельхіорові трубки закріплені у латунних трубних дошках *17* розвальцюванням з обох боків. Провисанню трубок у кожусі запобігають перебірки *8*. Для компенсації різниці теплових розширень корпусу і трубного жмутку передбачено компенсатор *10*. Конденсат, який стікає з трубок, збирається у збірнику конденсату *16* і через патрубок відкачується конденсатним насосом. Повітря відсмоктується з колектора *15* через отвір *14*. Забортна вода потрапляє через приймальні патрубки *11* у камеру *12*, надалі по трубному жмутку в камеру *2* і зливається через зливні патрубки *3*.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. *Охарактеризуйте принцип дії парової турбіни.*
2. *Назвіть спільні риси та відмінності між активною та реактивною турбінами.*
3. *З яких елементів складається ступінь турбіни?*
4. *У чому схожість та відмінність між ступенем тиску та ступенем швидкості?*
5. *Розгляньте механізм перетворення енергії пари на механічну роботу у ступені турбіни активного та реактивного типу.*
6. *Надайте визначення проточної частини турбіни.*
7. *Порівняйте парові машини й парові турбіни за принципом здійснення корисної роботи.*
8. *Порівняйте парові машини й парові турбіни стосовно граничного тиску розширення.*
9. *Як впливають на остійність судна СЕУ з паровими машинами й паровими турбінами?*
10. *Покажіть, як принцип дії парової турбіни й парової машини впливають на судновий фундамент.*
11. *Яка особливість багатоступеневих турбін пов'язана із зусиллям, що виникають під час розширення пари?*
12. *Що дозволило Ч. Парсонсу забезпечити прямий привід електричного генератора турбіною, виготовленою за його патентом?*
13. *У чому полягали причини невдалого першого випробування судна «Turbinia» з паротурбінною установкою?*
14. *Як був доопрацьований пропульсивний комплекс «Turbinia», що дозволило розвинути судну рекордну швидкість?*
15. *Наведіть значення енергонасиченості судна «Turbinia».*
16. *Охарактеризуйте особливості суднових паротурбінних енергетичних установок з безпосереднім поєднанням валів турбіни та гребних гвинтів.*
17. *Коли на суднах була застосована електрична передача?*
18. *На якому судні з паровою турбіною і за яких обставин уперше застосовано механічну передачу?*
19. *Обґрунтуйте необхідність застосування редуктора у складі суднової енергетичної установки з паровою турбіною.*
20. *Яку назву отримали суднові паротурбінні агрегати з механічною передачею?*
21. *Як розподілялись функції парової машини й парової турбіни у складі комбінованої установки?*
22. *Охарактеризуйте доцільність застосування турбін відпрацьованої пари у складі турбопоршневих комбінованих установок.*

23. *Надайте характеристику енергетичної установки судна «Титаник».*
24. *Назвіть особливості суднових парових турбін кінця 20-х – початку 30-х рр. XX ст.*
25. *Аргументуйте поширення у складі суднових енергетичних установок з паровими турбінами двоступеневих зубчатих редукторів.*
26. *Охарактеризуйте суднову електричну передачу у складі енергетичної установки з паровими турбінами стосовно її переваг та недоліків.*
27. *Яких змін у конструкції суднових парових ТЗА у період 40-х рр. XX ст. набула концепція турбіни заднього ходу?*
28. *Яких особливостей у 40-х рр. XX ст. набула загальна будова парових турбін суден-електроходів?*
29. *Охарактеризуйте теплові схеми суднових паросилових установок середини XIX ст.*
30. *Які особливості складу теплових схем характерні для парових установок першого десятиліття XX ст.?*
31. *У який період розвитку суднових паросилових установок був застосований підігрів живильної води перегрітою парою?*
32. *Назвіть основні елементи найпростішої ПТУ.*
33. *Чому дорівнює теплота, витрачена на утворення водяної пари та її підігрів?*
34. *Які втрати теплоти враховує термічний ККД циклу Ренкіна?*
35. *Який цикл ПТУ є регенеративним?*
36. *Розгляньте способи забезпечення підігріву живильної води.*
37. *Як реалізується у ПТУ проміжний перегрів пари?*
38. *Розгляньте теплову схему ПТУ танкера «Крим». Охарактеризуйте склад ГТЗА.*
39. *Назвіть тип привода головного живильного насоса та генератора суднової електростанції ПТУ танкера «Крим».*
40. *У якому елементі теплової схеми ПТУ танкера «Крим» реалізується другий ступінь підігріву живильної води?*
41. *Охарактеризуйте джерела підігріву живильної води в ПТУ танкера «Крим».*
42. *Наведіть початкові параметри пари ПТУ танкера «Крим».*
43. *Яке підвищення ККД ПТУ танкера «Крим» досягається використанням проміжного перегріву пари?*
44. *Як у разі виходу з ладу головного котла танкера «Крим» забезпечується аварійний хід судна?*
45. *Як поділяються суднові турбіни за тиском пари на випуску?*
46. *Як поділяються суднові турбіни за способом передачі обертального моменту?*
47. *Як поділяються суднові турбіни за призначенням?*

48. *Назвіть типи парових турбін за характером робочого процесу.*
49. *Як компенсуються осьові зусилля у ТВТ і ТСТ ГТЗА ТС-3?*
50. *Наведіть конструктивні особливості ГТЗА типу MST.*
51. *Який тип конденсатора застосований у ГТЗА типу АР?*
52. *Охарактеризуйте особливості будови ГТЕА криголама «Арктика».*
53. *Наведіть параметри пари ГТЗА криголама «Арктика».*
54. *Яке проєктне рішення запобігає охолодженню турбіни атомного криголама на режимах малих навантажень?*
55. *З якою метою турбіна головного турбогенератора криголама «Арктика» виконана двопотоковою?*
56. *Які особливості компонування допоміжних паротурбогенераторів?*
57. *Чим забезпечується підвищення висоти лопаток турбіни агрегата ТД-600?*
58. *Які елементи входять до складу конденсаційної установки турбогенератора ТД-600?*
59. *У чому полягає механізм виникнення розрідження у конденсаторі ПТУ?*
60. *Як підтримується у конденсаторі низький надмірий тиск?*
61. *Обґрунтуйте рівень тиску у конденсаторі головного турбоагрегата.*
62. *На які частини поділяє конденсатор охолоджуюча поверхня трубок?*
63. *Які типи насосів застосовуються в сучасних конденсаційних установках як циркуляційні й конденсатні?*
64. *Охарактеризуйте загальну будову допоміжної турбіни головного живильного насоса.*
65. *Які особливості ущільнень живильного турбонасоса допоміжного котла?*
66. *Як забезпечується передача потужності турбоприводу ТП-320 до споживача?*

ГЛАВА 4. ЕВОЛЮЦІЯ СУДНОВИХ ПАРОВИХ КОТЛІВ

4.1. Котли суднових ЕУ: принцип дії, визначення, терміни

Принцип дії парових котлів. Парові котли, що використовуються на паротурбінних суднах та призначені для вироблення пари, необхідної для роботи головних парових турбін і допоміжних потреб, називаються *головними.*

На суднах з ДВЗ і ГТУ парові котли призначені для забезпечення парою деяких допоміжних механізмів, а також потреб у тепловій енергії (опалення, підігрів палива, господарсько-побутових). Ці котли називаються *допоміжними.*

Допоміжні котли, які встановлені на танкерах з головними ДВЗ, часто мають значну паропродуктивність через великі витрати пари на миття танків, підігрів вантажу, роботу вантажних насосів з турбоприводом. Установлені на паротурбінних суднах ДК призначені для забезпечення потреб у парі на стоянках. Допоміжні котли, які працюють на відхідних газах ДВЗ або ГТУ, називаються *утилізаційними.*

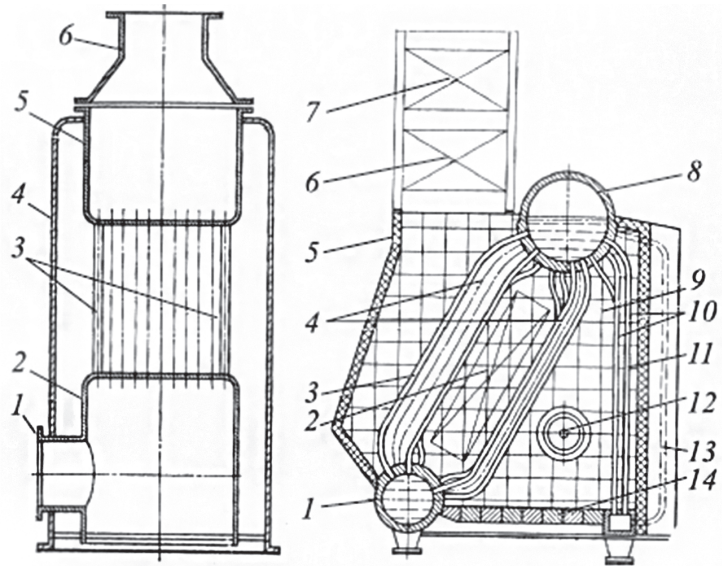
Суднові котли за будовою поділяються на дві групи: *вогнетрубні* та *водотрубні.* У вогнетрубному котлі гарячі гази як основний теплоносій рухаються всередині труб, а вода омиває їх ззовні. Ці труби називаються *димогарними.* У водотрубному котлі, навпаки, вода та пароводяна суміш знаходяться всередині труб, а гарячі гази омивають їх ззовні. Ці труби мають назву *водогрійних.* На сьогодні як головні суднові парові котли застосовуються лише водотрубні.

Водотрубні котли поділяються на котли з *природною* та *примусовою циркуляцією.* Більшість суднових котлів мають *природну циркуляцію*, яка виникає за рахунок різниці густини води в опускних трубах, необігрівних або слабообігрівних, та густини пароводяної суміші, що утворюється у підйомних трубах, які інтенсивно сприймають радіаційне та конвективне тепло. *Примусова циркуляція* передбачається лише в котлах окремих конструкцій. До того ж вода прокачується по трубах випарних поверхонь циркуляційними насосами. Такі котли поділяються на *прямоточні* та *котли з багатократною примусовою циркуляцією.*

Кратністю циркуляції називається відношення маси циркулюючої води $G_в$ до маси виробленої парогенератором пари $G_п$:

$$K = G_в / G_п.$$

Прямоточні котли мають кратність циркуляції $K = 1$. Котли з багатократною примусовою циркуляцією ($K = 4…8$) широко застосовуються як утилізаційні. Спрощена схема вогнетрубного котла подана на рис. 4.1,***а***. Горіння палива відбувається в топці *2*, куди через патрубок *1* від паливо-форсункового агрегата подаються паливо й повітря. Продукти згоряння по димогарних трубах *3* надходять у корпус димової камери *5* і надалі в димохід *6*. Перераховані елементи конструкції об'єднуються корпусом *4*.



а ***б***

Рис. 4.1. Принципові схеми вогнетрубного (***а***) та водотрубного (***б***) котлів

Водотрубний котел складається з верхнього пароводяного *8* і нижнього водяного *1* колекторів, з'єднаних водогрійними трубами *4*. Система труб *10*, розташованих на боковій стінці топки, називається *боковим екраном*. Труби *11* другого ряду екрана, загороджені першим рядом, і труби *13*, розміщені за межами топки, називаються *опускними*. В окремих конструкціях котлів опускними є і труби *3*, найбільш віддалені від топки. Усі інші труби називаються *підйомними*. Рух води вниз по опускних трубах і пароводяної суміші вверх по підйомних трубах створює циркуляцію води в котлі, необхідну для його надійної роботи.

Топка котла утворена екраном *10*, притопковою системою труб *4*, подом *14* і стінками *9*, викладеними вогнетривкою цеглою. Топковий пристрій складається з паливної форсунки *12* та повітроспрямувального елемента, через який подається необхідне для горіння повітря.

Газовий тракт, відділений від атмосфери обшивкою, та зовнішні поверхні котла *5* покриті теплоізоляцією. На котлі встановлені необхідна арматура й контрольно-вимірювальні прилади.

Паровий котел має додаткові поверхні нагріву: пароперегрівник *2*, економайзер *6* і повітропідігрівник *7*, які суттєво підвищують його ефективність. Водяний економайзер і повітропідігрівник, які працюють за рахунок теплоти відхідних газів, утворюють так звані хвостові поверхні нагріву котла. Передача теплоти від гріючого до нагрівального середовища відбувається як у самій топці, так і газоходах.

Залежно від їх розміщення водогрійні труби отримують неоднакову кількість теплоти. В елементах має місце два типи теплообміну: радіаційний (променистий) і конвективний. Труби, які омиваються газами, називаються *конвективними*, при цьому перший від топки ряд труб конвективної системи одночасно є і радіаційною поверхнею нагріву. Опускними є труби, які не отримують теплоти або отримують її значно менше, порівняно з іншими трубами. Паровий котел разом з додатковими поверхнями нагріву називається *котельним агрегатом*. Котел або декілька котлів спільно з допоміжними механізмами і пристроями складають *котельну установку.*

Простір котла, у якому знаходиться вода (нижній барабан, трубки й частина верхнього барабана), називається *водяним*, а простір, що зайнятий парою (інша частина верхнього барабана), – *паровим*. Водотрубний котел заповнюється водою до середини пароводяного колектора. Поверхня води, по якій проходить межа між водяним і паровим просторами, називається *дзеркалом випаровування*. Топка й газоходи належать до газового простору.

Основними характеристиками котла є наступні:

паропродуктивність $D_к$, т/год – кількість пари, що виробляється котлом за годину. Паропродуктивність головних котлів на суднах з ПТУ може складати 80…100 т/год. На суднах з іншими типами головних енергетичних установок вона значно менша, визначається залежно від призначення судна;

годинна витрати палива B_1, кг/год – кількість палива, що спалюється у топці котла, обумовлюється тепловою економічністю котла, енергетичного обладнання, якістю спалюваного палива й умовами експлуатації тощо; вона визначає загальну ефективність суднової ЕУ;

параметри пари – робочий тиск p і температура t, (головних котлів – 8…15 МПа та 510…550 °С, у допоміжних котлах вони значно нижчі: тиск 0,50…1,50 МПа, при цьому генерується насичена або слабоперегріта пара з температурою не вище 250 °С). Лише ДК на танкерах працюють з більш високими параметрами.

На економічність ПТУ впливають також температура живильної води, яка може становити 200 °С, і температура повітря, що надходить у топку, яка залежно від застосованих повітропідігрівників і навантаження котла може складати 200…250 °С.

4.2. Загальна будова перших суднових парових котлів

Конструкція перших суднових котлів була запозичена у берегових котельних установках. Це були парові котли скриньового типу з плоскими стінками, з цегловим обмуровуванням топкових пристроїв. На рис. 4.2 поданий типовий для початку XIX ст. паровий котел скриньового типу. Верхня частина котла мала напівциліндричну форму, дно та бокові стінки мали невелику ввігнутість. Матеріал для виготовлення котла – залізні листи. Під котлом розташована топка з колосниковою решіткою.

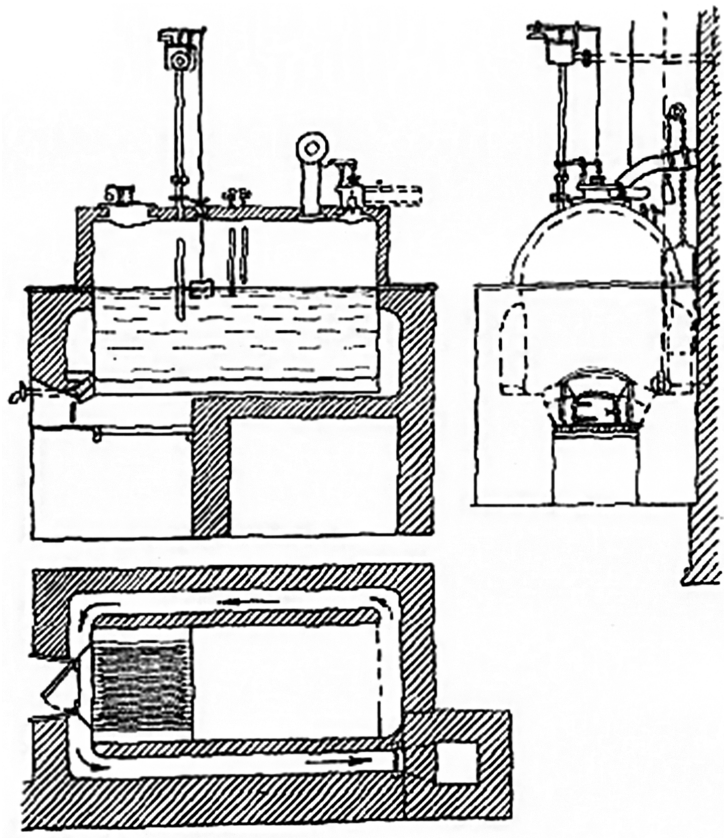


Рис. 4.2. Судновий котел скриньового типу

Гарячі гази омивають дно котла, потім послідовно обидві бокові стінки, після чого виходять через димову трубу. Арматура керування котлом розміщена у верхній його частині, у конструкції котла застосовано регулятор поплавкового типу. Такі котли з плоскими стінками витримували тиск пари не вище 0,1 МПа, застосовувались на суднах до 80-х рр. XIX ст.

Першими спеціальними судновими котлами були лабіринті й галерейні котли. Виробництво таких котлів відбулось у 20–60-х рр. XIX ст. Зовнішній корпус лабіринтного суднового котла побудови 40-х рр. XIX ст. (рис. 4.3) створений плоскими стінками, склепаними з листів товщиною 8 мм. Чотири топки і внутрішні димоходи розташовані всередині корпусу, що значно підвищувало поверхню нагрівання, вихід газів у димову трубу облаштований у середині котла. У водяному просторі котла розташовані прямокутні димоходи у вигляді лабіринту. Такі котли мали форму, зручну для розміщення в корпусі судна, вони не потребували цеглового обмурування. Порівняно з котлами без внутрішніх димоходів, у них краще використовувалась теплота димових газів.

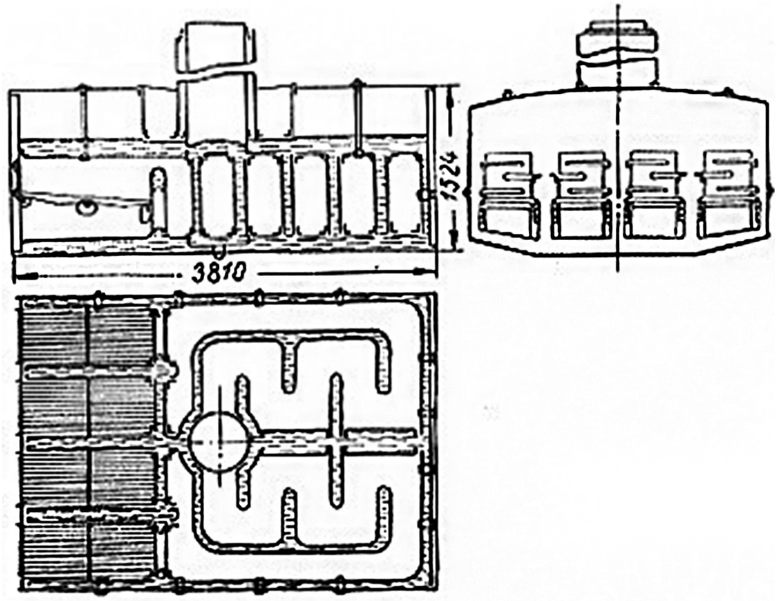


Рис. 4.3. Лабіринтний котел

Внутрішня частина котла була доступна для очищення від солей, що мало принципове значення під час живлення котлів забортною водою. Коефіцієнт корисної дії лабіринтних котлів не перевищував 30–35 %, тому що значна частина теплоти втрачалась з відхідними газами.

Галерейні котли (рис. 4.4) мали принципово інший вигляд порівняно з лабіринтними. По всій довжині котла розташовувались прямокутні димоходи, через них проходили димові гази із топок, після чого гази здійснювали поворот (на 180°) і надходили в димоходи круглого перерізу, розташовані вище попередніх, після чого виходили в димову трубу. По висоті галерейних котлів, розташовувалось до чотирьох рядів димоходів. Завдяки збільшенню шляху, який проходили гази, коефіцієнт корисної дії галерейних котлів був вище, ніж у лабіринтних, він сягав 50 %.

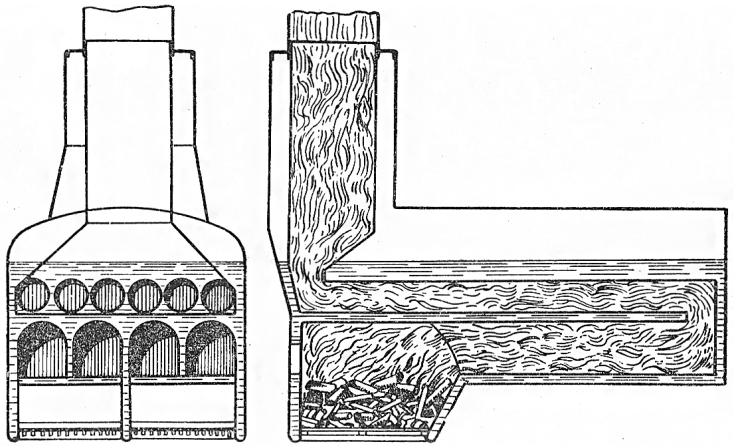


Рис. 4.4. Галерейний котел

Основним недоліком усіх розглянутих вище конструкцій суднових котлів була наявність в їх конструкції плоских стінок, які навіть за низьких тисків пари вимагали підкріплення додатковими зв'язками. Ці підкріплення робили конструкцію більш жорсткою, але вони викликали теплові напруження, що приводило до утворення тріщин та виходу із ладу всієї конструкції.

Перехід до більш високих тисків пари вимагав відмови від коробчастої конструкції котла й переходу до циліндричної форми, більш придатної у відношенні міцності.

4.3. Розвиток вогнетрубних котлів

Перші суднові вогнетрубні котли мали нециліндричну форму корпусу. Тільки у 40-х рр. XIX ст. почали будувати суднові вогнетрубні котли з корпусами, форма яких наближувалась до циліндричної (рис. 4.5).

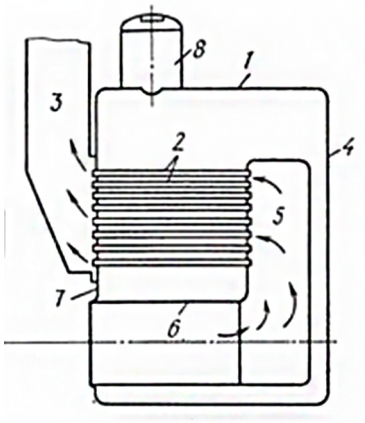


Рис. 4.5. Схема суднового вогнетрубного котла

Вогнетрубні котли складаються з наступних основних частин: бочки *1*, переднього *7* і заднього *4* днищ, жарових труб (топок) *6*, вогневих камер *5*, димогарних труб *2* та димової коробки *3*. На деяких котлах для збільшення ступеня сухості пари встановлюють сухопарник *8*.

Паливо, що вводиться в котел, згоряє в топці, звідки димові гази, що утворилися, надходять у вогневу камеру, де відбувається їх перемішування і догоряння летких речовин. Потім гарячі гази направляються в димогарні труби, через стінки яких здійснюється інтенсивна передача тепла (основна частина) від газів до котлової води. Тепло котловій воді передається через стінки жарових труб і стінки вогневих камер.

На рис. 4.6 наведена установка з двох таких котлів, які мають загальний паровий простір. Кожен котел має дві жарові труби, у яких розташовані топки. Гази, що виходять із топок, надходять у вогневу камеру. Звідтіля, змінивши напрям руху на протилежний, гази спрямовуються у димогарні трубки. Димова труба проходить через загальний паровий простір. Стінки вогневої камери та нижньої частини жарових труб підкріплені спеціальними зв'язками.

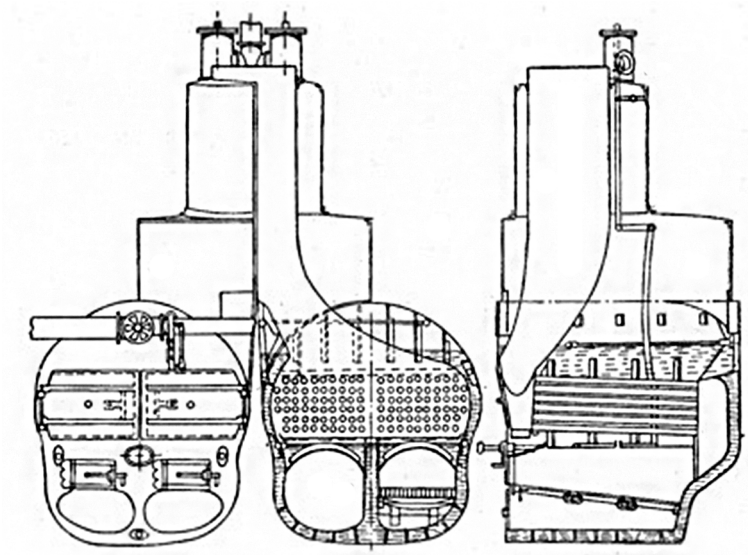


Рис. 4.6. Одна з перших конструкцій вогнетрубних котлів

Одна з ранніх конструкцій суднового вогнетрубного котла була встановлена у 1858 р. на лайнері «Great Eastern». Десять котлів коробчастого типу з вугільним опаленням забезпечили роботу парових машин за тиску пари 0,26 МПа потужністю 6300 кВт.

У 70-х рр. XIX ст. внаслідок інтенсивної роботи вчених та інженерів майже повністю склалась конструкція суднового вогнетрубного котла з циліндричним корпусом. На морських та річкових суднах застосовувалися три різновиди вогнетрубних котлів: *оборотні*, *прольотні* та *локомотивні.*

Оборотні котли набули такої назви, тому що димові гази під час переходу з топок у димогарні трубки робили поворот на 180°. Кількість топок у вогнетрубних котлах складала від однієї до трьох. У більшості випадків такі котли мали вугільне опалення з ручним обслуговуванням топок. Їх паропродуктивність не перевищувала 6 т/год. Конструктивна схема такого котла наведена на рис. 4.7.

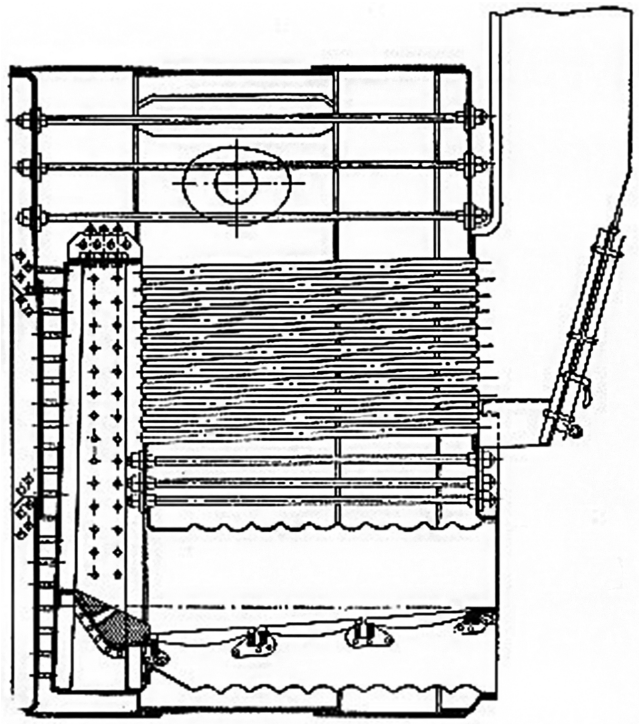


Рис. 4.7. Оборотний котел

Для великих та швидкохідних суден з паровими машинами високої потужності були потрібні котли більш високої паропродуктивності. Цим вимогам відповідали двосторонні оборотні котли, у яких два котли

були об'єднані в загальному циліндричному корпусі (рис. 4.8). Поверхня нагріву таких котлів досягала 600 м^2, а паропродуктивність до 12 т/год. Будівництво таких котлів і застосування їх на суднах морського флоту продовжувалась до 20-х рр. XX ст.

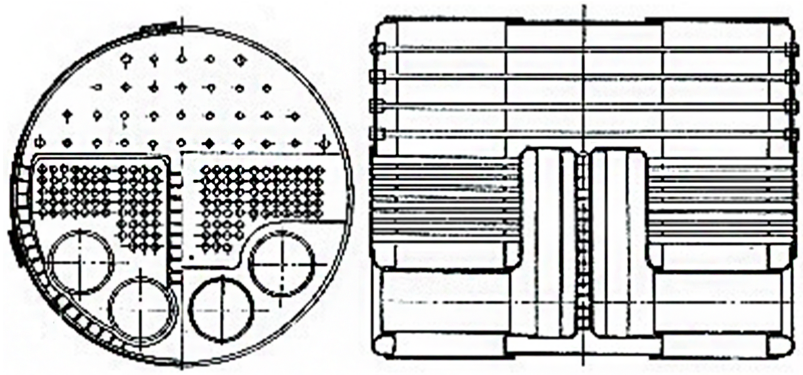


Рис. 4.8. Двосторонній котел

На річкових суднах поряд з оборотними котлами широкого розповсюдження отримали вогнетрубні прольотні котли (рис. 4.9). На відмінність від оборотних котлів, у них здійснений прямий (без повороту) рух димових газів. У прольотних котлах діаметр корпусу менший, ніж у оборотних, що полегшувало їх розміщення у корпусах мілкосидячих річкових суден, вони також мали й меншу вагу. Виробництво прольотних котлів було зупинено у 30-х рр. XX ст.

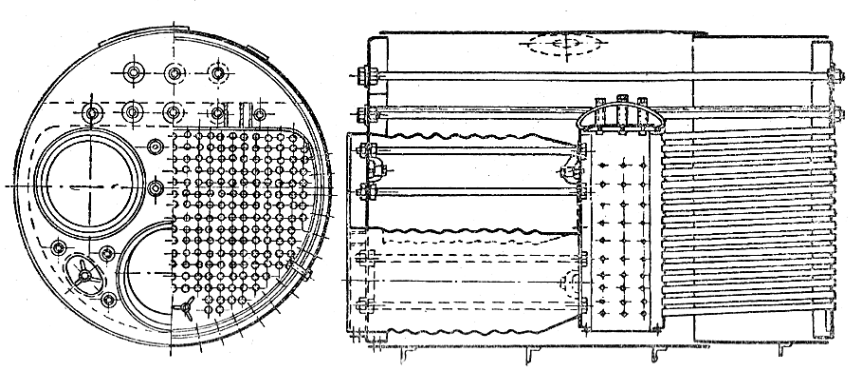


Рис. 4.9. Прольотний котел

Різновидом прольотного котла є локомотивний котел. На відміну від прольотного його топка розміщена не в жарових трубах, а в конструкції з плоскими стінками, що дозволяє підвищити об'єм топки та поліпшити

процес згоряння палива. Вогнева камера між жаровою трубою і димогарними трубками відсутня. Локомотивні котли мають меншу вагу, порівняно з прольотними, і дещо більш високий парозйом. Зазвичай вони застосовувались на невеликих річкових суднах з малою осадкою, їх виробництво було припинено до 1910 р.

Чотири парові котли локомотивного типу були встановлені на італійському крейсері «Principe Umberto» водотоннажністю 4165 т, побудованому у 1862 році у Генуї. Енергетична установка з паровою машиною потужністю 480 кВт забезпечила крейсеру швидкість ходу до 11 вузлів.

Розпочинаючи з 1910 р. вогнетрубні котли стали комплектуватись пароперегрівачами, поверхня нагріву яких складається з труб малого діаметра, розміщена у верхніх рядах димогарних трубок. Поряд із цим у вогнетрубних котлах для підігріву повітря, що надходить у топки, теплотою димових газів, що виходили з котла, стали застосовувати повітропідігрівачі. Застосування підігріву повітря підвищує парозйом з 1 $м^2$ поверхні нагріву й поліпшує процес згоряння, завдяки чому з'явилась можливість використання низькосортного палива.

Підвищення тиску пари у вогнетрубних котлах з 0,6–0,7 до 1,2 МПа призвело до зниження парозйому з 40–50 до 30–35 кг/($м^2 \cdot$ год.). Такий парозйом характерний і для сучасних вогнетрубних котлів. Зниження парозйому у вогнетрубних котлах з підвищенням тиску пов'язана з високими тепловими напругами під час форсованої роботи, які виникали в конструкції котлів з багатою кількістю плоских елементів, підкріплених зв'язками.

Через обмеженість тиску пари і парозйому та недостатньо високу паропродуктивність за значних масогабаритних характеристик вогнетрубні котли в потужних суднових установках були витіснені водотрубними котлами.

У той же час для вогнетрубних котлів характерні простота обслуговування, значний об'єм водяного простору, завдяки чому в них акумулюється значна кількість теплоти.

Для підвищення паропродуктивності суднових котлів за ідеєю шведського інженера Д. Еріксона з 1862 р. було застосовано штучне дуття, яке дозволило збільшити кількість палива, яке згоряло в топці.

Спочатку повітря спеціальними вентиляторами нагніталось у котельне відділення, створюючи надмірний тиск. У наступних проєктах повітря, яке попередньо пройшло через підігрівач, безпосередньо надходило у топку.

Штучне дуття вперше було застосовано на американському броненосці «Monitor», побудованому Д. Еріксоном у 1862 р. Повітря в котельне

відділення нагнітали два вентилятори. Енергетична установка з паровою машиною потужністю 130 кВт забезпечували швидкість ходу 7 вузлів.

4.4. Створення та розвиток суднових парових водотрубних котлів

Перші суднові водотрубні котли з'явились у 30-х рр. XIX ст. Характерну для них конструкцію мав побудований у 1837 р. судновий водотрубний котел з прямими трубками, розташованими під невеликим кутом до горизонтальної площини (рис. 4.10). Пароводяний барабан був розміщений у верхній частині котла, кип'ятильні трубки вставлені у стінки передніх і задніх плоских камер, виготовлених із листової сталі. Пар збирався у верхній частині пароводяного барабана і відводився по трубі в парову машину.

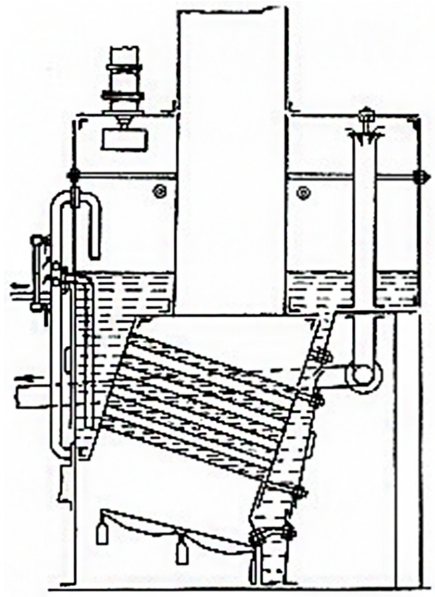


Рис. 4.10. Перший водотрубний котел

Недостатня міцність камер з плоскими стінками обмежувала тиск пари, за якого могли працювати ці котли. По суті цей котел був комбінованим вогневодотрубним. Цей агрегат став прототипом горизонтальних секційних водотрубних котлів.

Усі перші суднові водотрубні котли, які будували у 40–66 рр. XIX ст. являли собою апарати коробчастої форми, які були суттєво схожими зі своїми вогнетрубними прототипами, у яких димогарні трубки заміщені

на кип'ятильні. Значна частина поверхні нагріву в них складається із плоских стінок, тобто вони фактично були комбіновані. Кип'ятильні трубки розміщувались зсередини корпусів вертикально або горизонтально. Наявність плоских стінок суттєво стримувала зростання тиску пари. Його підвищення можливо було досягнути внаслідок створення конструкцій, у яких уся поверхня нагріву утворена циліндричними елементами невеликих розмірів.

Перший котел такого типу, придатний для тривалої експлуатації, був побудований у 1850 р. за проєктом француза Ж. Бельвіля (рис. 4.11).

Котел складався з декількох секцій водогрійних труб, виконаних у вигляді змійовиків. Секції розташовані одна над другою, вода надходить у нижній колектор, із нього у водогрійні труби й послідовно проходить по кожній секції. Такі агрегати отримали широке поширення у 60–90 рр. XIX ст., особливо на бойових кораблях.

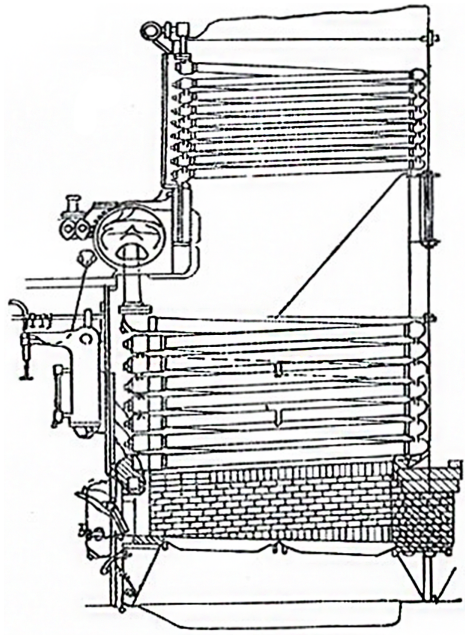


Рис. 4.11. Котел Бельвіля

Паропродуктивність котлів Бельвіля досягала 3–5 т/год за тиску 1,2–2 МПа. Маса води в них складала близько 8 % загальної маси. Агрегати мали високу ремонтопридатність, були зручними для поточного обслуговування. На початку XX ст. їх стали облаштовувати економайзерами, у яких живильна вода підігрівалась теплотою відхідних газів. Теплова ефективність таких котлів складала 80–82 %.

У той же час котли Бельвіля мали й певні недоліки: висока вологість виробленої пари; ненадійна циркуляція води через значний опір її руху по трубах з численними поворотами під кутом 180°.

Цікава інформація! Невелика паропродуктивність котлів конструкції Бельвіля компенсувалась їх кількістю. У 1895 р. на британському бронепалубному крейсері «Powerful» водотоннажністю 14 430 т було встановлено 48 таких котлів. Енергетична установка з паровими машинами загальною потужністю 18 400 кВт забезпечувала швидкість 20 вузлів.

У 60-х рр. XIX ст. був створений *секційний котел*. Таку назву котли отримали через те, що передня та задня камери, у яких були вставлені водогрійні трубки, складались з окремих коробок, які утворювали з комплектом вставлених у них трубок окремі секції. На рис. 4.12 поданий загальний вигляд секційного котла побудови 90-х рр. XIX ст.

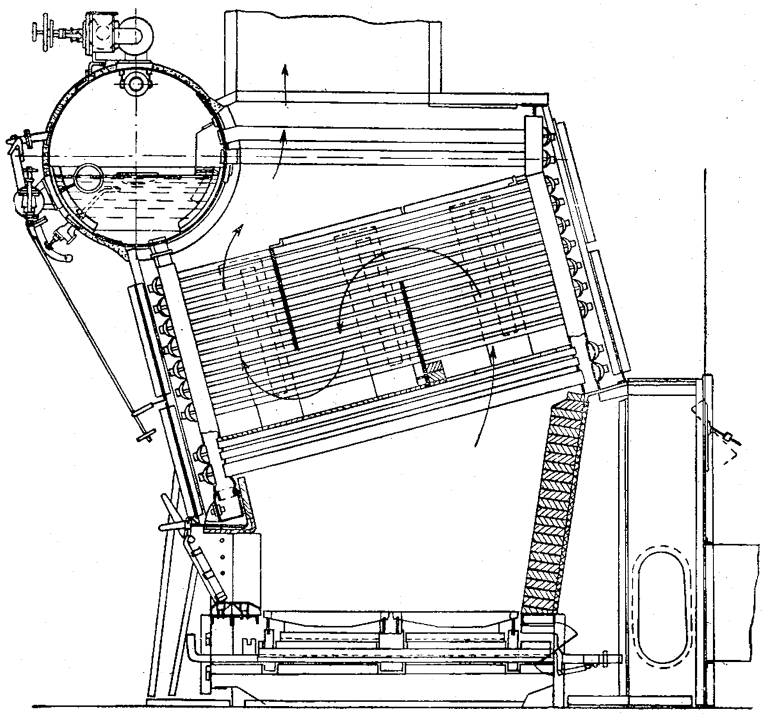


Рис. 4.12. Секційний котел побудови 90-х рр. XIX ст.

Поверхня нагріву утворена прямими водогрійними трубками, під якими розташована топка для кам'яного вугілля. Продукти згоряння омивають на всій довжині три перші ряди водогрійних трубок, після чого рухаються по звивистому шляху, утвореному перегородками. Для полегшення

виходу бульбашок утворюваної пари, трубки встановлені з нахилом. Під час утворення пари, що інтенсивно відбувається у найбільш обігрітих частинах трубок, знижується питома вага пароводяної суміші, це приводить до циркуляції води в котлі. Вода з пароводяного барабана опускається до передньої камери та проходить, частково випаровуючись, по трубах. Утворена пароводяна суміш із задньої камери проходить по верхніх рядах горизонтальних трубок та потрапляє в пароводяний барабан, де пара відділяється від води й потрапляє в паропровід.

Секційні котли, завдяки тому, що такі їх елементи як барабани, трубки й коробки можливо було зробити достатньо міцними, працювали за достатньо високого тиску пари – до 5 МПа.

У 1896 р. компанією «*Babcock & Wilcox*» було введено в експлуатацію секційний котел. Топка котла з вугільним опаленням екранована трубами діаметром 102 мм. Поверхня випарної системи складалась з 5 рядів прямих труб діаметром 102 мм та 11 рядів – діаметром 51 мм.

Топка невеликого об'єму розташовувалась під випарною системою. У верхній частині газоходу встановлений водяний економайзер. Швидкість руху газів у випарній системі становила всього 0,4–0,5 м/с. Тиск пари у таких секційних котлах складав 1,8–2,0 МПа, їх економічність вище ніж у оборотних.

У секційних агрегатах, які будувались в наступні роки топкові екрани не застосовувались, тому що способи водопідготовки, які існували на ті часи, не дозволяли попередити швидке забруднення екранів накипом. Топкові екрани в суднових котлах повернулись лише у 40-х рр. XX ст., після появи ефективних способів очищення води.

Під час Другої світової війни, у 1941–1945 рр. було побудовано декілька тисяч секційних котлів спрощеної конструкції, установлених на найбільш у світі серії – більше 2700 одиниць – транспортних суден «Lyberty», суховантажних і наливних.

Вони не мали топкових екранів, поверхні нагріву складались із труб великого діаметра. Це було пов'язано з необхідністю масового виготовлення у військовий період відносно простих, дешевих і надійних котлів, які б виробляли пару для парових машин.

Підвищена паропродуктивність котла була досягнена застосуванням петльового пароперегрівача та установленням у трубній системі перегородок, які зробили, його триходовим по газу. Ці конструктивні рішення дозволили підвищити швидкість газів та інтенсивність теплообміну. Очищення поверхні пароперегріву від сажі під час роботи забезпечувалось сажообдувним пристроєм. Патрубки й передні камери виконували функції опускних труб. Пароводяна суміш, утворена у кип'ятильних трубах,

через задні камери й горизонтальні труби відводилась у пароводяний колектор.

Котел працював на рідкому паливі, він виробляв 10 т/год слабоперегрітої пари з температурою 220–230 °С. Його ККД складав 84–85 %, питома маса – 5,9 кг/кг пари.

Секційні котлоагрегати вироблялись ще на початку 50-х рр. XX ст., незважаючи на широке розповсюдження вже нових типів водотрубних котлів. Секційні котли досягали паропродуктивності 20–30 т/год, тиску 3,5–4,5 МПа, температури перегріву – 400 °С, ККД – 93 % (рис. 4.13).

Секційні котли стали єдиним типом парових водотрубних котлів, які знайшли широке застосування протягом більше 70 років.

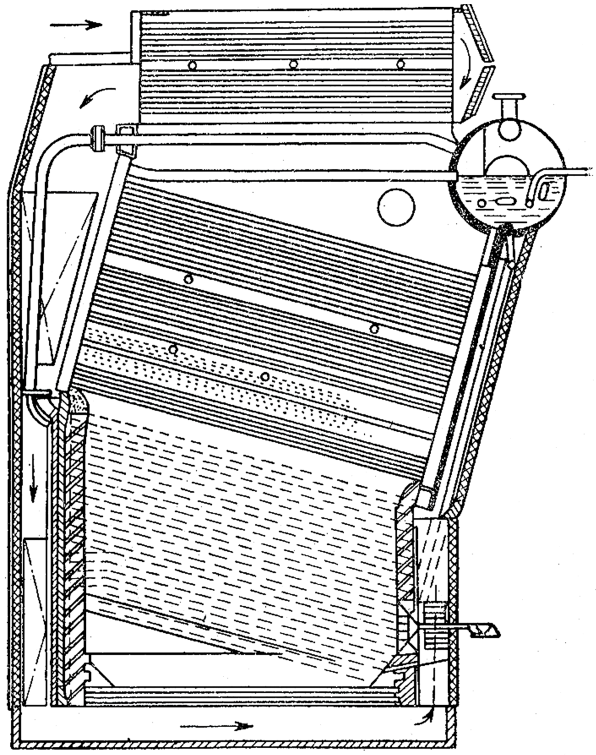


Рис. 4.13. Сучасний секційний котел

У середині 80-х рр. XIX ст. з'явились двопотокові барабанні водотрубні котли, які відносяться до котлів безкамерного типу. Вони були значно простішими за секційні й за однакової паропродуктивності мали меншу масу.

У таких котлах (на рис. 4.14. наведено схему котла «Yarrow»), поверхня нагріву була утворена двома системами «пучками» кип'ятильних трубок,

кінці яких приєднувались до двох нижніх і одного верхнього барабана. Топка розміщувалась у просторі між обома системами «пучком» трубок. Такі трибарабанні водотрубні котли носили назву «*котлів трикутного типу*».

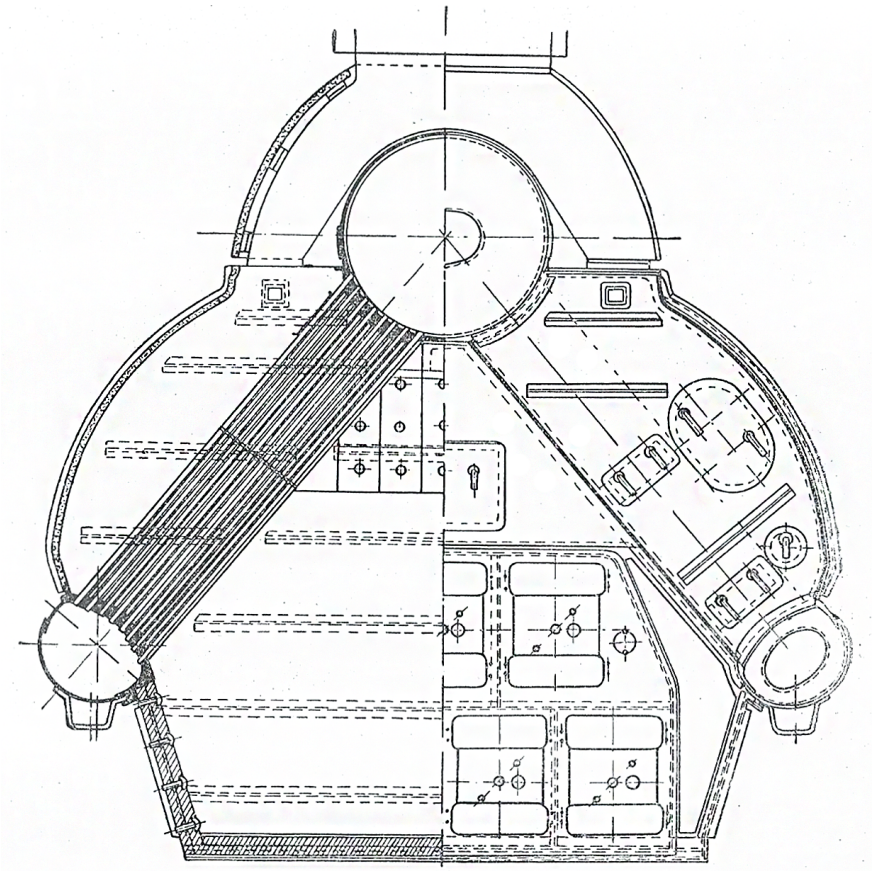


Рис. 4.14. Котел трикутного типу старої побудови

Топка котла мала мазутне опалення. Водяні (нижні) барабани виготовлені з двох листів з різними радіусами кривизни, причому листи, у яких закріплені кип'ятильні трубки, мають більшу товщину й меншу кривизну. Розпочинаючи з перших років застосування барабанних котлів, їх конструкція відрізнялась великим різноманіттям.

Барабанні котли мали низку позитивних якостей, які зумовили їх широке застосування як на транспортних, так і військових суднах наприкінці XIX – у першій треті XX ст.

Так, вісім парових котлів «Yarrow» трикутного типу з вугільним опаленням були встановлені на міноносці «Сокол», побудованому

у Великобританії у 1895 р. Дві машини з трійним розширенням пари потужністю по 700 кВт за тиску пари 1,4 МПа забезпечували кораблю швидкість ходу до 29,8 вузлів.

У 1900 р. фірма «Вільям Крамп та сини» установила на крейсері «Варяг» водотоннажністю 6500 т, побудованому у США, тридцять парових котлів конструкції Ніклоса. Котли з поверхнею нагріву площею 5786 м^2 та вугільним опаленням виробляли пару тиском 1,8 МПа. Дві парові машини потужністю 14 500 кВт забезпечували крейсеру швидкість ходу 24 вузли. При запасі вугілля 1250 т дальність плавання «Варяга» за швидкості 10 вузлів становила 5720 миль.

Незвичайний склад котельної установки був реалізований у 1902 р. на навчальному кораблі «Океан», водотоннажністю 12 100 т, побудованому на верфі «Howaldt» («Ховальд»). Паровиробна установка складалась із 6 котлів Бельвіля, шести котлів Ніклоса, трьох котлів «Yarrow» та двох котлів Шульца. Тиск пари у котлах – до 2,1 МПа, три парові машини з трійним розширенням пари потужністю по 4400 кВт за частоти обертання колінчастого вала 112 хв$^{-1}$ забезпечували кораблю швидкість ходу 19 вузлів.

На авіаносці США «Lexington», водотоннажністю 48 460 т, побудованому у 1927 р., було встановлено 16 трикутних парових котлів конструкції «Yarrow». Авіаносець розвивав швидкість ходу до 34 вузли за потужності турбогенераторів 136 000 кВт і тиску пари 1,9 МПа.

Парові турбіни, які інтенсивно впроваджувались на кораблях ВМФ у перші десятиліття XX ст., використовували для своєї роботи пару підвищених параметрів.

Цікава інформація! Тринадцять котлів трикутного типу конструкції «Yarrow» були встановлені на крейсері, закладеному в 1913 р. на Ревельскому суднобудівному заводі. Парові котли розміщувались попарно у семи водонепроникних відсіках (у першому відсіку – один котел). Дев'ять носових парових котлів мали мазутне опалення і працювали у відсіках за тиску повітря 120–150 мм водяного стовпа. Чотири кормові котла мали змішане вугільно-мазутне опалення і працювали за тисків у відсіках 70–85 мм водяного стовпа. Живильна вода підігрівалась до температури 80 °С. Котли генерували пару тиском 1,6–1,7 МПа. На випробуваннях у 1927 р. за водотоннажності 7070 т, потужності чотирьох парових турбін 43 000 кВт, крейсер розвивав швидкість ходу 29,4 вузли. На цьому режимі роботи енергетичної установки працювали 143 із 158 форсунок парових котлів, у топках спалювалось за годину 34 т мазуту і 5,5 т вугілля.

Два парові котла конструкції «Yarrow» з нафтовим опаленням та штучною тягою були встановлені на британському підводному човні типу К водотоннажністю 1860/2650 т, побудованому у 2015 р. Енергетична установка з двома паровими турбінами потужністю по 3750 кВт забезпечувала у надводному стані швидкість ходу 24 вузли.

За станом на 1934 р. тиск пари в котлах конструкції «Yarrow» досягав 3 МПа, температура – 355 °С. Вдала конструкція цих котлів визначила їх завидне довголіття.

Значне поширення трикутні водотрубні котли отримали на суднах річкового та морського флоту. На рис. 4.15 показана загальна будова такого котла побудови початку 50-х рр.

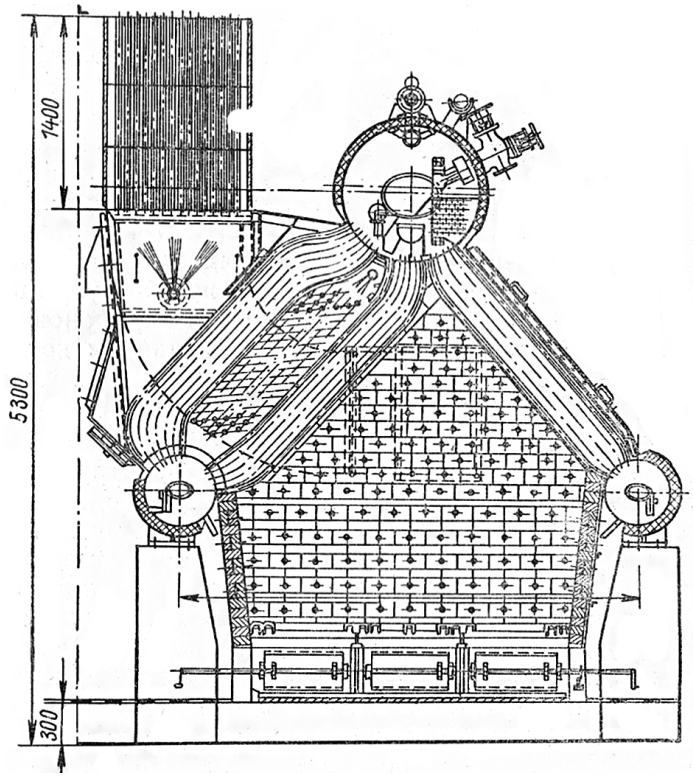


Рис. 4.15. Котел заводу «Ленінська кузня»

Водогрійні трубки котла виконані зігнутими, що забезпечує їх еластичність та полегшує кріплення у стінках барабанів. Поряд із цим, вигин трубок дозволяє підвищити їх кількість за однакових діаметрів барабана та зручно розмістити пароперегрівач, розташований у середині лівої системи водогрійних трубок. Для підігріву повітря, яке подається в топку, котел обладнаний повітропідігрівником.

4.5. Головні суднові парові котли сучасних суден (з другої половини XX ст. по сьогодні)

Головні котли. Барабанні водотрубні котли стали у визначені часи основним типом головних суднових парових котлів.

Перспективність їх застосування пов'язана з тим, що паро-продуктивність таких котлів може досягати 100 т/год, а ККД – 93 %. Їх питома маса (маса, віднесена до паропродуктивності в сім-десять разів менша ніж вогнетрубних котлів. Барабанні котли можуть бути побудовані для роботи за тиску пари до 10 МПа. Більша частина головних парових котлів, які будуються в першу половину розглянутого періоду, це вертикальні одноходові по газу котли з розвиненими хвостовими поверхнями нагріву, які виробляють пару підвищених параметрів.

У 60-ї рр. XX ст. у колишньому СРСР випускались танкери типу «Софія» вантажопідйомністю 47 000 т з головними турбозубчастими агрегатами (ГТЗА) потужністю 14 000 кВт, робота яких забезпечувалась котлами КВГ-34К (рис. 4.16). Марка котла розшифровується так: буквена частина являє собою скорочення, яке складається з початкових букв слів «котел водотрубний головний», цифра позначає паропродуктивність за нормального навантаження – 34 т/год, буква «К» означає, що котел модернізований. Тиск пари, яка виробляється котлом, становить 3,92 МПа, температура – 470 °С, ККД дорівнює 93 %.

Котел призначений для забезпечення парою головної енергетичної установки та загальносуднових парових споживачів, а також роботу таких механізмів, як парові палубні механізми, парові зачисні насоси тощо.

За компоновкою котел однопроточний, триколекторний з вертикальним петльовим пароперегрівником, економайзером і паровим повітронагрівником.

У котла КВГ-34К два контури циркуляції – *незалежний* та *змішаний*. До незалежного контуру входить конвективна система «пучок» з трубами діаметром 29×2,5 мм, розташована за пароперегрівником *9*. Усі труби підйомні.

Для опускання води у водяний колектор *10* передбачено *12* необігрівних опускних труб діаметром 114×7 мм, прокладених у міжобшивковому просторі каркаса: шість труб на боці переднього і шість – на боці заднього фронтів (на рис. 4.16 вони не показані).

Другий контур циркуляції утворений першим суцільним рядом бокового екрана з трубами діаметром 44,5×3 мм і притопкової системи, у якій два перші ряди труб мають діаметр 44,5×3 мм, а два наступні – 29×2,5 мм. Опускні труби цього контуру діаметром 57×3,5 мм розташовуються

за першим рядом екрана. Труби екрана і притопкової системи «пучка» під'єднанні до екранного колектора.

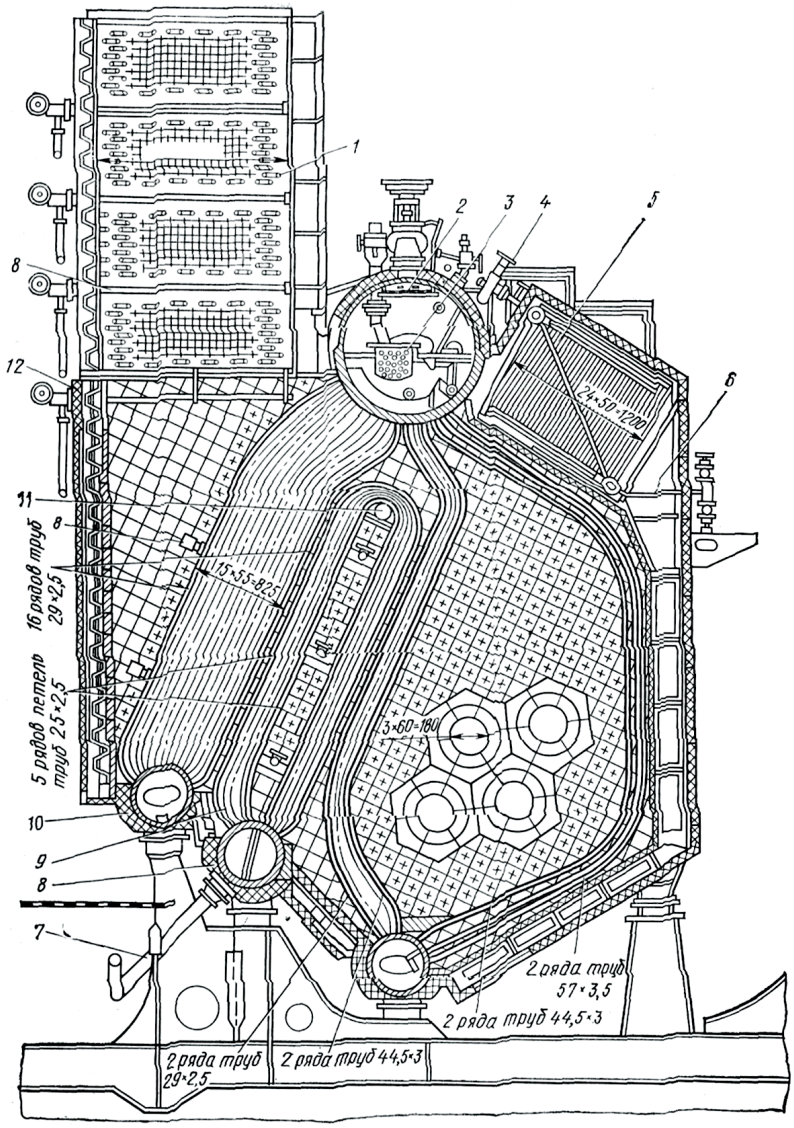


Рис. 4.16. Котел КВГ-34К

Петлі пароперегрівника виконані з труб діаметром 25×2,5 мм, які розвальцьовані у колекторі розгородженому вертикальною перегородкою.

У паровому колекторі *4* розташований допоміжний пароохолодник *3*, охолоджена пара витрачається на ходу для роботи турбоживильних насосів та пароструминних ежекторів головної паротурбінної установки.

Для очищення труб від зовнішніх забруднень передбачені автоматичні сажообдувні пристрої *8*.

Хвостовою поверхнею нагріву котла є двосекційний економайзер *1*, виконаний з чотирьох змійовикових пакетів з діаметром труб 38×3 мм.

У котлі застосований паровий повітропідігрівник *5*, установлений на передньому фронті котла і виконаний з прямих труб діаметром 22×2 мм. Для збільшення поверхні теплообміну на труби насаджені круглі ребра. Гріюча пара та конденсат рухаються зсередини труб, а повітря обтікає ребристу поверхню ззовні. Повітря, яке подається котельним вентилятором у міжобшивковий простір каркаса, спрямовується у підігрівник, нагрівається до 130 °С і надходить у топку. Топкова будова котла обладнана чотирма паромеханічними форсунками.

Застосування у конструкції котла парового повітропідігрівника замість газового, як у попередніх моделях подібних котлів (КВГ-25, КВГ-25К), які встановлювались на великій серії суховантажних суден, дозволило усунути низькотемпературну сірчисту корозію труб підігрівника.

Наочне уявлення про будову однопротокового двоколекторного вертикального водотрубного котла надає рис. 4.17. Паропродуктивність котла – 29 т/год, тиск перегрітої пари складає 4,7 МПа, температура – 470 °С, ККД – 92 %.

Конвективна система труб «пучок» *2* та *5* розділена суцільною стінкою на дві частини. Стінка утворена випарними трубками *9*, які включені у загальний контур циркуляції. Перша частина системи «пучка» включає в себе лише випарні трубки *5*, друга його частина складається з випарних трубок *2* та двоколекторного пароперегрівача *14*.

Регулювання витрати димових газів, які протікають через розділені частини конвективної системи здійснюється шиберами *1* та *4*. Необігрівані опускні труби *12*, підключені до пароводяного колектора *7* і водяного колектора *15*, проходять у міжобшивковому просторі каркаса. Пароперегрівник закріплений на підтримуючих випарних трубках, включених у контур циркуляції. Боковий *11* та задній торцевий *10* екрани під'єднані до колекторів заднього екрана *8*.

Топковий пристрій *13* розміщений на передньому фронті котла. Паросепаруючі циклони *6*, розміщені у пароводяному колекторі, забезпечують відділення вологи, для одержання сухої насиченої пари, яка потім направляється на пароперегрівник. З метою уникнення можливості виникнення хімічної корозії котел обладнаний комбінованим повітропідігрівником: повітря спочатку підігрівається у паровому, а потім – у газовому підігрівниках.

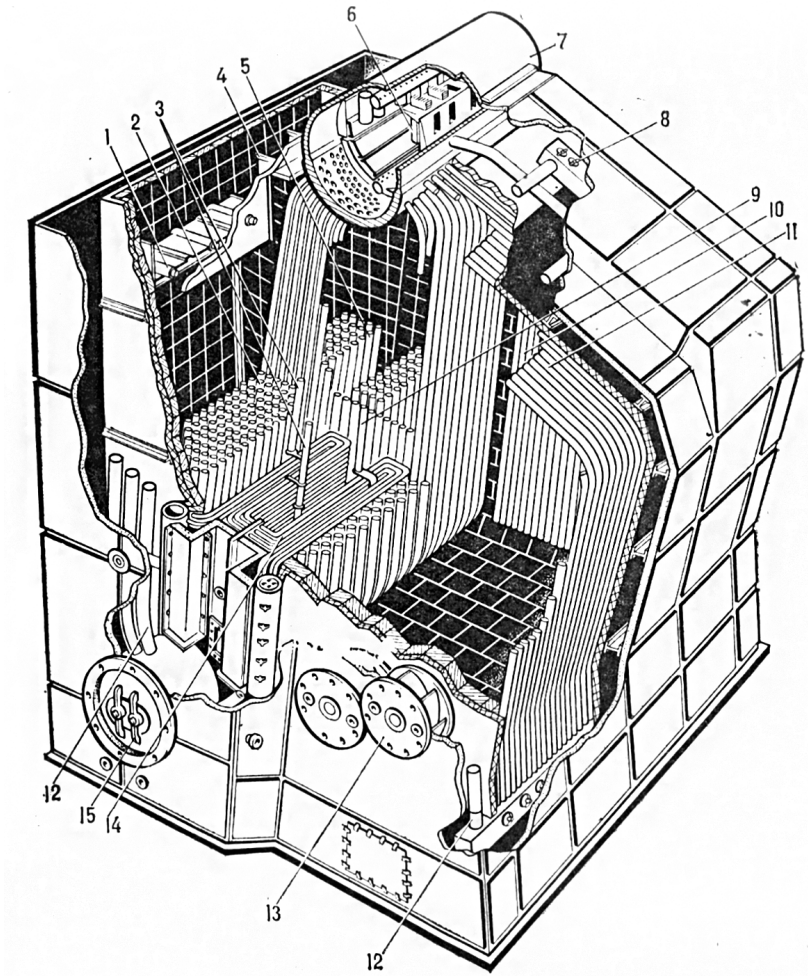


Рис. 4.17. Головний котел танкера «Труд»

Найбільш досконалі й економічні потужні пароенергетичні установки виконуються з проміжним перегрівом пари. Застосування проміжного перегріву пари привело до специфічних конструктивних особливостей котлів. Такі котли обладнують випарними елементами тільки радіаційного типу, які утворюють повністю екрановану топку. Середніми екранними стінками, утвореними з випарних труб, котли поділяються на дві частини: топкову камеру й камеру, у якій розміщуються конвективні поверхні нагріву основного й проміжного пароперегрівників і економайзера. До того ж утворюється шахтне компонування, тому такі агрегати називають «*котлами шахтного типу*».

Подібна котельна установка застосована в енергетичних установках великотоннажних танкерів типу «Крим».

Технічні характеристики головного котла КВГ-80 наведені нижче:

Паропродуктивність, т/год	80
Тиск пари, МПа:	
перегрітої	7,85
у пароводяному колекторі	8,83
Температура, °С:	
відхідних газів	115
перегрітої пари	515
повітря, що подається до топки	217
живильної води	223
пари за ППП	515
ККД, %	96

Принципова схема котла КВГ-80 наведена на рис. 4.18, а поперечний переріз – на рис. 4.19 (нумерація позицій однакова). Шахта топкової камери, утворена екранами *11*, *13*, *15*, становить праву частину котлоагрегата. Труби торцевих екранів закріплені у колекторах *9* та *14*. У верхній частині топкової камери *12* розташовані чотири паромеханічні форсунки *7*. Таке розташування форсунок називається «*стельовим*». Опускними є труби *10*, що з'єднують пароводяний колектор *2* з водяним колектором *16*.

Утворені в топці продукти згоряння палива проходять через розріджену ділянку труб *15* і потрапляють у ліву шахту *18*, у якій розміщені конвективні змійовикові поверхні нагріву основного *19* та проміжного *25* пароперегрівників, економайзера *29* і трубчасті поверхні нагріву повітронагрівника *1*.

Пара з пароводяного колектора по паропроводу *8* надходить в основний пароперегрівник *19*, який складається з двох секцій. Частина пари після першої секції може бути спрямована по паропроводу *17* до головного охолодника *5* для регулювання температури перегрітої пари. З основного пароперегрівника пара по паропроводу *21* надходить на головну турбіну.

Передбачені також часткове відведення пари по паропроводу *20* до допоміжного пароохолодника *4* і подача її до магістралі охолодженої пари *3*. Частково відпрацьована у ТВТ пара по паропроводу *27* надходить в ППП *25*, з якого знову перегріта пара по паропроводу *23* потрапляє на ТСТ.

Остання система труб (третього ходу) з боку газів має захисне покриття фторопластом від низькотемпературної хімічної корозії. Попередній підігрів повітря живильною водою на режимах малих навантажень забезпечується підігрівником *30*. Система автоматичного регулювання горіння палива дозволяє змінювати паропродуктивність агрегата в діапазоні 10…90 т/год.

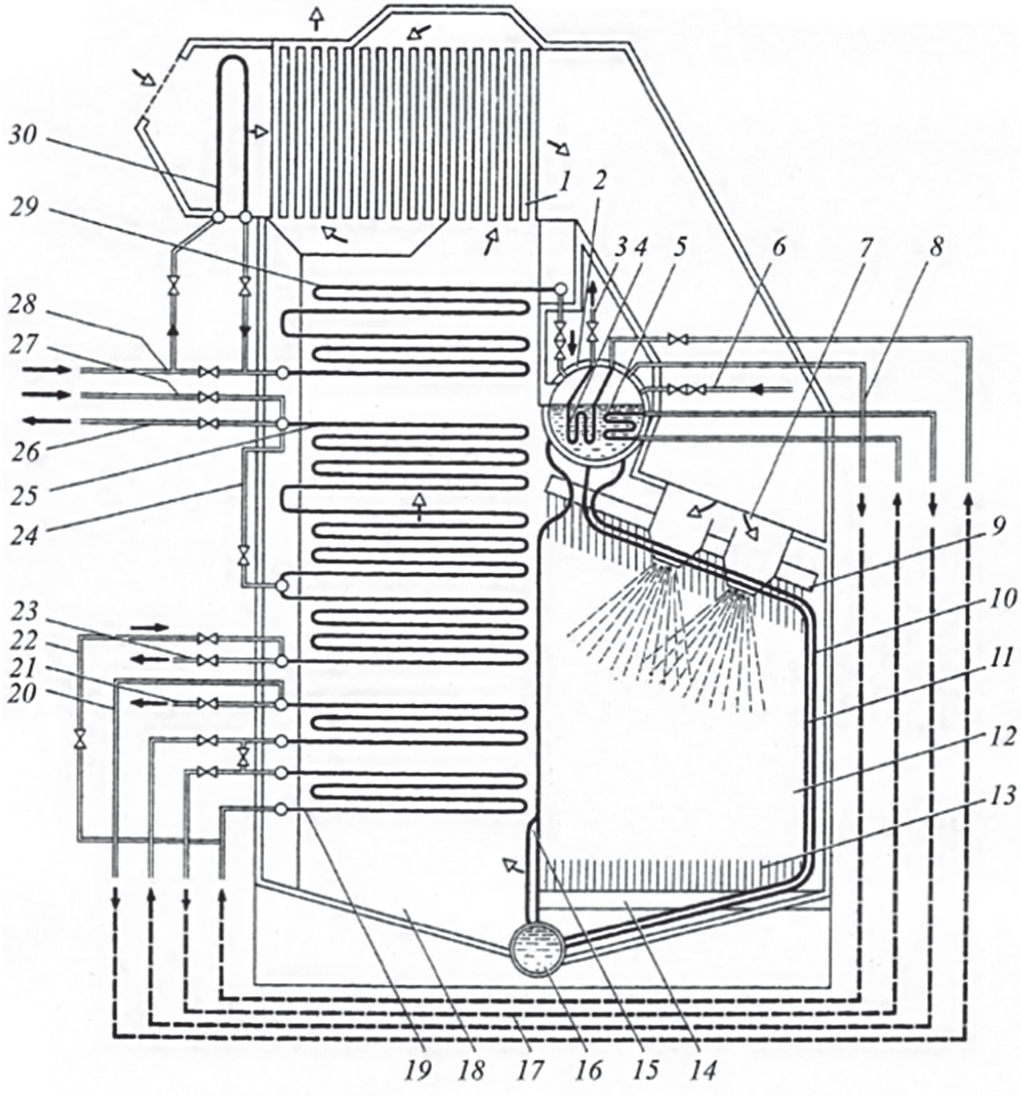


Рис. 4.18. Компонування котла КВГ-80

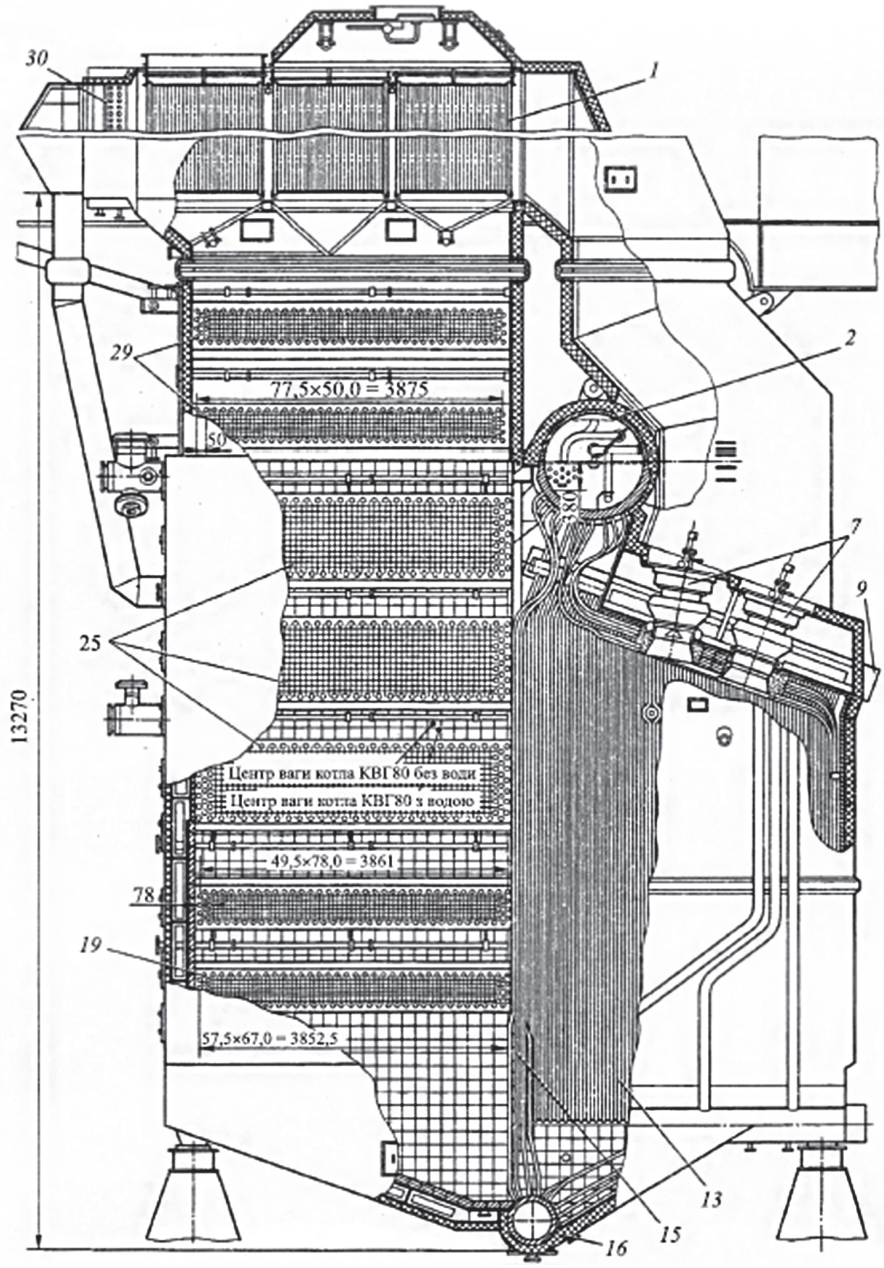


Рис. 4.19. Котел КВГ-80 (поперечний переріз)

Призначення перепускних паропроводів *24* та *22* наступне: перший з них – для регулювання температури перегрітої пари в ППП, а другий – для подачі насиченої пари до ППП з метою захисту від перегріву (прожогу) і скидання її по паропроводу *26* у систему охолодження пари.

Живильна вода подається в економайзер по трубопроводу *28*. Вода до котла подається також по трубопроводу *6*.

Повітропідігрівник – триходовий по газу та одноходовий за повітрям.

У середині 70-х рр. XX ст. у світі було побудовано декілька супертанкерів водотоннажністю більше 500 000 т. До складу ПТУ цих суден входили потужні головні парові котли типу ESD компанії «Foster Wheeler».

Два вертикальні двобарабанні D-подібні парові котли були встановлені на супертанкері «Batillus» водотоннажністю 632 000 т, побудованому у 1976 р. у місті Saint Naraize (Франція) на верфі «Chantiers de L'Atlantiqu» для нафтової компанії «Shell». Парові котли «Foster Wheeler» з ККД 95 % виробляли 250 т/год пари, перегрітої до температури 515 °С за тиску 8 МПа. У котлах застосовувались 4 форсунки з паровим розпилювачем. Енергетична установка з двома паровими турбінами потужністю 47 600 кВт забезпечувала танкеру швидкість ходу до 16,7 вузлів. Добова витрата палива на два котли складала 330 т. Вивантаження нафти відбувалось чотирма вантажними насосами із загальною подачею 24 000 м^3/год. Вони приводились до дії чотирма паровими турбінами потужністю по 14 400 кВт, що складає біля 30 % від потужності головних парових турбін.

Цікава інформація! Гіганти танкерного флоту. Протягом 1976–1979 рр. у місті Saint Naraize була побудована серія з чотирьох однотипних супертанкерів:

1976 р. – «Batillus» (утилізований у 1985 р.), два п'ятилопатевих гребних гвинта мали діаметр 8,5 м.

1976 р. – «Bellamia» (утилізований у 1986 р.).

1977 р. – «Pierre Guillanmat», перейменований у «Sea Brilliant» (утилізований у 1983 р.).

1979 р. – «Prairial», перейменований на «Hellas Fos», потім на – «Sea Giant» (утилізований у 2003 р.).

Основні характеристики серії супертанкерів: довжина складає 414 м, ширина – 63 м, висота борту – 35,9 м, найбільша осадка – 28,6 м. Місткість 23 вантажних танків складає 66 700 м^3.

Дедвейт судна – 533 000 т. Формально найбільшим у світі до 2010 р. вважався танкер «Knock Nevis», але своїх габаритів він придбав не при «народженні», а внаслідок подальших робіт з модернізації. Історія цього судна незвичайна і навіть дещо авантюрна. Побудоване в 1976 році

у Японії на верфі компанії «Оррама». Під час побудови судно мало найбільшу довжину – 376,7 м, ширину – 68,9 м і висоту борту – 29,8 м. Дедвейт його складав 418 610 т. Головна енергетична установка – паротурбінна з турбіною «Stal Laval» потужністю 37 500 кВт, чотирилопатевий гвинт діаметром 9,3 м забезпечував швидкість ходу 16 вузлів.

У 1979 р. танкер «Оррама» пройшов модернізацію й отримав назву «Sea Wise Giant». Після того, як танкер розрізали навпіл і встановили посередині циліндричну вставку, його дедвейт збільшився майже на 15 000 т, довжина стала дорівнювати 458,5 м, осадка – 24,6 м, дедвейт – 564 700 т, повна водотоннажність – 657 000 т. Надалі танкер міняв власників та назви. У 1991 р. він отримав назву «Happy Giant», наприкінці цього ж року – «Jahre Viking», яку він носив до 2004 р., коли він отримав нову назву – «Knock Nevis». У 2009 р. назва була замінена на «Mont», з якою супертанкер був відправлений на утилізацію.

На сьогодні найбільшим наливним судном у світі стало «Shell Prelude» класу FLNG (Flooting Liquefield natural gas). Це плавуча споруда, яка являє собою платформу, на якій розташований завод, призначений для видобування, підготовки, зрідження, зберігання і відвантаження зрідженого природнього газу (ЗПГ). Це судно не має власного ходу, наявні лише підрулюючи енергетичні засоби, що забезпечують маневрування.

Розміри судна, побудованого у 2013 році: довжина складає 488 м, ширина – 74 м, висота – 105 м.

На рис. 4.20 наведений двопаливний головний паровий котел «Spanner ESD», що спалює як рідке паливо, так і випар скрапленого газу. Це сучасний котел радіаційного типу з D-подібною топкою та стельовим розташуванням топкових пристроїв фірми «Greens Power Ltd», які раніше випускались фірмою «Foster Wheeler» під маркою ESD IV [3]. Абревіатура ESD розшифровується англійською мовою як «External Super Dtype». На відміну від убудованого петльового ПП, який розміщували між притопковим екраном і конвективною паротвірною системою перших моделей котлів D-типу, у цих котлах зовнішній ПП розміщують у зоні більш низьких температур, що суттєво підвищує надійність роботи таких ПП. Ці котли встановлюють на паротурбінних суднах-газовозах.

Основними елементами котла є дві з'єднані між собою повністю екрановані секції – топка *12* і конвективна шахта *18*, у якій розміщені конвективні поверхні нагріву – перша *19* і друга *17* секції ПП та економайзер *20*. Ці секції розділені середнім екраном *15*, у нижній частині якого труби розведені у два ряди, утворюючи фестон *14*, через який гази з топкової камери надходять у конвективну шахту. Екранні труби приварені до колекторів – пароводяного й колектора середнього екрана [3].

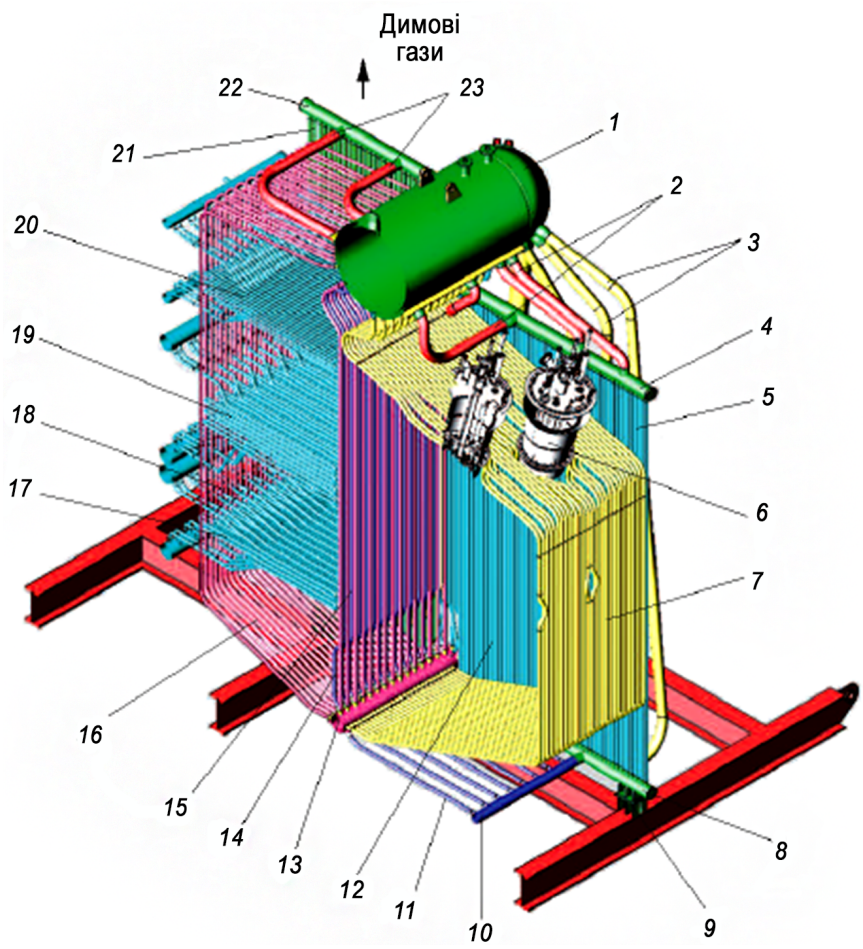


Рис. 4.20. Головний котел «Spanner ESD» (без кожуха та арматури)

Конфігурація топки обрана з урахуванням верхнього розташування топкових пристроїв *6*, а розміри її – з урахуванням повного заповнення топки факелом і утворення рівномірного зазору між ним і навколишніми екранами.

Стінки котла як біля топки, так і конвективної шахти, повністю утворені газощільними мембранними екранами: фронтовими (переднім і заднім) *5* і *21* та боковими – правим *7* та лівим *16*. Пароводяна суміш з верхніх колекторів фронтових екранів спрямовується до парового колектора *1* по перепускних трубах *2* та *23*. Труби бокових екранів з'єднані безпосередньо з паровим колектором середнього екрана.

Топкові пристрої зовнішні для спалювання рідкого палива та випару скрапленого газу, форсунки паромеханічні. Кількість топкових пристроїв від *1* до *3* залежно від паропродуктивності котла. Помірне теплове

напруження об'єму топки і поверхні труб топкових екранів (відповідно 700 та 250 кВт/м^2), що забезпечує низьку температуру металу труб у топці та тривалий термін їх служби.

Опускні труби *3* великого діаметра, розташовані за екраном, з'єднують паровий колектор котла з переднім і заднім, роздавальними колекторами фронтових екранів (по три опускні труби біля топки й дві біля конвективної шахти з кожного фронту). Поліпшенню циркуляції сприяють колектор *10* і труби *11*, що забезпечують перепуск води з роздавальних колекторів *8* до середнього екрана *13* [3].

Таким чином, у котлі організовано п'ять контурів циркуляції: два фронтові, два бічні та один – середнього екрана.

У паровому колекторі котла встановлені живильна труба, сепараційні пристрої, елементи системи верхнього продування, перегородки для організації циркуляції води. Пара з парового колектора надходить у ПП, а вода – в опускні труби. Паровий колектор, колектори екранів й опускні труби вкриті тепловою ізоляцією. Усередині парового колектора розташовані головний пароохолодник, призначений для регулювання температури пари, яка використовується допоміжними механізмами.

Котли забезпечують отримання перегрітої пари з тиском 4–7 МПа і температурою 400–515 °С. Паропродуктивність – до 120 т/год. На одному судні – газовозі встановлюють два котли паропродуктивністю по 65 т/год кожний за тиску пари 6,2 МПа. З метою спрощення конструкції котлів ESD вони не обладнуються повітропідігрівниками, на них установлені тільки економайзери, на сталеві труби яких діаметром 150 мм насаджені чавунні ребристі елементи діаметром 115 мм. ККД котла становить 92 %.

Фірма «Mitsubishi Heavy Industries» випускає головні котли MB-E та MBF без проміжного перегріву пари, паропродуктивністю відповідно 36–70 та 120–220 т/год з тиском при 6,0 МПа та температурою перегріву до 519 °С.

Ці головні котли розроблені для ПТУ серії UST (Ultra Steam Turbine), які мають знижену на 15 % витрату палива порівняно з попередніми установками, низьку емісію CO_2, NO_x та SO_x, можливість працювати на рідкому та газоподібному паливах (рис. 4.21). Установки обладнують головними паровими турбінами потужністю від 13 000 до 37 000 кВт. Котел з проміжним пароперегрівом виробляє перегріту пару тиском 10–12 МПа з температурою 560 °С. Паропродуктивністю котлів – 40–70 т/год.

Широкого розповсюдження в корабельних ПТУ набули високонапірні котли типу КВГ [3]. Котли водотрубні двоколекторні, з природною циркуляцією та газотурбінним наддувом повітря у двошаровий корпус.

Ці котли обладнані вертикальним пароперегрівником та гладкотрубним змійовиковим економайзером. Окремі типи таких котлів, як КВГ-2, КВГ-3, КВГ-4 встановлювались на кораблях ВМФ, зокрема на важких авіаносних крейсерах типу «Київ» (м. Миколаїв, Україна).

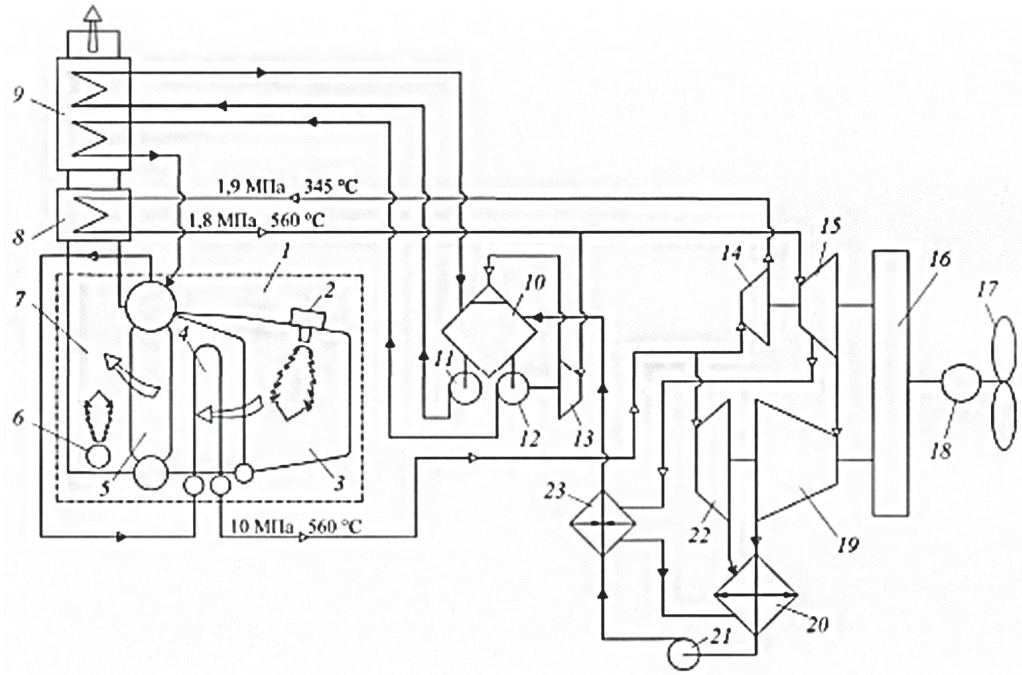


Рис. 4.21. Принципова теплова схема ПТУ серії UST:
1 – головний котел MBR-E; *2* – основний топковий пристрій; *3* – екранована топка; *4* – основний ПП; *5* – конвективна паротвірна система; *6* – топковий пристрій проміжного ПП; *7* – газохід, охолоджуваний водою; *8* – проміжний ПП; *9* – економайзер; *10* – деаератор; *11* – циркуляційний насос; *12* – живильний насос; *13* – ПТ живильного насоса; *14* – ПТ високого тиску; *15* – ПТ середнього тиску; *16* – редуктор; *17* – гребний гвинт; *18* – валогенератор; *19* – ПТ низького тиску; *20* – головний конденсатор; *21* – конденсатний насос; *22* – турбіна заднього ходу; *23* – регенеративний підігрівник

У таких котлах осьовий багатоступеневий компресор турбонаддувного агрегата приводиться в обертання одноступінчастою газовою турбіною, яка встановлена в газовому тракті котла і працює за рахунок використання димових газів. Компресор стискає повітря з атмосфери до 0,3 МПа і нагнітає його у міжобшивковий простір двошарового кожуха котла. Повітря, що виходить з кожуха подається до топкових пристроїв, розміщених по три з переднього і заднього фронту. Високий тиск повітря дозволяє спалювання, більшої кількості палива у малому об'ємі топки, інтенсифікує процес горіння та теплообміну в поверхнях котла, як

наслідок, знижує масу й габарити таких котлів у 2–2,5 рази порівняно з ПК з вентиляторним дуттям. Паливо подається паромеханічною форсункою з тиском пари 0,2 МПа. Підвищення температури повітря до 150 °С під час стискання в компресорі дозволяє відмовитись від газового повітропідігрівника. Продукти згоряння, що утворюються у топці, спочатку омивають конвективні паротвірні поверхні, потім вертикальний двоколекторний ПП та гладкотрубний змійовиковий ПП. Гази, що виходять з економайзера очищаються від механічних домішок: сажі, окалини, інших забруднень у газоочисному пристрої. Очищені гази надходять у газову турбіну, де вони розширюються, їх температура при цьому знижується на 150–200 °С. Відпрацьовані у ГТ гази через охолодник виходять у димохід (рис. 4.22). Додаткова ПТ підключається автоматично до компресора за допомогою муфти під час розпалювання котла та його роботі на перехідних режимах, коли потужності ГТ недостатньо. Пара підводиться від допоміжного ПК.

Контур циркуляції котла складається з опускних заекранних труб, паротвірних труб екрана й конвективної паротвірної системи «пучка», замкнених на паровий і водяний колектори.

Конвективна система складається з дев'яти рядів труб, екран виконаний однорядним із труб Ø30×3 мм, які утворюють суцільну стінку. Система «пучок» опускних труб – це чотири ряди труб Ø57×3,5 мм. Паровий колектор має діаметр 1100 мм, водяний колектор – 450 мм. Система ПП складається із десяти рядів труб Ø20×2,5 мм.

Економайзер (ЕК) складається з 18 паралельних десятирядних здвоєних змійовиків Ø25×3 мм, замкнених на вхідну і вихідну камери. Зовнішній кожух, що знаходиться під підвищеним тиском, має мідну конструкцію циліндричної форми з еліптичними днищем.

У котлі сажообдувні пристрої не застосовуються, очищення поверхонь від сажі відбувається у режимі самообдування за рахунок високих швидкостей руху газів у газоході котла під час роботи ТНА.

Для котлів типу КВГ характерні високі масогабаритні показники (відносна маса 0,4–0,6 кг/(кг/год). Паропродуктивність котлів складає 75–100 т/год, тиск перегрітої пари – 3,9–6,0 МПа, температура – 300–400 °С, ККД котла – 83 %.

На рис. 4.23 показаний модернізований високонапірний котел типу КВГ-6М [3]. Особливості цього котла – підвищені параметри пари: тиск – 8 МПа і температура – 515 °С; маса котла – 38,8 т; знижена температура відхідних газів до 420 °С на номінальному навантаженні, що підвищило ККД котла на 3–5 % (до 88 %); застосовані вдосконалені топкові пристрої.

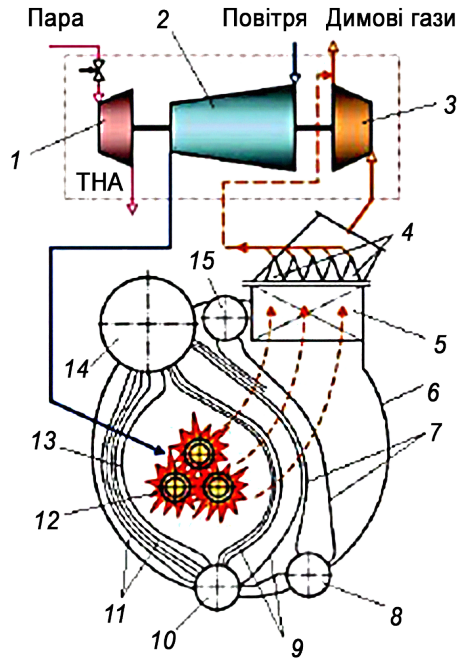


Рис. 4.22. Схема високонапірного ПК з природною циркуляцією:
1 – додаткова ПТ; *2* – компресор; *3* – ГТ; *4* – газоочисний пристрій; *5* – економайзер; *6* – кожух; *7* – ПП; *8* – нижній колектор ПП; *9* – КПП; *10* – водяний колектор; *11* – опускні труби; *12* – топковий пристрій; *13* – екран; *14* – паровий колектор; *15* – верхній колектор пароперегрівника (ПП)

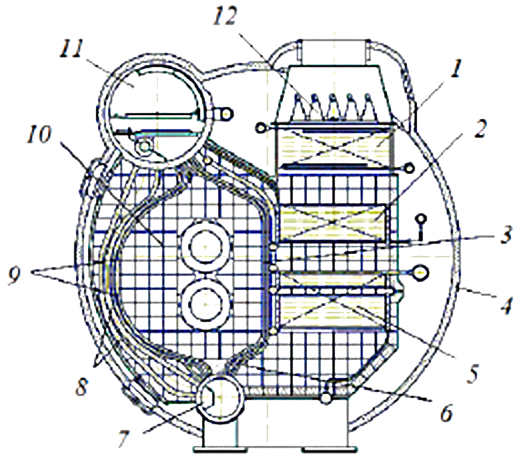


Рис. 4.23. Модернізований високонапірний котел типу КВГ-6М (ТНА та арматура не показані):
1 – економайзер; *2* – паротвірна поверхня; *3* – екран; *4* – кожух; *5* – пароперегрівник; *6* – фестон; *7* – водяний колектор; *8* – опускні труби; *9* – екран; *10* – топка; *11* – паровий колектор; *12* – газоочисний пристрій

Циркуляція води в котлі здійснюється за комбінованою схемою: природна – у екранах, примусова – у змійовикових паротвірних поверхнях нагріву, що сприяє зменшенню маси та габаритів котла.

4.6. Допоміжні суднові парові котли

Допоміжні парові котли паротурбінних суден. На паротурбінних суднах з двома головними агрегатами допоміжні котли зазвичай не застосовуються. На стоянках працює тільки один котел, навантаження якого визначається залежно від потреб у парі на стоянкових режимах.

На транспортних (здебільшого великотоннажних танкерах) або пасажирських суднах, обладнаних тільки одним головним котлом, передбачається обов'язкове встановлення допоміжного котла, продуктивність якого забезпечує потреби у парі на стоянках, підігрів вантажу і миття танків. Поряд із цим, такий допоміжний котел повинен забезпечити роботу ГТЗА з потужністю, за якою судно мало б швидкість 7…8 вузлів і було стабільно керованим.

Характерним представником таких котлів є допоміжний котел КВ 35/25-1 танкера «Крим», поданий на рис. 4.24 [3].

Котел – водотрубний, вертикальний, однопротоковий, двоколекторний. Хвостовими поверхнями нагріву даного котла є паро- і повітропідігрівник. Контур циркуляції води утворений підйомними трубами екрана *4*, конвективною системою труб *1* та опускними трубами *5*, розташованими за першим рядом екрана. Усі труби підключені до пароводяного *6* і водяного *2* колекторів. На котлі встановлені сажообдувний пристрій *7*, повітропідігрівник *8* і водопідігрівник *3*.

Водопідігрівник установлений усередині водяного колектора *2*, він забезпечує підігрів котельної води теплотою перегрітої пари. Це необхідно для підтримання агрегата в гарячому резерві. Пароперегрівник *9* складається з двох секцій. Трубна його частина складається із 112 здвоєних змійовиків. Повітропідігрівник вертикальний, одноходовий по газу і повітрю, труби його приварені до решіток. Повітря від дуттьового вентилятора спочатку подається у міжобшивковий простір, а потім – у міжтрубний простір повітропідігрівника.

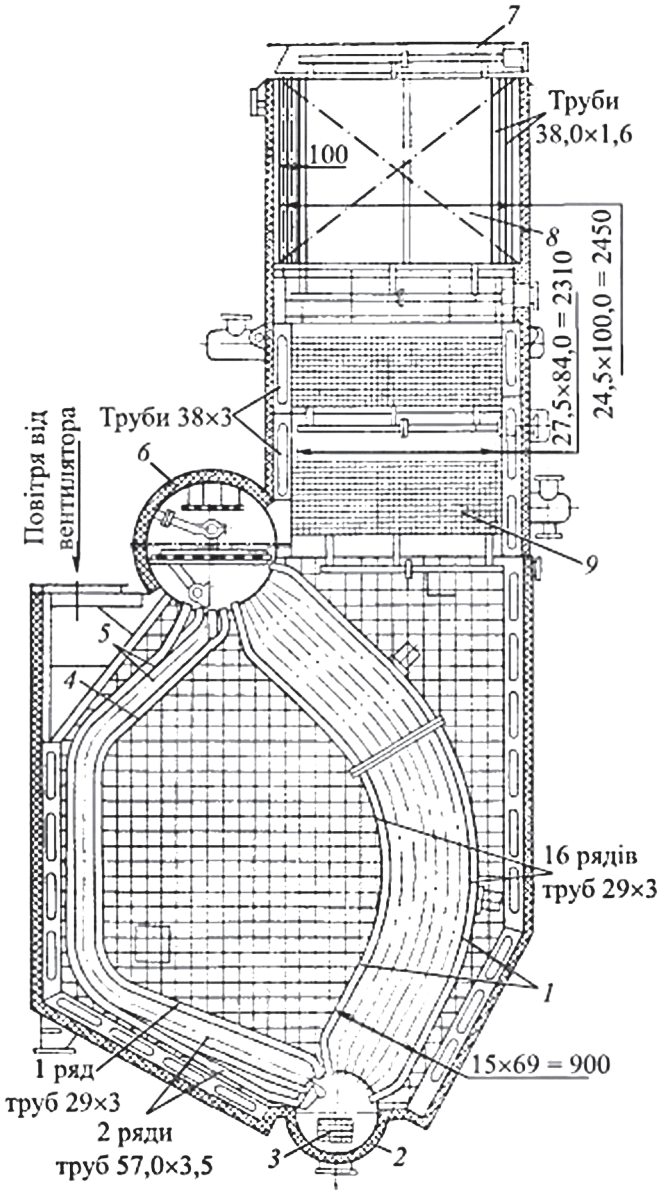


Рис. 4.24. Котел «КВ-35/25-1»

Технічні характеристики допоміжного котла «КВ-35/25-1» наведені нижче:

Паропродуктивність	35 т/год
Тиск перегрітої пари	2,45 МПа
Температура, °С:	
перегрітої пари	330
живильної води	60
ККД, %	91

Допоміжні парові котли суден з ДЕУ. Серед усіх типів морських суден з головною ДЕУ для танкерів і нафторудовозів характерне найбільш насичене допоміжне пароенергетичне устаткування, що пов'язано з експлуатаційними особливостями цих суден. Більшість морських дизельних танкерів є великотоннажними суднами з потужними енергетичними установками, які мають найбільшу ефективність використання ходового часу, що визначається швидкістю навантаження і вивантаження, тобто нетривалими стоянками в порту. Вантаж у порту призначення відкачують судновими засобами протягом 8…10 год, а це можливо за умови, що вантажні насоси мають привід значної потужності. Одним із альтернативних варіантів приводу вантажних насосів може бути застосування допоміжних парових турбін.

Поряд із цим танкери обладнують паровими системами підігріву вантажу, підігріву води під час миття танкерів, системами пропарювання танків після викачування з них вантажу. Природно, що за такого потужного пароенергетичного господарюванню необхідно застосовувати допоміжні котли високої продуктивності.

Окрім цього, продукти згоряння палива від допоміжної котельної установки використовують у системі інертних газів, якими з метою зниження пожежонебезпеки заповнюють цистерни й танки.

Допоміжні котли на великотоннажних танкерах і нафторудовозах за розмірами, компонуванням поверхонь нагріву й параметрами близькі до головних. Характерну будову має допоміжний котел КВ1-1, установлений на нафторудовозі типу «Борис Бутома» (рис. 4.25).

Технічні характеристики допоміжного котла КВ1-1 наведені нижче:

Паропродуктивність	30 т/год
Параметри пари:	
тиск	2,6 МПа
температура	320 °С
ККД	93 %

Характерною особливістю цього котла є двоколекторний пароперегрівник, розташований безпосередньо за конвективною системою *7* паротвірних труб котла, економайзер відсутній.

У колекторах пароперегрівника *2* і *9* установлено по чотири поперечні перебірки, тому насичена пара по трубі *3* із парового колектора котла *1* надходить у верхній колектор *2* пароперегрівника і після восьми ходів у межах системи труб «пучка» *8* відводиться перегрітою з верхнього колектора. Уникненню вібрації систем труб «пучка» *7* та *8* сприяє підтримуючий пристрій *6*. Топка котла обладнана двома паромеханічними

форсунками. Сажообдувні пристрої *5* мають дистанційне керування. Тут також показані: *4* – повітропідігрівник; *10* – водяний колектор; *11* – труби екрана; *12* – опускні труби.

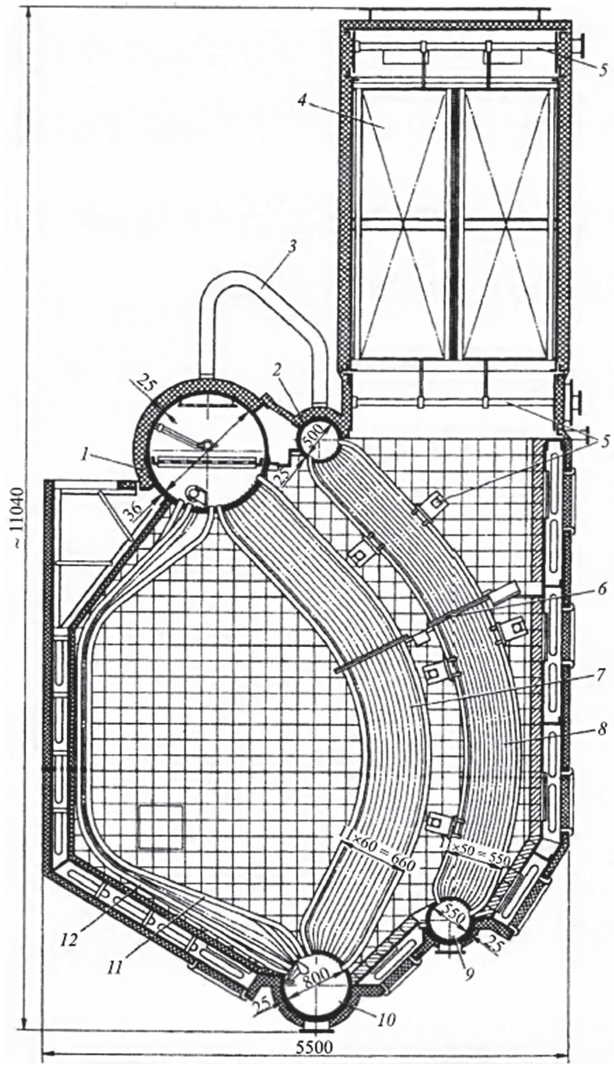


Рис. 4.25. Котел «КВ1-1»

На суховантажних суднах широко розповсюджені допоміжні котли типу КВВА та КАВ. Серійно випускається типорозмірний ряд котлів КВВА паропродуктивністю 1…12 т/год на тиск пари 0,5…2,8 МПа. Ці котли не мають хвостових поверхонь нагріву. Їх марка розшифровується таким чином: буквена частина являє собою скорочення, яке складається з початкових букв слів «Котел автоматизований водотрубный»,

цифра в чисельнику визначає паропродуктивність, т/год, цифра у знаменнику – робочий тиск, кг/см^2.

Розглянемо загальну будову котла «КВВА-2,5/5» (рис. 4.26). Паропродуктивність котла – 2,5 т/год за робочого тиску 0,5 МПа. Котел вертикальний, двоколекторний, однопроточний, з природною циркуляцією, ККД – 80 %.

Труби екрана *8* і конвективної системи «пучка» *12* є підйомними, труби *7*, розташовані за екраном, опускні. Усі труби з'єднуються з паровим *5* і водяним *10* колекторами. Живильна вода подається через патрубок *6*, над яким розміщений заспокоювальний дірчастий щит *2*, біля парозабірного патрубка *3* також передбачений аналогічний щит *4*.

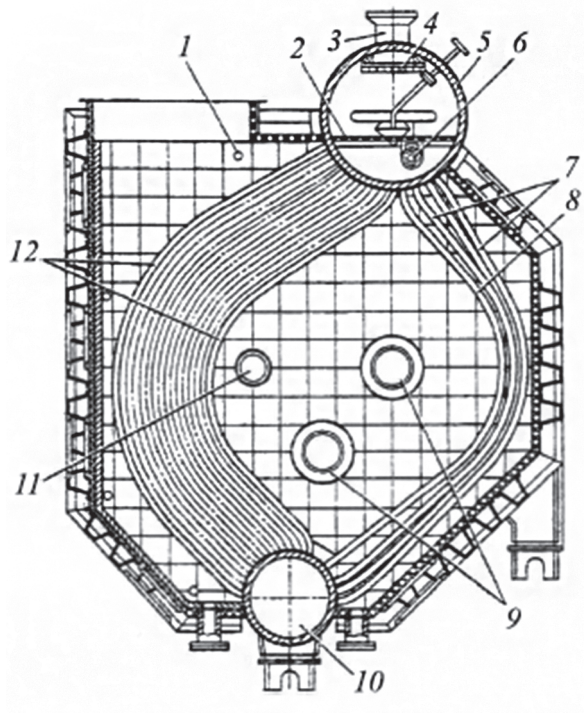


Рис. 4.26. Котел «КВВА-2,5/5»

Топковий пристрій обладнаний двома форсунками *9*, оглядовим лючком *11* із захисним склом. Сажообдувні пристрої *1* призначені для обдування поверхонь парою, вони також використовуються для миття їх водою під час чищення котла.

Подібна конструкція характерна також для котлів типу КАВ. Застосування на суднах знайшли котли «КАВ» паропродуктивністю 1,6…6,3 т/год за тиску 0,7 МПа і паропродуктивністю 10 та 16 т/год за

тиску 1,8 МПа. Це повністю автоматизовані, двоколекторні, одноходові за газом водотрубні агрегати, розраховані на експлуатацію при безвахтовому обслуговуванні.

На рис. 4.27 [3] поданий котлоагрегат КАВ-6,3/7, марка якого розшифровується наступния чином: котел автоматизований водотрубний, паропродуктивність – 6,3 т/год за тиску 0,7 МПа.

Коефіцієнт корисної дії котла становить 80 %. Котел складається із труб першого ряду бокового екрана *11* і конвективної системи *16*. Опускними є три ряди труб *10*, розташованих за першим рядом екрана. Усі труби з'єднані з паровим *1* та водяним *12* колекторами, до яких труби кріпляться за допомогою розвальцювання.

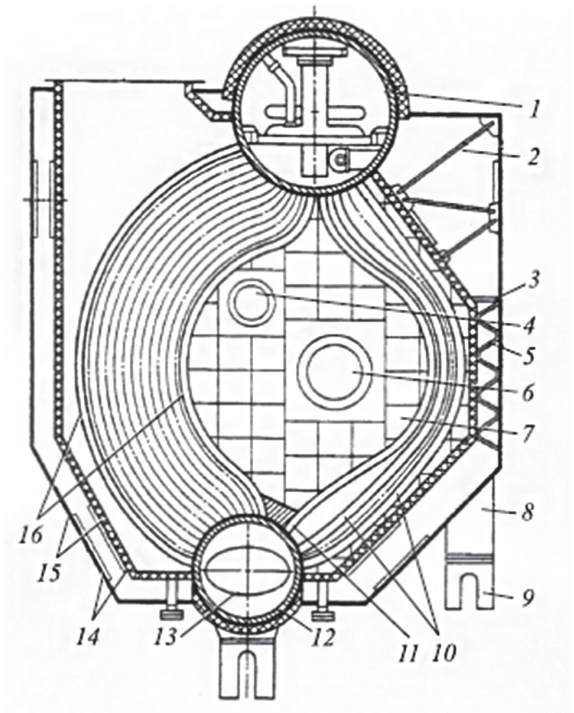


Рис. 4.27. Котел «КАВ-6,3/7»

На задньому днищі парового і на обох днищах водяного колекторів виконані лази *13*. Каркас *15* складається зі стінок, виконаних із листового та профільного прокатів. Повітря перед потраплянням до топки проходить по міжобшивковому простору, утвореному зовнішньою та внутрішньою стінками. Підвищена жорсткість каркаса забезпечується трубними зв'язками *2*, *3* та розпірними скобами *5*. Доступ до трубної частини забезпечується через отвори з герметичними кришками *14*.

Топкова кладка *7* виконана з вогнетривких шамотних цеглин, які встановлені на шар азбестового картону. У кладці зроблені фурма *6* для форсунки й отвір *4* для оглядового пристрою. Відкриті зовнішні поверхні колекторів ізольовані совелітовими плитами. Опори *8* болтами та гайками кріпляться до перехідних стільців *9*. Одна опора нерухома, інші – рухомі.

До числа найбільш поширених представників суднових допоміжних котлів відноситься *вертикальний циліндричний водотрубний паровий котел «Aalborg AQ-3»* (рис. 4.28), який датська фірма Aalborg Industries (з 2011 року входить до складу фірми «Alfa Laval Aalborg Industries») випускала у різних модифікаціях до початку XXI ст. [3].

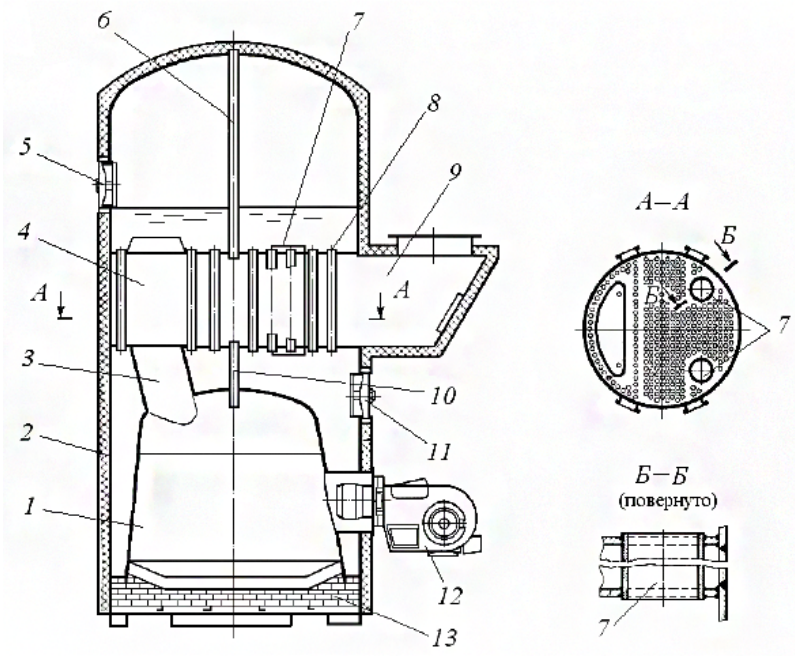


Рис. 4.28. Котел «Aalborg AQ-3» (без арматури):
1 – топка; *2* – корпус з ізоляцією; *3* – перепускний газохід; *4* – вогнева камера; *5* – лаз; *6* – довгий зв'язок; *7* – опускні труби; *8* – труби КПП; *9* – димова коробка; *10* – короткий зв'язок; *11* – лаз; *12* – топковий пристрій; *13* – підтопки з футеруванням

Основними елементами котла є дві камери: нижня, заповнена водою, і верхня пароводяна, з'єднані між собою трубами КПП і двома опускними трубами великого діаметра, які забезпечують надійну циркуляцію води. Топкові гази через трубу еліптичної форми надходять у вогневу камеру, звідки за допомогою напрямних перегородок розподіляються між трубами й далі через димову коробку проходять у димохід. Паропродуктивність котла 800–12 500 кг/год за тиску пари 0,75 МПа [3].

Наступною конструкцією, яка набула широкого розповсюдження, став вертикальний циліндричний водотрубний котел «Aalborg AQ-9» продуктивністю від 8 до 45 т/год за робочого тиску пари 0,9 або 1,8 МПа (рис. 4.29). До складу котла входять три колектори – верхній пароводяний *6* циліндричної форми, середній пароводяний *10* кільцевої форми і нижній водяний *1* тороїдальної форми.

Топка циліндричної форми оточена трубами мембранного екрана *13* розміром 65,3×6,6 мм, які в нижній частині з'єднані тороїдальним колектором 1 розміром 219×14,2 мм.

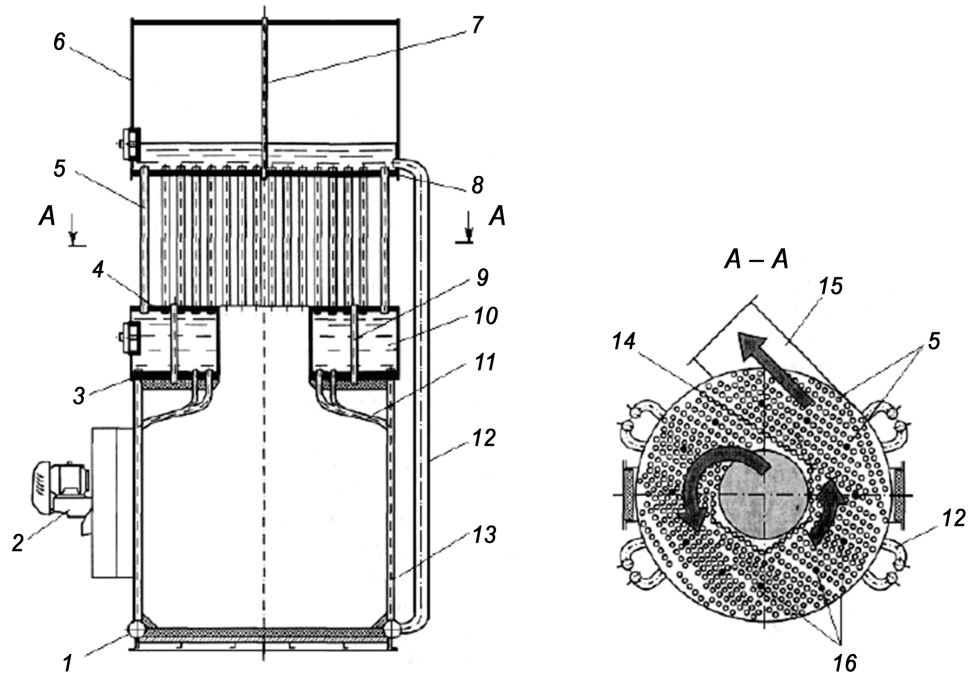


Рис. 4.29. Схема котла «Aalborg AQ-9» (без арматури та теплової ізоляції)

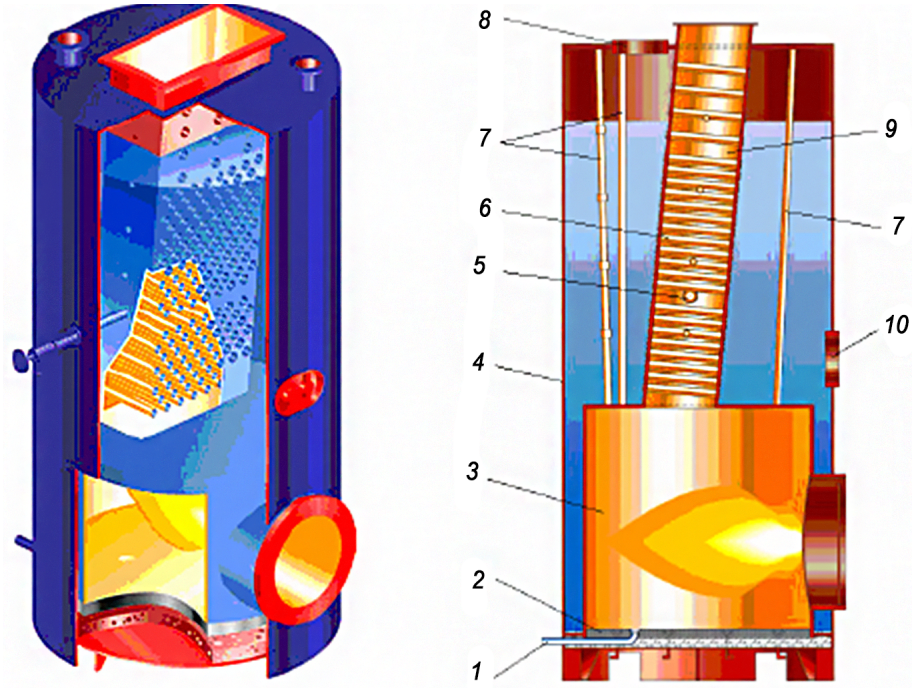
Верхні кінці екранних трубок вварені у нижню трубку дошки *3* проміжного колектора *10*. Димові гази із топки відводяться в конвективну паротвірну систему «пучок», виконаний із труб 65,3×3,6 мм, закріплених у трубних дошках *4* та *8*, через циліндричну систему, розташовану у проміжному колекторі *10*. Конвективна паротвірна система «пучок» (КПП) зовні закрита газонепроникною оболонкою. Рух газів у КПП спрямовується напрямними перегородками *14*, виконаними зі зварених між собою труб. Гази з котла видаляються через димохід *15*.

Схема організації природної циркуляції наступна: з колектора *6* вода по опускних трубах *12* розміром 114×7 подається в екранний колектор *1*,

звідки по підйомних екранних трубах надходить у колектор *10* у вигляді пароводяної суміші, а з нього у паротвірні труби *5*, у яких відбувається додаткове утворення пари. Великі розміри колектора *6* забезпечують високий ступінь сухості пари.

Котли «Aalborg AQ-9» випускались фірмою до кінця 90-х рр. минулого століття. Під маркою MB ці ж котли продуктивністю 10–40 т/год донедавна випускала фірма «Kangrim Heavy Industries».

Простотою конструктивної схеми відрізняється водотрубні вертикальні циліндричні парові котли «Aalborg AQ-10/12W», типовий ряд яких охоплює паропродуктивності від 1,2 до 6,3 т/год за тиску насиченої пари 1,0 МПа (рис. 4.30) [3].



а ***б***

Рис. 4.30. Котел «Aalborg AQ-10/12W»:
а – загальний вигляд; ***б*** – вертикальний розріз (без арматури та теплової ізоляції)

Топки *3* та КПП 6 розміщені усередині циліндричного корпусу *4*. Топка має циліндричну форму на її поді *2* розміщено футерування. КПП виконаний у вигляді похилих труб, розміщених поперек газоходу *9* прямокутного перерізу. Для запобігання розшарування пароводяної суміші трубки КПП розміщені під кутом 15°. Котли обладнані сажообдувним пристроєм *5*, для випуску води передбачається дренажна труба *1*.

Котли «AQ-10/12W» комплектуються топковим пристроєм з ротаційною форсункою для спалювання як дизельного, важкого палива, так і відходів рідкого палива.

Водотрубні вертикальні циліндричні двоколекторні парові котли. Aalborg OL фірми «Alfa Laval Aalborg Industries» поданий на рис. 4.31. Абревіатура OL означає: O – oil fuel – рідкопаливний; L – Large steam capacity – великої паропродуктивності. Цей котел має стельове розміщення топкового пристрою, природну циркуляцію та розвинений КПП.

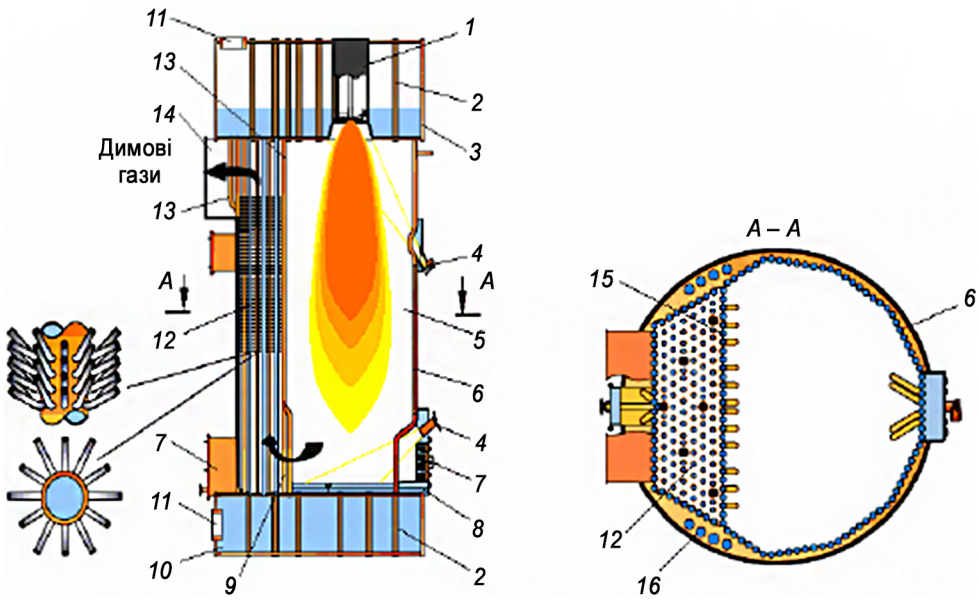


Рис. 4.31. Котел «Aalborg OL» (без арматури та теплової ізоляції)

Котел має лише паротвірні поверхні нагріву – КПП і топкові екрани. Топка має форму прямої неправильної призми, у перерізі це – неправильний багатокутник.

Стінки обшивки котла утворені вертикальними газощільними панелями *6*. Газощільний екран *15* відділяє топку *5* від КПП *12*. Топка майже повністю екранована. Футерований під топки *8* захищає водяний колектор від випромінювання факела. КПП з усіх боків огороджений газощільними мембранними панелями. Труби мембранних панелей та КПП з'єднані з водяним *10* та паровим *3* колектором циліндричної форми, утворюючи з ними та опускними трубами *16*, розміщеними за межами стінок котла, контур природної циркуляції.

Для виходу димових газів з топки труби екрана *15* у їх нижній частині розведені у дворядний фестон *9*. Вихід димових газів до димової коробки

відбувається через верхній дворядний фестон *13*. У котлі для інтенсифікації теплообміну у «пучку» застосоване штиркове оребрення. Мембранні панелі ззовні вкриті шаром теплової ізоляції, яка захищається легким кожухом.

Стельове розміщення топкових пристроїв *1*, форма та значні розміри топкової камери сприяють якісному протіканню процесу згоряння палива. У котлах використовуються паромеханічні форсунки Aalborg KBSD для спалювання дизельного та важкого палива, спеціально розроблені для стельового розміщення в топці.

Паропродуктивність такого котла 12,5…55 т/год, робочий тиск насиченої пари 0,9 МПа за продуктивності до 20 т/год та 1,8 МПа за більшої паропродуктивності. ККД котлів 83…85 %. Сфера застосування: вироблення пари у складі суднових допоміжних установок і танкерів, використання як генераторів інертних газів.

Аналогічну конструкцію мають котли типу РВ, які випускає фірма «Kangrim Heavy Industries».

Водотрубні парові котли «МАС-В» фірми «Mitsubishi Heavy Industries» – суднові допоміжні вертикальні водотрубні двоколекторні парові котли із стельовим розташуванням топкових пристроїв, природною циркуляцією та розвиненим КПП. Абревіатура «МАС-В» означає: М – Mitsubishi, А – auxiliary (допоміжний), С – compact (компактний), В type – (тип В) [3].

Котел генерує насичену пару та має паротвірні поверхні нагріву: топкові екрани, КПП, екрани конвективної шахти, нижній та верхній фестони (рис. 4.32).

отел поділений на дві, з'єднані між собою частини центральним екраном *21*: ліву – топку *20* та праву – конвективну секцію *7*, де розміщений КПП *8*. Стінки топки утворені газощільними мембранними екранами: боковим *22*, центральним *21* та двома фронтовими *17*. КПП виконаний із гладких труб. Для огляду, чищення та ремонту котел обладнаний лазами *18* та *10*. Горизонтальна перегородка 6 забезпечує поперечне омивання газами конвективної паротвірної системи «пучка» (КПП).

Труби фронтових екранів живляться з роздавальних колекторів *16*, що безпосередньо з'єднані з водяним колектором *12*.

КЗ фронтових екранів пароводяна суміш надходить до верхніх збиральних колекторів *26*, розміщення топкових пристроїв *25* забезпечує якісне згоряння палива за коефіцієнта надлишку повітря не вище 1,15.

КПП обмежений з усіх боків паротвірними трубами центрального *21* та бокового *9* екранів, а також з переднього та заднього фронтів – крайніми рядами КПП, що утворюють газощільні стінки. Труби КПП

та бокових екранів приєднані до водяного та парового колекторів, утворюючи з ними та зовнішніми опускними трубами контури природної циркуляції.

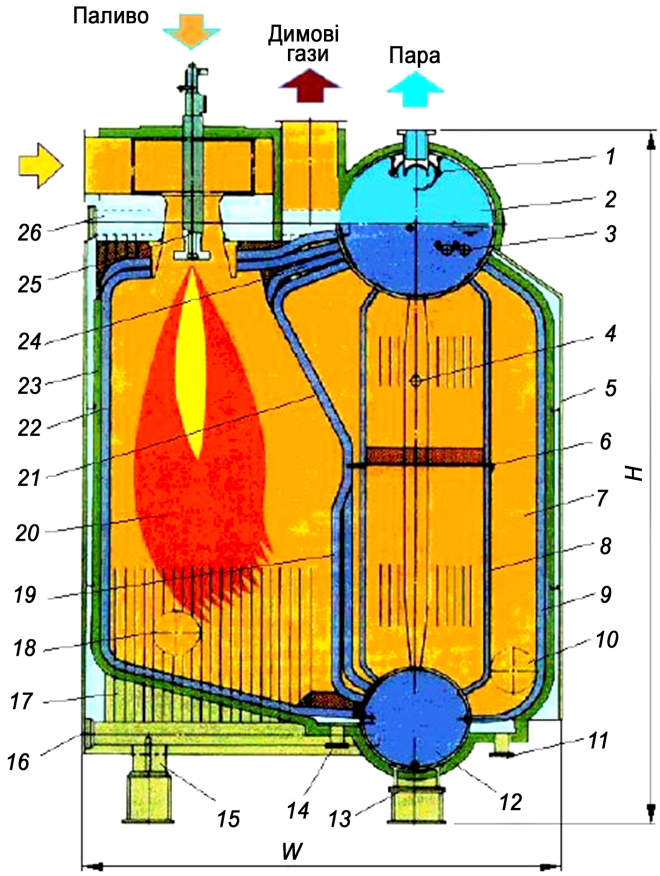


Рис. 4.32. Котел «МАС-В» без арматури (фронтовий переріз)

Труби центрального екрана в нижній половині розведені у дворядний фестон *19* для виходу димових газів з топки до КПП. Верхній чотирирядний фестон *24*, утворений розведеним у два ряди лівим боковим та центральним екраном забезпечує вихід димових газів з котла до димоходу.

Мембранні екрани покривають шаром теплової ізоляції *23*, для захисту, якої передбачається легкий кожух *5*.

Котел установлений на чотирьох опорах: дві опори *13* під водяним колектором та дві опори *15* під роздавальними колекторами фронтових екранів. Конструкція опор забезпечує свободу теплових розширень.

Усередині парового колектора *2*, розміщені сепараційний пристрій *1*, живильна труба *3*, перегородки. Дренажні труби *14* і *11* призначені,

відповідно, для випуску води із топки після промивання і з конвективної секції.

Паропродуктивність котлів – 20–110 т/год, тиск пари – 1,57 МПа [3]. ККД котлів становить 80,5–82,5 % для різних паропродуктивностей.

Для отримання перегрітої пари (до 280°) котли можуть бути обладнані пароперегрівниками.

Котли такої ж точно конструкції випускаються фірмою «Kangrim Heavy Industries» під маркою MD.

Водотрубні парові котли Aalborg D фірми «Alfa Laval Aalborg Industries» (попередня назва «MISSION™D»). Це допоміжні вертикальні водотрубні двоколекторні парові котли типу D зі стельовим розташуванням топкових пристроїв, природною циркуляцією та розвиненим КПП [114].

Котел типу Aalborg D (рис. 4.33) складається з топки та КПП. Топка *12*, подібно до котла типу МАС-В, утворена газощільними мембранними екранами: боковим *10*, середнім та двома фронтовими *9*.

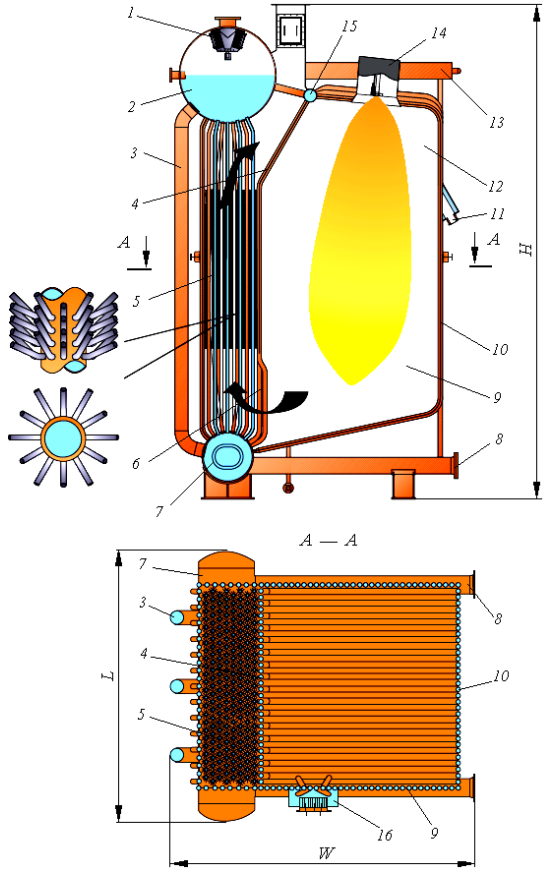


Рис. 4.33. Котел «Aalborg D» (без арматури та теплової ізоляції)

На відміну від котлів «МАС», омивання гладкотрубних КПП поперечне, у котлах «Aalborg D» воно поздовжнє.

Спостерігання за процесом горіння палива відбувається з використанням оглядового пристрою *11*, а доступ усередину доступний через лаз *16*. Фронтальні екрани *9*, які виконані як мембранні панелі, з вертикальних паротвірних труб, з'єднуються з горизонтальними колекторами: нижнім роздавальним *8* та верхнім збиральним *13*. Гази з топки виходять через фестон *6*. Зовні кожуха котла розміщені опускні труби *3* великого діаметра, які з'єднують паровий *2* та водяний *7* колектори, забезпечують надійну природну циркуляцію. Штиркове оребрення труб КПП *5* сприяє інтенсифікації теплопередачі.

На котлах установлені стельові топкові пристрої *14* з паромеханічними форсунками для спалювання дизельного та важкого палива.

Паропродуктивність котлів «Aalborg D» – становить 25–120 т/год, тиск пари 1,8–2 МПа, ККД – 84 %. Такі котли використовуються на танкерах для забезпечення споживачів насиченою парою та генерації інертних газів.

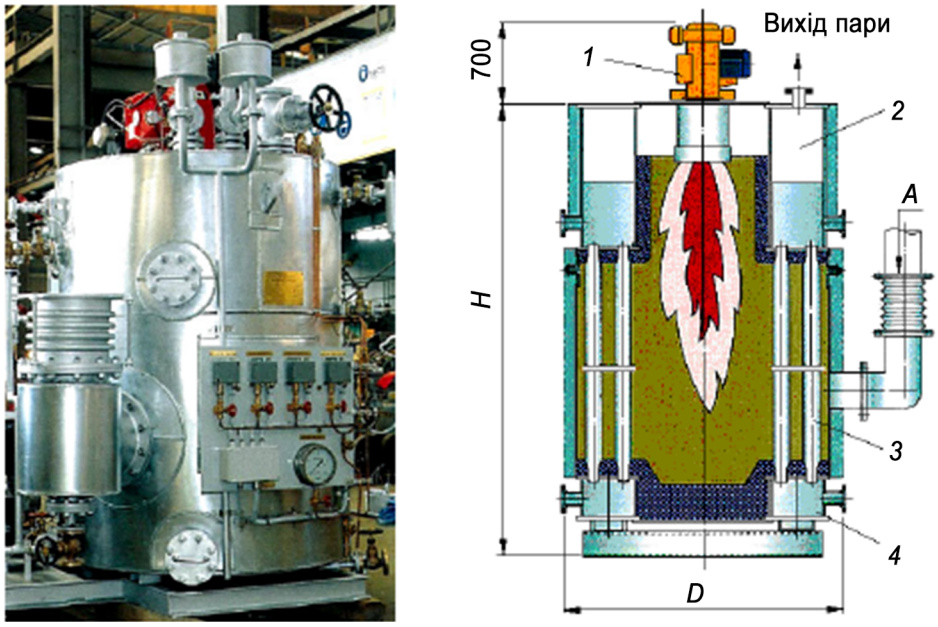
Водотрубні вертикальні парові котли типу MS фірми «Kangrim Heavy Industries». Призначені для використання як допоміжних на різних типах суден невеликої водотоннажності. Паропродуктивність цих котлів 0,5 та 1,0 т/год, робочий тиск пари 0,7 МПа, ККД 85 %.

Водяний *4* та паровий *2* колектори виконані у вигляді прямокутних тороїдів (рис. 4.34). Колектори з'єднані прямими трубами *3*, розміщеними по двом концентричним колам, утворюючи зовнішній та внутрішній екрани. Внутрішній екран, труби якого є паротвірними підйомними, утворює топку котла, частина труб зовнішнього екрана є підйомними, частина – опускними. Топковий пристрій розташований у верхній частині топки. З топки димові гази через боковий прохід надходять у кільцеподібний газохід між екранами та відводиться в димохід.

Газотрубні горизонтальні котли «Aalborg OH» (O – oil fired, H – horizontal) фірми «Alfa Laval Aalborg Industries». Конструкція цих котлів як парових, так і водогрійних, попередня назва «MISSION^{TM}OH», базується на досвіді виготовлення та експлуатації котлів UNEX BH/B фірми «Aquamaster Raumu», Фінляндія.

Технічні характеристики котлів «Aalborg OH»:

Паропродуктивність	750–16 000 кг/год
Тиск пари	1,2 МПа
Теплопродуктивність	500–10 700 кВт
ККД котла	89–92 %
за тиску води	0,8 МПа [34]



а *б*

Рис. 4.34. Котел типу MS:
а **–** загальний вигляд; ***б*** **–** вертикальний розріз

Основними елементами котла (рис. 4.35) є корпус, що складається з обичайки *13*, переднього *4* та заднього *12* днищ; жарової труби *1*, вогневої камери *11*, димогарних труб *10*, топкового пристрою *2*. Вогнева камера є повністю водоохолоджуваною. Котли двоходові з газового боку: гази спочатку проходять через жарову трубу, повертають на 180° у вогневій камері і надходять у димогарні труби, утворюючи другий хід. З димової коробки *3* через патрубок *5* гази видаляються з котла. З метою інтенсифікації теплообміну в котлах «Aalborg OH» застосовують турбулізатори у вигляді гвинтоподібних стрічкових завихрювачів, розташованих усередині димогарних труб. Котел має необхідну арматуру, запобіжний *6*, стопорний *8*, клапан нижнього продування.

Газотрубні та газоводотрубні вертикальні парові котли «*Aalborg CHB» фірми «Alfa Laval Aalborg Industries».*

Котли Aalborg CHB є широко відомими котлами UNEX CHB, які виготовлялись фінською фірмою «Aquamaster Raumu».

Котли виробляють у двох модифікаціях: газотрубні з повністю водоохолоджуваною топкою паропродуктивністю 750–6000 кг/год і газоводотрубні паропродуктивністю 6000–15 000 кг/год, з топкою, яка виконана з газощільного екрана. Тиск пари – 1–1,6 МПа; ККД котла – 85 %.

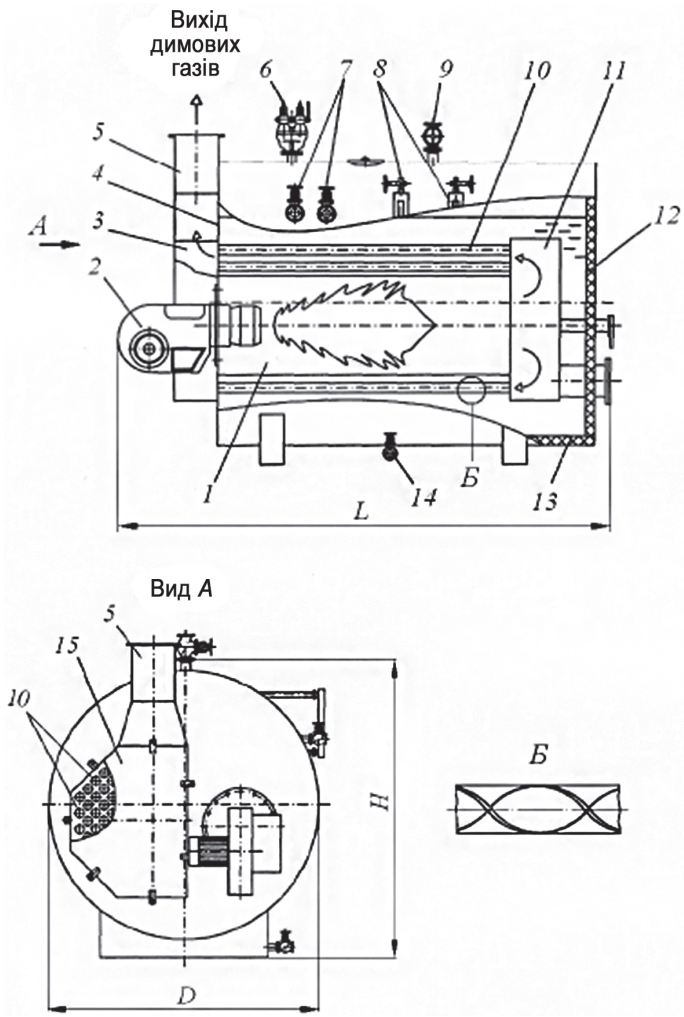


Рис. 4.35. Котел «Ольборг ОН»

Топка газоводотрубних котлів охолоджується в умовах природної циркуляції. Такі котли мають дві частини: верхню газотрубну та нижню водотрубну.

Нижня водотрубна частина – це топка циліндричної форми, бокова стінка якої виконана з газощільного мембранного екрана *1* з організованою природною циркуляцією.

Верхня газотрубна частина являє собою міцний корпус *10*, усередині якого розташовані димогарні труби *4*. До складу міцного корпусу входять циліндрична обичайка та два днища: верхнє *7* плоске та нижнє *2* еліптичної форми, до яких прикріплені димогарні труби. Для турбулізації потоку газів у димогарні труби вставлені гвинтоподібні завихрювачі *3*.

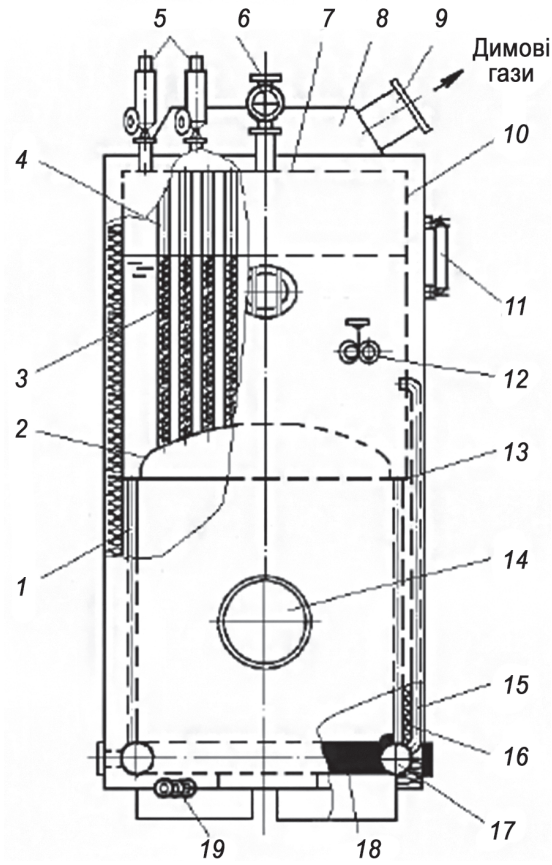


Рис. 4.36. Котел «Ольборг CHB» з газощільним мембранним екраном топки

На верхньому днищі корпусу розташована димова коробка *8* з патрубками *9* для відведення газів із котла.

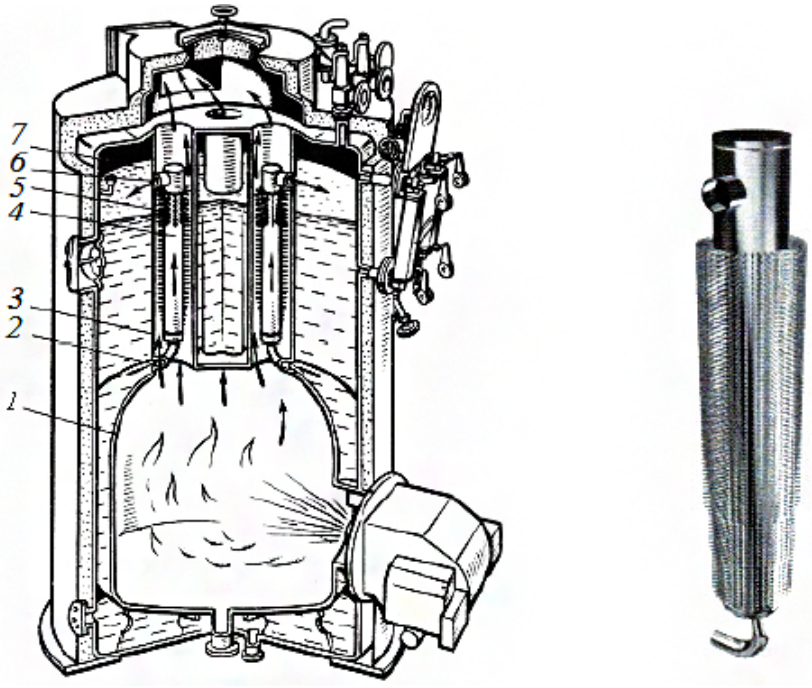
Для футеровки *18* дна топки застосовується спеціальний вогнетривкий матеріал. У екрані топки виконаний фурмений отвір для встановлення топкового пристрою. До складу арматури котла входять запобіжний *5*, стопорний *6*, живильний *12*, дренажний *19* клапани; водовказівний пристрій *11*; клапан продування.

Екран топки зварений із плавникових труб, нижні кінці яких зварені з водяним колектором *17* тороїдальної форми, верхні – з трубною дошкою *13*. За екраном у шарі теплової ізоляції *16* розташовані опускні труби *15* контуру природної циркуляції, які з'єднують пароводяний корпус котла з екранним водяним колектором.

Котли «Aalborg CHB» обладнані топковими пристроями фірми «Alfa Laval Aalborg Industries» з різними типами форсунок: ротаційними, механічними або паромеханічними.

Газотрубні вертикальні парові котли типу Sunroad. Ці котли розроблені шведською фірмою «Mashinwerken». На рис. 4.37 наведений загальний вигляд однієї з перших модифікацій котла [3].

Назва котла пішла від елемента «Sunroad» *4*, який являє собою трубу, зовнішня поверхня якої вкрита великою кількістю приварених шипів *3*, які розташовані у вигляді сонячних променів.



а ***б***

Рис. 4.37. Газоводотрубний паровий котел типу Санрод:
а – загальний вигляд; ***б*** – елемент «Санрод»

Ці елементи розміщуються всередині димогарних труб *3* діаметром 275×12,5 мм. Нижні кінці елементів вварюються у нижню частину димогарної труби, розташованої у водяному просторі котла. У тій частині димогарної труби, яка проходить у паровому просторі *7* котла, вварюються верхні кінці *6* елемента «Sunroad», таким чином пароводяна суміш, яка утворюється в ошипованій трубі, виходить у паровий простір.

Топка *1* циліндричної форми із плоским нижнім і сферичним верхнім днищами, до яких приварені димогарні труби *3*, є повністю водоохолоджуваною.

Продукти згоряння із топки надходять у димогарні труби, далі, рухаючись вгору, омивають зовні елементи «Sunroad», а із середини – димогарні

труби. Котел віднесений до газоводотрубних, тому що паротворення відбувається як на зовнішніх поверхнях топки та димогарних труб, так усередині ошипованих труб.

Відхідні гази відводяться у димову коробку. У топковому пристрої можуть застосовуватись ротаційні, механічні або паромеханічні форсунки.

Застосування елементів «Sunroad» дозволяє зменшити розміри конвективної частини котла і зробити його більш компактним.

Характеристики котла:

паропродуктивність	6,5 т/год
за тиску пари	1,0 МПа
ККД	82–84 %

4.7. Утилізаційні та комбіновані парові котли. Термомасляні котли

Утилізаційні котли дизельних та газотурбінних суднових енергетичних установок, найчастіше водотрубні, можуть бути виконані з природною або примусовою циркуляцією.

Прикладом водотрубного утилізаційного котла з природною циркуляцією води може бути утилізаційний котельний агрегат КУП-110/5,5, який має тільки паротвірну поверхню нагріву. Марка цього котла розшифровується так: буквена частина складається з початкових букв слів (котел утилізаційний паровий); у дробу чисельник – площа поверхні нагріву, м^2; знаменник – тиск пари, кг/см^2.

Котли типу КУП випускаються паропродуктивністю 175…3000 кг/год за тиску пари 0,49 МПа, мають площу поверхні нагріву від 15 до 300 м^2. Котел «КУП 110/5,5» (рис. 4.38) має паропродуктивність 1,3 т/год, тиск пари 0,54 МПа і площу поверхні нагріву 110 м^2. Він виконаний двоколекторним, його пароводяний колектор *9* з'єднаний з водяним колектором *7* водогрійними трубами *8*, які є підйомними, і *6*, які обігріваються з меншою інтенсивністю та є опускними. Відпрацьовані гази від головного двигуна підводяться до патрубка *5*, омивають поверхню нагріву котельного агрегата і через іскрогасникову камеру *10* відходять у димохід *1*. Установлена у системі «пучку» труб *6* перебірка *2* поліпшує омивання труб газами. Заслінки *4* та газонапрямний щит *3* забезпечують спрямування всього потоку випускних газів двигуна або його частини через поверхню нагріву котла залежно від потреби у парі.

Через високу вологість пари, що генерується УК, до складу котельної установки відносно високої паропродуктивності вводиться *сепаратор* пари.

Сепаратор є парозбірником, у якому пара відділяється від вологи, що надходить у вигляді пароводяної суміші з вихідного колектора УК. Сепаратор одночасно виконує функції вмістища із запасом води, достатнім для компенсації коливань рівня води під час змінних режимів роботи. У таких котлах не обмежуються тільки однією паротвірною поверхнею, а по ходу газів спочатку розміщують пароперегрівні, потім випарні, а у кінці – економайзерні поверхні. Поверхні нагріву являють собою набір спіральних горизонтальних змійовиків, усередині яких рухаються вода і пароводяна суміш. Типовим представником таких котлів є котел «КУП-1100» (рис. 4.39), установлений на сучасних нафторудовозах.

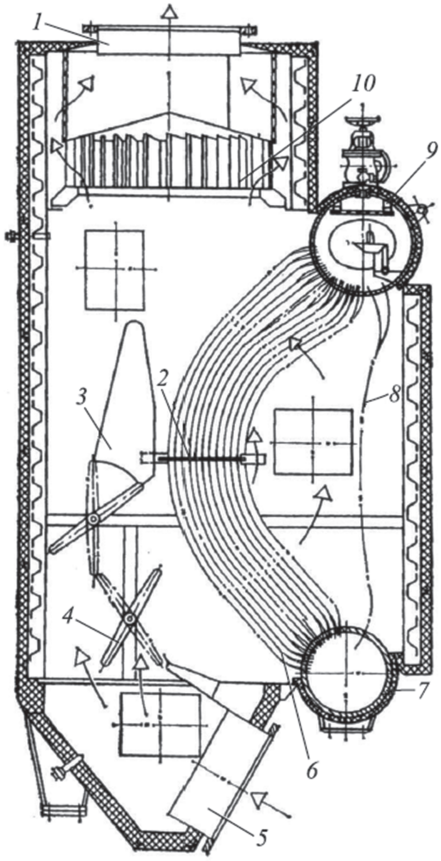


Рис. 4.38. Водотрубний утилізаційний котел «КУП-110/5,5»

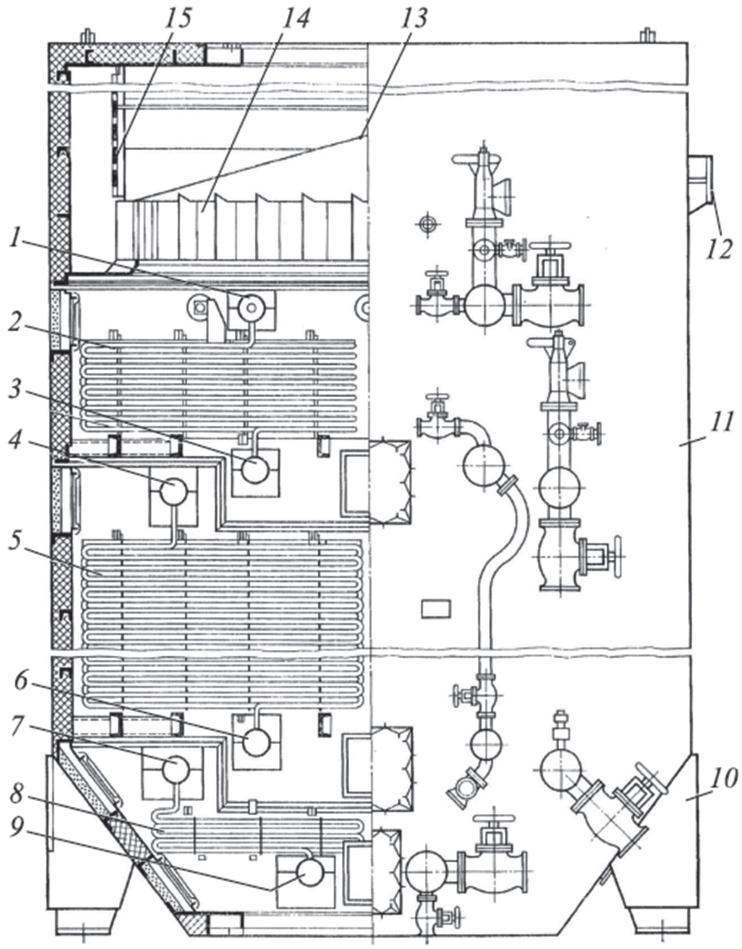


Рис. 4.39. Утилізаційний котел «КУП-1100»

Технічні характеристики утилізаційного котла наступні:

Паропродуктивність	до 9,2 т/год
Тиск пари	0,7 МПа
Температура пари	270 °С

Кожен трубний «пучок» (пароперегрівний, випарний, економайзерний) складається з двох секцій, що працюють паралельно. Живильний насос забирає воду з теплого ящика, подає її до сепаратора, з якого циркуляційним насосом (перелічені вище механізми і пристрої на рисунку не показані) вона спрямовується до змійовиків *2* економайзера, розташованих між верхніми вхідними *1* та нижніми вихідними *3* колекторами. У колекторах *1* містяться живильні труби з трьома рядами отворів для рівномірного розподілу води по змійовиках.

Із колекторів *3* вода по перепускних трубах надходить у паротвірні пучки *5*, розташовані між нижніми *6* та верхніми *4* колекторами. Утворена пароводяна суміш подається у сепаратор (на рис. не показаний), з якого відсепарована насичена пара частково спрямовується до загальносуднових споживачів, а більша її частина – до змійовиків *8* пароперегрівника, розташованих між верхніми *7* і нижніми *9* колекторами. Отримана перегріта пара надходить до турбогенератора. Конструктивні елементи котла розташовані у зварному газощільному корпусі *11*, на стінках якого передбачені знімні щити, що закривають отвори, призначені для доступу всередину котла з метою оглядів, очищення і ремонту. Для кріплення на фундаменті котел обладнаний чотирма опорами *10*, одна з яких є нерухомою. Опори *12* забезпечують вертикальне розкріплення агрегата. Іскроуловлювач складається із закручувальних лопаток *14*, сітки-діафрагми *15* і конуса *13*.

На газотурбоходах типу «Капітан Смірнов» теплоутилізаційний контур (ТУК) включає в себе агрегати КУП-3100 (рис. 4.40) [1].

Технічні характеристики утилізаційного котла «КУП-3100» наведені нижче:

Паропродуктивність	до 26,5 т/год
Тиск пари, МПа:	
у сепараторі	1,25
перегрітої	1,14
Температура пари	310 °С

Принципова схема котла відрізняється від розглянутої вище тим, що паротвірні та економайзерні «пучки» виконані односекційними, а пароперегрівні – двосекційними.

Особливістю агрегата є також застосування на всіх змійовиках оребрення у вигляді спірально навитої привареної стрічки.

Дане технічне рішення забезпечує високу компактність агрегата за меншої питомої маси поверхонь нагріву, але під час роботи котла ці поверхні сильно забруднюються, а очищення їх досить складне. Перегріта пара, що виробляється котлом, споживається для приведення в дію турбіни, що спільно з ГТД обертає гребний гвинт, а також допоміжного турбогенератора потужністю 1000 кВт. Поряд із цим, 2,25 т/год насиченої пари використовується для теплопостачання судна.

На суховантажних суднах з головними ДВЗ невеликої потужності для вироблення насиченої пари, яка застосовується в системах теплопостачання судна, широкого розповсюдження набули прості за конструкцією та досить надійні в експлуатації газотрубні УК.

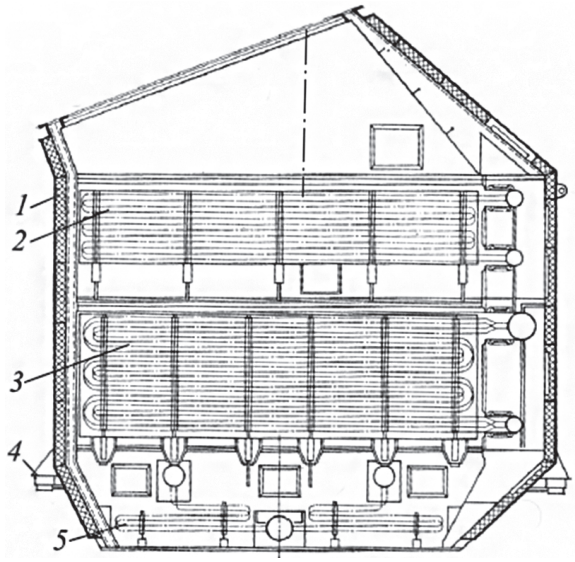


Рис. 4.40. Утилізаційний котел «КУП-3100»:
1 – кожух; *2*, *3*, *5* – економайзерні, паротвірні й пароперегрівні системи «пучки» труб;
4 – опора

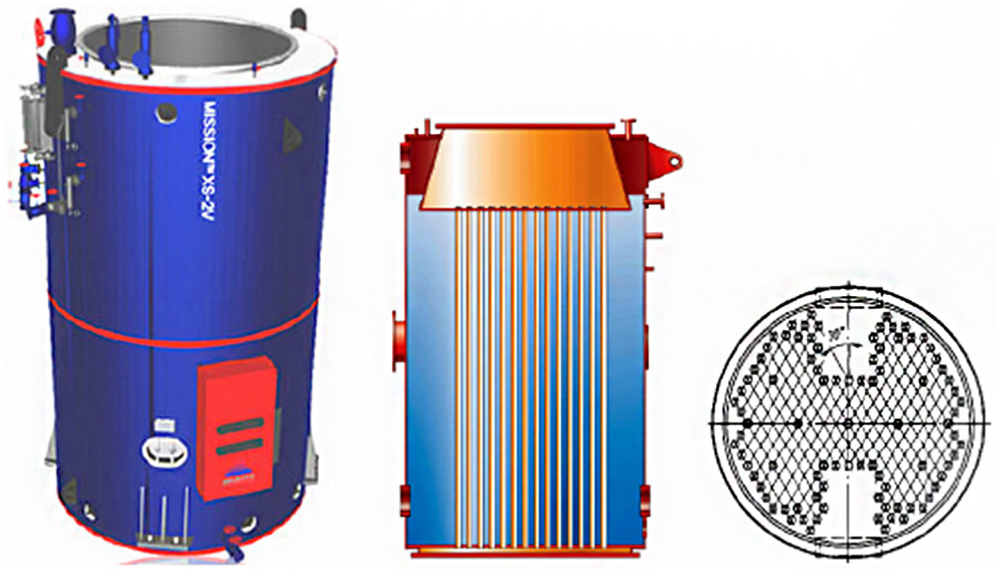
Котли типу Aalborg XS випускає фірма «Alfa Laval Aalborg Industries». Ці котли мають дві модифікації вертикального виконання «Aalborg XS-2V» та «Aalborg XS-7V» та дві горизонтального – «Aalborg XS-4H» та «Aalborg XS-7H». Абревіатура назви означає: X – exhaustgas (відпрацьовані гази), S – smoke tube boiler (газотрубний котел), V – vertical model (вертикальна модель); H – horisontal model (горизонтальна модель). Паропродуктивність котлів – 0,5–5,0 т/год, тиск пари до 1 МПа.

На рис. 4.41 показана модифікація котла «Aalborg XS-2V» з власним паровим пристроєм. Корпус котла – це обичайка, зварена з нижнім та верхнім днищами. Нижнє днище є трубною дошкою, до якої вварюються димогарні труби. До цього днища приєднана прийомна газова камера, до якої підводяться гази від ДВЗ. Випускна газова камера конічної форми приєднана до верхнього днища. Зі свого боку нижнє днище випускної камери є трубною дошкою для димогарних труб. Ззовні корпус має теплову ізоляцію [3].

Корпус УК дзеркалом випаровування поділяється на водяний і паровий простори. Природна циркуляція здійснюється за рахунок густини води на периферії біля внутрішньої поверхні корпусу та пароводяної суміші на зовнішній поверхні димогарних труб.

В аварійних ситуаціях котел витримує роботу всуху, без води. Котел забезпечує часткове глушіння шуму ДВЗ. Завдяки високій швидкості

газів у такому котлі відбувається ефективне очищення від сажистих відкладень.



а *б* *в*

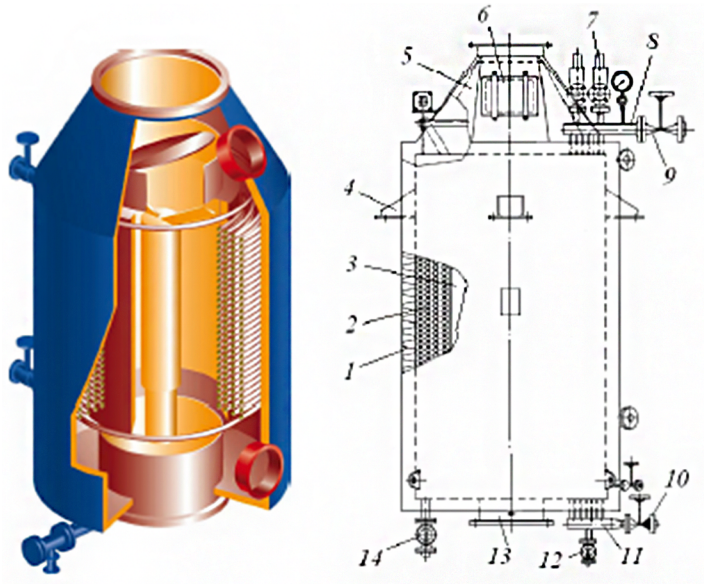
Рис. 4.41. Котел «Aalborg XS-2V» з паровим простором:
а **–** загальний вигляд; ***б*** **–** вертикальний розріз; ***в*** **–** горизонтальний розріз

Паропродуктивність УК розглянутого типу становить 0,35–6,5 т/год, проєктний тиск пари 0,7–1,2 МПа.

Водотрубні вертикальні циліндричні утилізаційні котли «Aalborg P» з примусовою циркуляцією фірми (попередня назва «UNEX™ P») [3]. Ці котли призначені для генерації пари або нагрівання води в системах теплопостачання суден. Їх паропродуктивність становить 0,5–5,0 т/год, тиск пари 1–2,4 МПа. Водогрійні УК мають теплопродуктивність 400–2800 кВт. Усередині циліндричного газощільного кожуха *1* (рис. 4.42) розташована поверхня нагріву УК, що складається з вертикальних коаксіальних гладкотрубних змійовиків *2*.

Змійовики приєднані до горизонтальних колекторів: нижнього впускного *11* та верхнього випускного *8*. На нижньому колекторі розташовані клапани циркуляційної води *10* та осушення *12*, на верхньому запобіжний *7* та пароводяної суміші *9*. Кожух обладнаний впускним патрубком *13* і випускною камерою *5* конічної форми, зовні він вкритий ізоляцією. Впускна камера має вікна з кришками *6* для доступу всередину котла. Закріплення УК до суднових конструкцій здійснюється за допомогою чотирьох опор. У середині кожуха розміщені газоперепускний патрубок *3*,

шумоглушник та іскроуловлювач. Котел обладнаний стаціонарними водообмивними та сажообдувними пристроями.



а ***б***

Рис. 4.42. Котел «Aalborg P»:
а – загальний вигляд; ***б*** – поздовжній розріз

Широкого поширення в останні роки на контейнеровозах великої водотоннажності набули системи утилізації теплоти головних дизельних двигунів типу турбокомпаунд (Turbo Compaund System) з утилізаційними котлами двох тисків, розроблена фірмою «Alfa Laval Aalborg Industries». Така система передбачає привід утилізаційного турбогенератора як від ПТ двох тисків, так і від ГТ, що працює паралельно з ГТН головного ДВЗ, у ній застосовується УК «Aalborg XW-TG» двох тисків (рис. 4.43) [1, 3].

З метою підвищення паропродуктивності системи в ній запроваджена комплексна утилізація теплоти ВЕР ДВЗ: відхідних газів, охолодної води та наддувного повітря [3]. Після циліндрів ДВЗ газ розподіляється на три потоки: перший до ГТН *20* головного двигуна, другий – до ГТ *6*, УТГ *8*, третій – безпосередньо до УК *9*. Перед УК усі три потоки змішуються, що дозволяє підвищити температуру газів на вході до УК та отримати достатню температуру перегрітої пари у підігрівнику *3* для ефективної роботи ПТ *7*, УТГ. Конденсат з конденсатора *5* ПТ підігрівається охолодженою водою від циліндрів ДВЗ та подається в теплий ящик *2*, куди спрямовується також конденсат системи теплопостачання судна. Живильна вода, що забирається з теплого ящика живильним насосом, підігрівається

у високотемпературній секції охолодника наддувного повітря *18*, після чого подається до сепараторів пари високого *17* та низького тисків *15*.

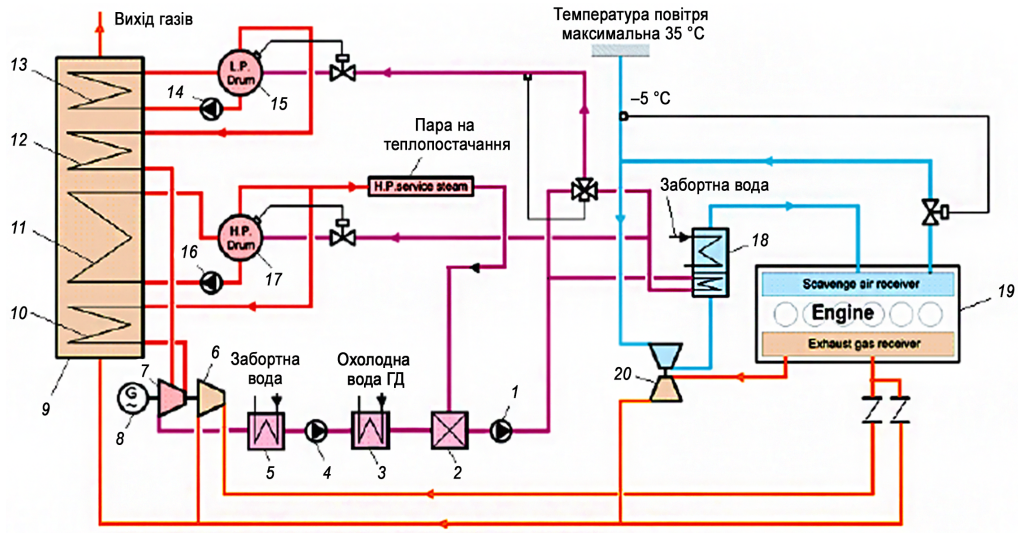


Рис. 4.43. Схема системи утилізації типу турбокомпаунд з УК двох тисків та комплексним використанням ВЕР ДВЗ

Вода із сепараторів циркуляційними насосами високого та низького тиску подається до відповідних паротвірних поверхонь котла *11* та *13*, а насичена пара – до пароперегрівників *10* та *12*.

Перегріта пара високого та низького тиску спрямовується до парової турбіни УТГ, частина насиченої пари високого тиску використовується на теплопостачання судна.

УК двох тисків складається з двох частин: нижньої, де розміщені пароперегрівники та паротвірна поверхня високого тиску та верхньої, де розташовані пароперегрівник та паротвірна поверхня низького тиску (рис. 4.44) [3].

Котел обладнаний сажообдувними пристроями, які можуть використовувати як пару, так і стиснене повітря. Для розділення пари та води УК підключають за допомогою циркуляційного насосу до ДК або окремого сепаратора пари.

Котли з комбінованим опаленням. Котел з комбінованим опаленням – це судновий утилізаційний котел, який має топку для спалювання органічного палива при нестачі теплоти відпрацьованих газів теплового двигуна або при відключенні його. Такі котли зазвичай мають дві незалежно працюючі частини з власними поверхнями нагріву: *паливну* та *утилізаційну.*



Рис. 4.44. Зовнішній вигляд котла «Aalborg XW-TG» двох тисків

Вертикальний циліндричний газоводотрубний котел з комбінованим опаленням «*Aalborg AQ-10/16» фірми «ALAI».* Утилізаційна та паливна частини розміщені поруч одна з другою в корпусі котла (рис. 4.45).

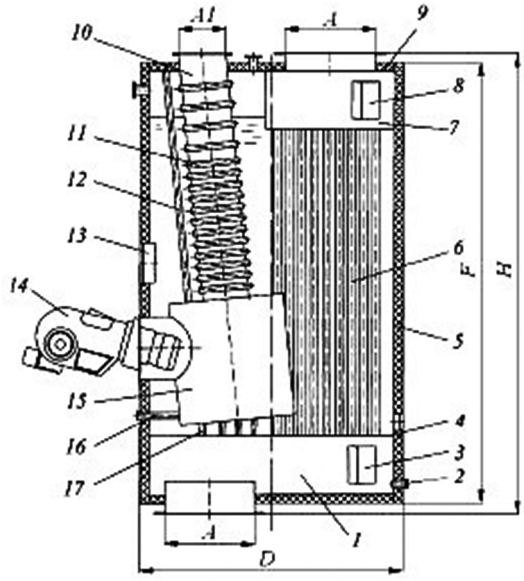


Рис. 4.45. Котел «Aalborg AQ-10/16»:
1 – прийомна камера; *2*, *16* – дренажні труби; *3* – лаз; *4* – нижнє днище; *5* – обичайка; *6* – труби утилізаційної частини; *7* – випускна камера; 8 – лаз; *9* – верхнє днище; *10* – газохід паливної частини; *11* – труби паливної частини; *12* – довгі зв'язки; *13* – лаз; *14* – топковий пристрій; *15* – топка; *17* – короткі зв'язки

Конвективна водотрубна поверхня нагріву виконана з нахилених паротвірних труб, розміщених поперек газоходу прямокутного перерізу. Топка повністю охолоджувана без застосування футеровки. Плоскі днища топки підкріплені короткими (нижнє днище) та довгими (верхнє днище) зв'язками.

Газотрубна утилізаційна частина виконана з вертикальних димогарних труб, закріплених знизу у трубній дошці корпусу котла та зверху у трубній дошці випускної камери.

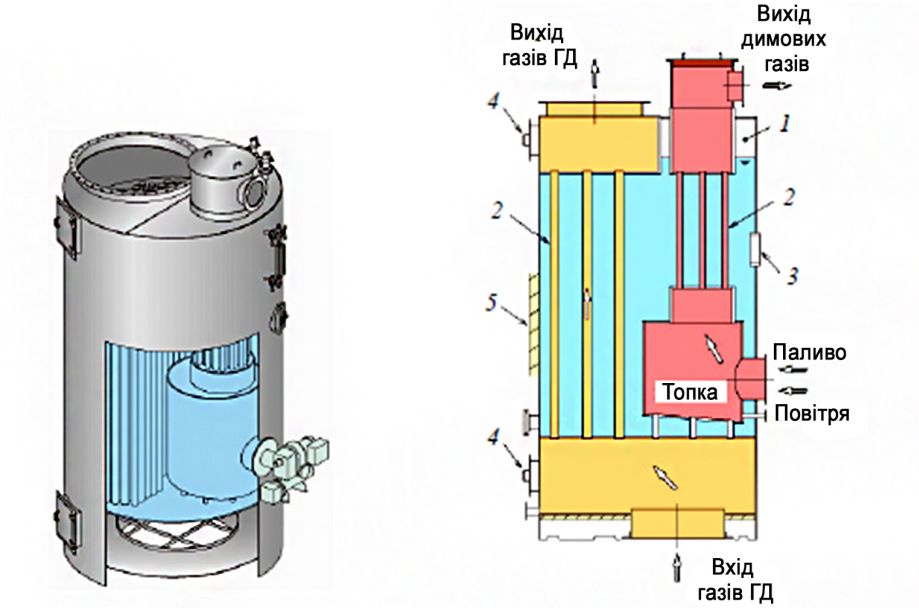
Відхідні гази двигуна надходять у прийомну камеру, рухаються усередині димогарних труб уверх до випускної камери й далі потрапляють у випускний газохід. Газохід паливної частини та випускна камера утилізаційної частини зварені з верхнім днищем корпусу котла.

Паропродуктивність паливної частини 0,7–5,0 т/год, утилізаційної – до 3 т/год, тиск пари 1,2 МПа. Котли можуть працювати в режимі водогрійних.

Котли обладнані топковими пристроями з ротаційною форсункою, у яких можуть спалюватись легке, важке паливо та відходи рідкого палива.

Вертикальні циліндричні газотрубні парові котли з комбінованим опаленням OV32 фірми «Osaka Boiler Company».

Топка котла виконана повністю водоохолоджуваною, КПП складається з вертикальних димогарних труб спіралеподібної форми (рис. 4.46).



а ***б***

Рис. 4.46. Котел з комбінованим опаленням серії OVS2:

а – загальний вигляд; ***б*** – вертикальний розріз;

1 – паровий простір; *2* – димогарні труби; *3* – лаз; *4* – вікно для чищення; *5* – ізоляція

Утилізаційна частина котла виконана з вертикальних гладких димогарних труб. Для цього котла характерна простота обслуговування, яка забезпечується легким доступом до всіх поверхонь нагріву, їх візуального огляду та очищення. За потребою котел може бути обладнаним топковим пристроєм для спалювання відходів рідкого палива.

Паропродуктивність паливної та утилізаційної частин котла становить 0,3…3 т/год, тиск пари – 0,8 МПа.

Вертикальні циліндричні газоводотурбінні котли з комбінованим опаленням серії РС фірми «Kangrim Heavy Industries». Паливна частина котла включає в себе топку та вертикальні димогарні труби, усередині яких розміщені елементи «Sunroad» (рис. 4.47). Подібно до допоміжного котла аналогічної будови, продукти згоряння, що надходять із топки в димогарні труби, рухаючись догори, омивають зовні елементи «Sunroad», а димогарні труби – із середини.

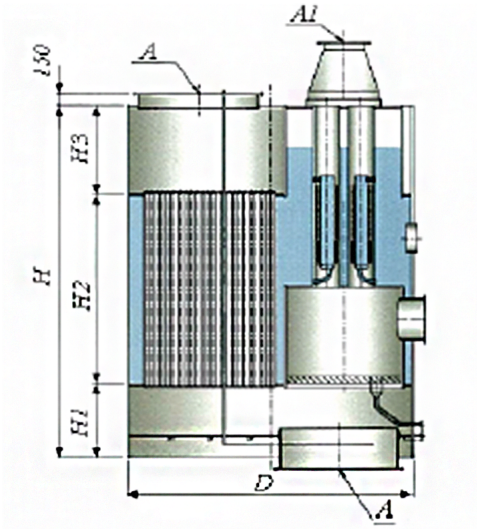


Рис. 4.47. Котел з комбінованим опаленням серії РС

Паротворення відбувається як на зовнішніх поверхнях топки й димогарних труб, так і всередині ошипованих труб, тому котел віднесений до газоводотрубних.

Поверхня нагріву утилізаційної частини виконана з вертикальних прямих димогарних труб. Паропродуктивність паливної частини складає 0,75…0,5, а утилізаційної до 3 т/год залежно від енергоресурсу газів ДВЗ, тиск пари – 0,9 МПа.

Вертикальні циліндричні газотрубні парові котли з комбінованим опаленням типу Aalborg OS-TCi фірми «Alfa Laval Aalborg Industries».



а *б*

Рис. 4.48. Котел «Aalborg OS-TCi»:
а **–** загальний вигляд; ***б*** **–** вертикальний розріз

Топка такого котла має великі розміри, що покращує умови горіння палива. Розміщення топкового пристрою під кутом 15° дозволяє збільшити довжину факела. Особливістю котла є використання вертикальних димогарних труб гелікоїдальної форми у складі КПП паливної частини. Це суттєво інтенсифікує конвективну тепловіддачу. Технологія турбоочищення TCi (Turbo Clean, intelligent) запроваджена фірмою забезпечує ефективне самоочищення системи «пучка» від внутрішніх відкладень, що дозволяє відмовитись від водообмивки з метою очищення системи «пучка».

Поверхня нагріву утилізаційної частини виконана з гладких вертикальних димогарних труб. Паропродуктивність паливної частини – до 6,5 т/год, а утилізаційної – до 5 т/год залежно від енергоресурсу газів ДВЗ; при спільній роботі обох частин паропродуктивність – не вище 8 т/год.

Особливістю котлів «Aalborg OS-TCi» є можливість одночасно працювати з ГД та ДДГ. З цією метою у корпусі можуть бути розміщені додаткові утилізаційні поверхні нагріву, під'єднанні до ДДГ, а прийомна та випускна газові камери обладнуються перегородками для відокремлення газоходів.

Термомасляні котли. Вважаючи на те, що для водяної пари як теплоносія в системах теплопостачання характерні істотні недоліки, усе частіше на суднах, де відсутні турбопривідні механізми, замість водяної пари застосовують органічні рідини на основі мінеральних масел, які отримали назву «*термомасел*».

Застосування термомасел у суднових системах теплопостачання виключає корозію поверхонь котлів та теплообмінних апаратів, небезпеку замерзання теплоносія, знижує трудомісткість та вартість їх обслуговування, спрощує експлуатацію.

Термомасло залишається у рідкому стані за атмосферного тиску за температур до 300 °С. Тиск води за такої температури для виключення пароутворення повинен би становити 8,5 МПа.

Термомасла мають суттєві переваги для використання в системах теплопостачання суден, які експлуатуються у високих широтах, на танкерах та інших суднах.

Однак широке поширення термомасел на морському транспорті стримується низкою недоліків [3]:

– низька термостійкість призводить до забруднення поверхонь нагріву асфальтенами та смолами;

– висока пожежонебезпека та висока вартість;

– відсутність досвіду експлуатації систем із органічними теплоносіями;

– складнощі під час ремонту тощо.

До основних характеристик термомасел відносяться: температура початку розкладання (обмеження допустимого нагрівання теплоносія) та застигання (надійність роботи систем обігріву у холодних районах плавання). Найбільше застосування на суднах отримали такі термомасла, як «Термоойл», «Ессотерм 500», «Жилотерм» [3].

У термомасляних системах відсутні такі елементи, що характерні для парових систем, як сепаратори пари, конденсатовідвідники та охолодники конденсату, контрольні системи конденсату та інше обладнання, відсутня водопідготовка, контроль якості живильної та котлової води, що суттєво спрощує їх будову, капітальні витрати на виготовлення та експлуатацію.

Порівняно з паровими термомасляні котли мають менші масу, габарити та більш високий ККД.

На рис. 4.49 подана порівняльна характеристика ДК паропродуктивністю 10 т/год (теплопродуктивність складає 6800 кВт) і термомасляного котла такої ж теплопродуктивності [3].

Загальна будова допоміжного термомасляного котла «Reinsteel» виробництва Германії наведена на рис. 4.50 [3]. Котел має циліндричну форму, у його верхній частині розміщений топковий пристрій *1* для спалювання мазуту.

Поверхня нагріву котла виконана у вигляді зовнішнього *3* та внутрішнього *5* циліндричних змійовиків, які включені по ходу масла послідовно.

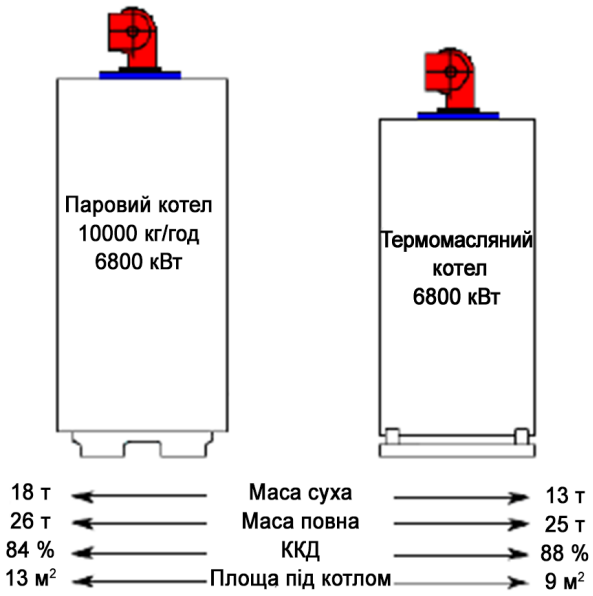


Рис. 4.49. Порівняння парових та термомасляних допоміжних котлів однакової теплопродуктивності

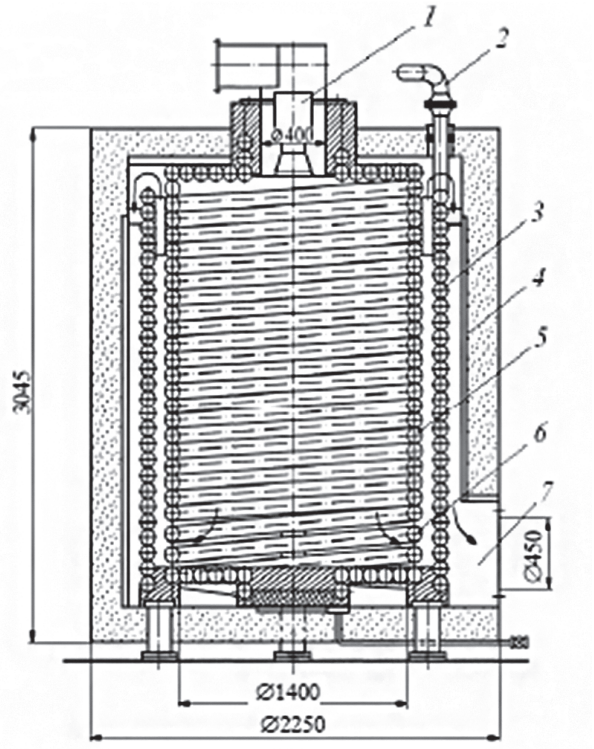


Рис. 4.50. Допоміжний термомасляний котел

Термомасло надходить зверху по трубах *2* і по зовнішньому змійовику *3* рухається вниз і далі до внутрішнього змійовика *5*, піднімається до верхніх елементів змійовика, після чого подається до споживача.

За газовою стороною котел триходовий. Змійовики *3* та *5* утворюють щільну суцільну стінку.

Димові гази, що утворюються у топці: виходять у кільцевий простір між змійовиками через розріджену ділянку *6,* здійснюють поворот на 180° і рухаються донизу у кільцевому просторі між змійовиком *3* і кожухом котла *4* (рух указаний стрілками) до виходу з димоходу *7.*

Характеристики термомасляного котла:

Теплопродуктивність	1,98 МВт
Тиск масла у змійовиках	1,0 МПа
Температура масла:	
на вході в котел	140 °С
на виході	180 °С;
Кількість масла в котлі	1280 кг (1,27 м^3)
Маса котла без масла	5400 кг

Котел відноситься до агрегатів із примусовою циркуляцією робочого середовища, яка утворюється спеціальним насосом термомасла.

Допоміжні термомасляні котли «Aalborg TFO» фірми «Alfa Laval Aalborg Industries». Абревіатура TF – це thermal fluid (термічна рідина), O – oil firea (з рідким опаленням). На рис. 4.51 показаний *котел горизонтального компонування типу Aalborg TFO.*

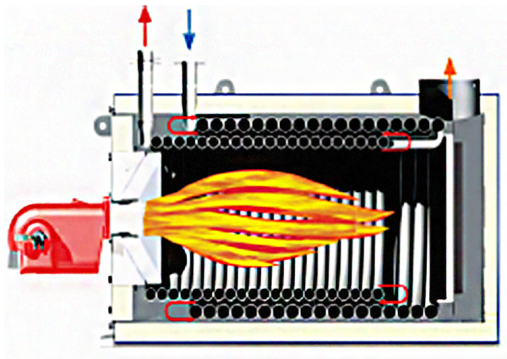


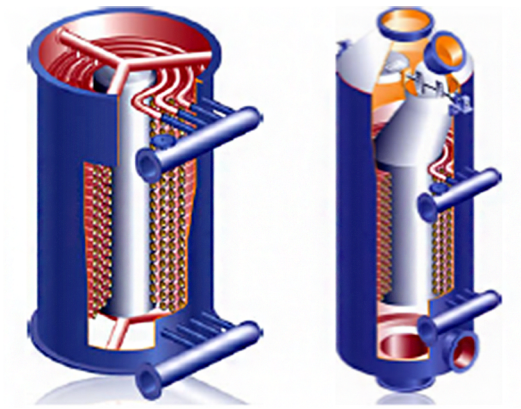
Рис. 4.51. Поздовжній переріз допоміжного термомасляного котла горизонтального компонування типу Aalborg TFO

Теплова потужність котлів такого типу складає 100…20 000 кВт, температура масла – 280…350 °С, робочий тиск масел – 1,0…1,3 МПа. Температура масла на виході із котла контролюється термореле: у разі

досягнення термомаслом температурної межі, або коли потік масла нижче мінімально допустимого, паливна форсунка вимикається.

Утилізаційні термомасляні котли «Aalborg EX» фірми «Alfa Laval Aalborg Industries». Абревіатура «EX» позначає exhaust gas (випускні гази). Aalborg EX (попередня назва «MISSION™EX») – це вертикальні утилізаційні котли з примусовою циркуляцією рис. 4.52. Котли випускаються у двох модифікаціях: без газоперепускного газоходу (рис. 4.52,***а***), або з газоперепускним газоходом і регулюючою заслінкою (рис. 4.52,***б***).

Для УК першої модифікації максимальна витрата випускних газів не більше 700 000 кг/год, другої – 800 000 кг/год. Теплова потужність котлів складає 100…5000 кВт, максимальна температура термомасла – 300 °С, робочий тиск масла – 1,0…1,3 МПа.



а ***б***

Рис. 4.52. Загальний вигляд утилізаційних термомасляних котлів «Aalborg EX»

Термомасляні УК мають поверхню нагріву, виконану з коаксіальних змійовиків, приєднаних до вхідного та вихідного горизонтальних колекторів.

У разі вимог замовника УК можуть бути обладнані впускною та випускною газовими камерами. Очищення поверхонь нагріву УК від сажі здійснюється соплами водяної системи обмиву, розміщеними зверху і знизу. Верхні сопла використовуються при непрацюючому котлі, а також під час пожежогасіння, нижні – під час роботи котла.

4.8. Топкові пристрої суднових парових котлів

Протягом більше ніж 50-ти рр. існування суднових паросилових установок парові котли опалювались виключно твердим паливом: спочатку дровами та кам'яним вугіллям. На суднах морського флоту парові котли з вугільним опаленням використовувались до 60-х рр. XX ст.

Застосування твердого палива викликало масу проблем під час експлуатації енергетичних установок.

По-перше, завантаження і розміщення запасу вугілля на судні викликало низку незручностей, пов'язаних як із виникненням інтенсивного забруднення вугільним пилом, так і потребою виділення значного об'єму суднових приміщень для його розташування. Унаслідок цього корисна вантажомісткість судна суттєво знижувалась.

По-друге, праця кочегарів була фізично важкою та виснажливою. Кількість котлів на окремих суднах, особливо військових сягала декількох десятків. Якщо зважити на те, що кожен котел зазвичай мав чотири топки, із урахуванням вахтового завантаження, кількість кочегарів для обслуговування котлів, могла складати декількох сотень. За чотиригодинну вахту один кочегар повинен був закидати у топку до двох тонн вугілля, і все це у безпосередній близькості до розжарених конструкцій елементів топки при постійних потужних протягах від безперервно працюючих котельних вентиляторів. А якщо взяти до уваги, що кочегар повинен був не тільки рівним шаром розподілити вугілля по всій площині топки, але й забезпечити суцільне горіння його по всьому паливному дзеркалу топки, зібрати шлак, який просипається через колосники й видалити його із котла, і все це вручну, то складається повне уявлення про роботу кочегарів на межі людських можливостей.

До того ж якість процесів горіння безпосередньо залежала від марки вугілля та місця його видобування. До найкращих марок кам'яного вугілля відносились «антрацити», що видобувались у шахтах Великобританії та Донецького басейну. Для полегшення важкої праці кочегарів та поліпшення теплотехнічних показників роботи топок у 40-х рр. XX ст. була створена конструкція топки котла з шурувальною планкою, яка механічно розподіляла вугілля на колосниковій решітці і складала золу у шлакову камеру. Принципова схема топки з шурувальною планкою подана на рис. 4.53.

У перетині планка має форму трикутника з великим кутом нахилу передньої грані і меншим кутом нахилу задньої. Під час руху планки в котлі по колосниковій решітці топки вперед відбувається значне переміщення частинок вугілля в горизонтальному напрямку, їх підйом і перевалювання через планку.

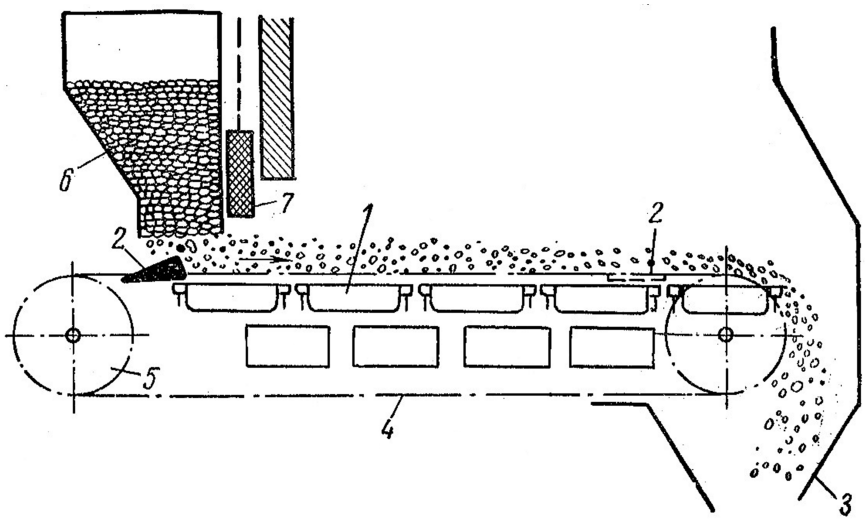


Рис. 4.53. Топка котла з шурувальною планкою

Коли шурувальна планка рухається назад, то вугілля зміщується не більше ніж на чверть від величини зрушення в прямому напрямку. Для надійного заповнення колосникової решітки вугіллям, а також здійснення шурування шару, робиться чергування ходів планки на різну довжину з різними інтервалами часу. У міру згоряння палива шар просувається в кінець колосникової решітки і скидається в канал видалення шлаку.

Основою топки є горизонтальна колосникова решітка *1*, по якій переміщується шурувальна планка *2*, тригранного перерізу. Планка здійснює зворотно-поступальний рух, який їй передається ланцюгом *4*, розташованим уздовж решітки. Ланцюг отримує рух від зірочки *5*, яка здійснює певну кількість обертів за годинниковою стрілкою та проти неї через проміжки часу у 2…5 хв. Планка контактує з паливом, що горить, лише на протягом короткого періоду часу (15…20 с), а між ходами остигає у витратному бункері. Шибер *7* запобігає спалаху палива, що знаходиться у бункері. Зола та шлак скидаються з колосникової решітки у шлакову камеру *3*.

Корисна інформація! На початку 50-х рр. XX ст. на серії суховантажних пароплавів, водотоннажністю 4500 т, які будувались на верфі «Нептун» Германської демократичної республіки, були встановлені по два котли з шурувальною планкою. Це були однопроточні екрановані парові котли з кип'ятильними трубками площею 186 м^2, пароперегрівниками площею 38,6 м^2, економайзерами площею 110 м^2 і повітропідігрівниками площею 107,5 м^2, які виробляли 13 т/год пари, перегрітої до температури 325 °С за тиску 1,45 МПа. Тиск повітря у топках – 210 мм водяного стовпа створював електричний вентилятор потужністю 17 кВт, продуктивністю 12 000 м^3/год. За годину

котли витрачали 830 кг сілезького вугілля. Енергетична установка з паровою машиною потужністю 1850 кВт забезпечувала судну швидкість ходу до 13,3 вузлів.

Ідея вугільної топки з шурувальною планкою несподівано набула своє друге народження у 1983 році, коли була здійснена спроба створення суднової енергетичної установки, яка б працювала на кам'яному вугіллі.

Цікава інформація! Японська компанія «Mitsubishi» побудувала бокситовоз «Riva Boyn» дедвейтом 75 000 т з паротурбінною енергетичною установкою, два парові котли якої мали вугільне опалення. Котли продуктивністю 70 т/год пари, перегрітої до температури 480 °С за тиску 6,3 МПа, були обладнані високоавтоматизованою системою подачі в топку гранульованого (22–45 мм) вугілля із вугільних бункерів об'ємом 4222 м^3. Вугілля подавалось у два витратні бункери (хопери), розраховані на 6 год роботи парових котлів. Із хоперів пневматична система подавала 16 т/год вугілля у топки парових котлів з шурувальною планкою. Погодинно до 25 т золи у вигляді водяної пульпи відводилось за борт судна.

Усі системи завантаження, подачі вугілля, видалення золи були повністю герметичні та виключали появу вугільного пилу в котельному відділенні та у приміщеннях судна. Енергетична установка включала в себе парову турбіну «MST-21-2» компанії «General Electric».

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. *Які парові котли відносяться до головних?*
2. *Назвіть призначення на судні допоміжних суднових котлів.*
3. *Дайте визначення утилізаційних котлів.*
4. *На які групи за будовою поділяються суднові котли?*
5. *Як забезпечується природна циркуляція у котлах?*
6. *Наведіть визначення кратності циркуляції.*
7. *З яких елементів складається водотрубний котел?*
8. *Надайте характеристику опускним та підйомним трубам парового котла.*
9. *Назвіть основні складові топки котла.*
10. *Які додаткові поверхні нагріву парового котла призначені для підвищення його ефективності?*
11. *Назвіть хвостові поверхні нагріву котла.*
12. *Наведіть визначення котельного агрегата, котельної установки.*
13. *Які елементи котла відносяться до водяного простору?*
14. *Чим визначається дзеркало випаровування?*
15. *Розгляньте основні характеристики котла.*
16. *Назвіть особливості конструкції перших суднових котлів скриняного типу.*
17. *Поясніть назву – «лабіринті котли», «галерейні котли».*
18. *Назвіть основні недоліки конструкцій перших суднових котлів.*
19. *Чому стався перехід на циліндричну форму корпусу вогнетрубних котлів?*
20. *Коли виникли оборотні, прольотні та локомотивні котли?*
21. *Які параметри пари реалізовані у вогнетрубних котлах?*
22. *Порівняйте характеристики вогнетрубних та водотрубних котлів.*
23. *Навіщо використовувалось штучне дуття?*
24. *Які конструктивні особливості перших водотрубних котлів?*
25. *Які переваги та недоліки мав котел Бельвіля?*
26. *Які особливості конструкції мали секційні котли?*
27. *Назвіть основні технічні характеристики секційних котлів.*
28. *Назвіть позитивні якості трикутних барабанних котлів «Yarrow».*
29. *Розшифруйте марку котла «КВГ-34К», наведіть його характеристики.*
30. *Назвіть відмінності в будові котлів «КВГ-34К», «КВГ-25», «КВГ-25К».*
31. *Будова та принцип роботи головного котла танкера «Труд».*
32. *Наведіть параметри пари сучасних головних та допоміжних котлів.*
33. *До появи яких специфічних конструктивних особливостей парових котлів привело застосування проміжного перегріву?*
34. *Які головні парові котли отримали назву «котлів шахтного типу»?*
35. *Яке розташування форсунок застосовано у котлі «КВГ-80»?*

36. *Наведіть значення температури живильної води та повітря, що подаються у котел «КВГ-80».*
37. *Назвіть особливості конструкції та основні елементи головного котла «Spanner ESD».*
38. *Які параметри пари генерує котел «Spanner ESD»?*
39. *Охарактеризуйте теплову схему ПТУ серії UST.*
40. *Чому в корабельних ПТУ набули широкого розповсюдження високонапірні котли типу КВГ?*
41. *Охарактеризуйте схему роботи високонапірного ПК з природною циркуляцією.*
42. *Як облаштований модернізований високонапірний котел типу КВГ-6М?*
43. *Поясніть будову допоміжного котла «КВ-35/25-1».*
44. *Як забезпечується підігрів котельної води у допоміжному котлі «КВ-35/25-1»?*
45. *Охарактеризуйте шлях повітря від дуттьового вентилятора у котлі «КВ-35/25-1».*
46. *Яке призначення допоміжних котлів транспортних суден з ДЕУ?*
47. *Як використовують продукти згоряння палива від допоміжної котельної установки?*
48. *Назвіть характерні особливості допоміжного котла КВ1-1.*
49. *Яка інформація міститься у позначенні котлів типу КАВ та КВВА?*
50. *У чому полягає призначення сажообдувних пристроїв котлів типу КВВА?*
51. *Які конструктивні особливості допоміжних парових котлів «Aalborg AQ-3»?*
52. *Які конструктивні особливості допоміжних парових котлів «Aalborg AQ-9»?*
53. *Які конструктивні особливості допоміжних парових котлів «Aalborg AQ-10/12W»?*
54. *Які конструктивні особливості допоміжних парових котлів «Aalborg OL» фірми «Alfa Laval Aalborg Industries»?*
55. *Водотрубні парові котли «МАС-В» фірми «Mitsubishi Heavy Industries» – конструкція, параметри пари, продуктивність, ККД.*
56. *Водотрубні парові котли «Aalborg D» фірми «Alfa Laval Aalborg Industries» – конструкція, параметри пари, продуктивність, ККД.*
57. *Водотрубні вертикальні парові котли типу MS фірми «Kangrim Heavy Industries» – конструктивні особливості, параметри пари, ККД.*
58. *Назвіть характеристики газотрубних горизонтальних котлів «Aalborg OH».*
59. *Назвіть характеристики газотрубних вертикальних парових котлів «Aalborg CHB» фірми «Alfa Laval Aalborg Industries».*

60. *Газотрубні вертикальні парові котли «Sunroad». Що означає назва? Які особливості їх конструкції?*
61. *Як розшифровується марка котла «КУП 110/5,5»? Будова котла.*
62. *Технічні характеристики утилізаційного котла «КУП-1100».*
63. *Які технічні рішення забезпечили високу компактність котлоагрегата «КУП- 3100»?*
64. *Будова, технічні характеристики утилізаційного котла «Aalborg XS-2V».*
65. *Будова, технічні характеристики утилізаційного котла «Aalborg P».*
66. *Склад схеми системи утилізації з УК двох тисків та комплексним використанням ВЕР ДВЗ.*
67. *Будова, технічні характеристики котла з комбінованим опаленням «Aalborg AQ-10/16».*
68. *Будова, технічні характеристики котла з комбінованим опаленням «OV32» фірми «Osaka Boiler Company».*
69. *Газоводотурбінні котли з комбінованим опаленням серії PC фірми «Kangrim Heavy Industries» – конструктивні особливості.*
70. *Вертикальні циліндричні газотрубні парові котли з комбінованим опаленням «Aalborg OC-TCi» фірми «ALAI» – конструктивні особливості.*
71. *Які переваги та недоліки мають термомасляні котли?*
72. *Охарактеризуйте загальну будову допоміжного термомасляного котла «Reinsteel».*
73. *Допоміжні термомасляні котли «Aalborg TFO» фірми «Alfa Laval Aalborg Industries» – конструктивні особливості.*
74. *Утилізаційні термомасляні котли «Aalborg EX» фірми «Alfa Laval Aalborg Industries» – особливості конструкції, характерні параметри робочого тіла.*
75. *Які проблеми викликає застосування твердого палива в суднових енергетичних установках?*
76. *Які конструктивні особливості топки котла з шурувальною планкою?*
77. *Які перспективи використання твердих палив у судновій енергетиці сьогодення?*

ГЛАВА 5. СУДНОВІ ДИЗЕЛЬНІ УСТАНОВКИ

5.1. Довгий шлях від ідеї до створення працездатного дизельного двигуна для судна

Розробки Д. Папена, Т. Севері, Д. Уатта та інших привели до того, що наприкінці XVII ст. парова машина стала універсальним двигуном і здавалося, що ніякої заміни пари бути не може. Уявити собі тепловий двигун, який працював би інакше, ніж парова машина, на ті часи було дуже важко. Але найбільш прогресивні інженери та винахідники вже замислювалися над існуючою послідовністю отримання механічної енергії. Утворені під час спалювання палива продукти згоряння використовуються для отримання водяної пари, яка вже і здійснює певну роботу. Вони вважали, що набагато ефективніше для отримання роботи безпосередньо використовувати енергію утворених продуктів згоряння. Проблема багато в чому полягала в тому, що спалювання в циліндрі найбільш поширених на ті часи палив не могло забезпечувати отримання продуктів згоряння необхідної якості.

Спроб винайти необхідне паливо було багато. Так, Ж. Готдейль у 1678–1682 рр. і Х. Гюйгенс у 1681 р. запропонували так званий атмосферний двигун, поршень якого піднімався внаслідок вибуху пороху догори і фіксувався там. Після охолодження продуктів згоряння під поршнем утворювалося розрідження. До цього моменту принцип дії обох двигунів був однаковий, але далі були відмінності. У двигуні Гюйгенса атмосферний тиск примушував поршень опускатися і здійснювати корисну роботу, а у двигуні Готдейля розрідження використовувалося для всмоктування води, яку потім витісняв поршень. Проблеми виникали у зв'язку з малою частотою здійснення робочих ходів у згаданих двигунах.

Ідея заміни вугілля як палива у теплових двигунах була особливо актуальною у Франції, у якій, на відміну від Англії, вугілля було в повному дефіциті. Доходило до курйозів.

Цікавий факт! У 1794 р. брати Клод, Жозеф і Нісефор Ньєпси, зайняті пошуками палива, продукти згоряння якого могли би бути застосованими як робоче тіло, подібне до водяної пари, запропонували власну конструкцію двигуна «піреолофор» («пір» – вогонь; «еол» – бог вітру та повітря; «фор» – нести, виробляти), паливом якого повинен був стати лікоподій – насіння спорової рослини – плауна. Вважати лікоподій серйозним «конкурентом» вугілля внаслідок обмежених річних врожаїв плауна просто

неможливо. Вирішуючи це, у наступному проєкті як паливо брати розглядали суміш із «чотирьох частин кам'яного вугілля та однієї частини смоли, усе це перетворюється на найтонший порошок за допомогою води». У 1806 році вони отримали патент на свій «піреолофор», а у 1816 році застосували нафту для його роботи і побудували експериментальне судно на річці Сена під Парижем. На жаль, зусилля винахідників Ньєпсів не мали успіху.

Майже одночасно з початком робіт братів Ньєпсів у 1794 р. Роберт Стріт отримав у Англії патент на атмосферний двигун, що повинен був працювати на продуктах згоряння спирту. Запалювання суміші випаруваного спирту з повітрям здійснювалося на половині ходу поршня за допомогою запального полум'я, після чого здійснювався робочий хід. У цьому двигуні вже з'являються певні риси сучасних ДВЗ.

У 1799 р. патент на світильний газ, що видобувався з тирси або кам'яного вугілля, було видано французу Філіппу Лебону, який, отримавши газоподібне паливо, зміркував, що його можна рівномірно розподілити у повітрі й отримати після запалювання однорідну масу, подібну до пари. У патенті на тепловий двигун, отриманий Ф. Лебоном у 1801 р., передбачалося стиснення світильного газу і повітря окремими насосами, змішування їх у спеціальній камері й подача суміші у робочий циліндр, у якому вона запалювалася та розширювалася. У металі конструкція запатентованого двигуна втілена не була.

У пошуках раціонального типу палива були окремі спроби застосувати водень. Англійський винахідник Джеймс Джонстон отримав у 1841 р. патент на двигун, що працював на суміші водню з киснем. Продукти згоряння охолоджувалися, конденсувалися, і поршень переміщувався атмосферним тиском. Але водень, ураховуючи труднощі, пов'язані з його транспортуванням та зберіганням, так і не став паливом для перших двигунів. На цьому етапі становлення і розвитку ДВЗ[6] вирішальне значення як паливо відіграв світильний газ, але появі працездатного двигуна передувало багато спроб.

Існують відомості про те, що у 1823 р. Самуель Браун побудував атмосферний ДВЗ на світильному газі, розрідження в якому досягалося охолодженням (двигун мав водяну оболонку) залишку газів у циліндрі після випуску продуктів згоряння. Запалювання відкритим полум'ям здійснювалося у верхній мертвій точці.

У 1833 р. Вельмант Райт побудував двигун з охолодженням циліндрів за допомогою водяної оболонки. Згідно з отриманим у 1838 р. патентом, у двигуні Вільяма Барнета повітря і газ попередньо стискують

[6] Власне сучасні дизельні, карбюраторні й газотурбінні двигуни є двигунами внутрішнього згоряння. Але за термодинамічними ознаками історично термін «двигун внутрішнього згоряння» закріпився тільки за поршневими тепловими двигунами, які працюють на продуктах згоряння.

у окремих циліндрах, а суміш перед запалюванням дотискається у робочому циліндрі.

Англієць Дрек у 1842 р. запатентував і побудував двигун, що працював на світильному газі. Всмоктування суміші відбувалося на половині ходу поршня. У циліндрі було виконане вікно, яке сполучалося на середині ходу поршня з розжареною чавунною трубкою, за допомогою якої здійснювалося запалення робочої суміші. У подальшому Дрек пристосував свій двигун для роботи на гасі. На виставці у 1847 р. у Філадельфії двигун Дрека розвивав потужність до 20 к. с. за частоти обертання 60 хв$^{-1}$. У 1858 р. Хрістіан Рейтман переобладнав для роботи на світильному газі раніше побудований ним двигун (у 1852 р.), у якому повітря і водень стискувалися насосом до 2…8 кг/см^2, суміш запалювалася електричною іскрою і продукти згоряння здійснювали роботу в циліндрі.

В атмосферному двигуні з вільним поршнем, побудованому в 1857 р. Барзанті й Матеуччі, у нижній частині циліндра під поршнем горюча газоповітряна суміш запалювалася електричною іскрою. Під тиском продуктів згоряння поршень рухався догори. Рух донизу поршень здійснював під власною вагою і тиском атмосферного повітря. Шток поршня при цьому русі через прикріплену до нього зубчасту рейку приводив в обертання вал з маховиком.

У 1858 р. Дегеран (Франція) запропонував газовий двигун зі стисненням горючої суміші в робочому циліндрі.

Усі наведені приклади не привели до створення двигуна, який міг би створити реальну конкуренцію достатньо досконалій на ті часи паровій машині.

Уперше в історії енергетики Жан Етьєн Ленуар, який у 1861 р. отримав патент на двотактний двигун, що працював на світильному газі, розробив працездатний, придатний для практичного застосування двигун, втілив його в експлуатацію і досяг значних успіхів. На Всесвітній виставці у Парижі 1864 р. двигун Ленуара отримав перше місце. На той час у Франції та Англії було виготовлено вже 300 його двигунів. Ленуар навіть побудував катер зі своїм двигуном і після вдалих випробувань на річці Сена продав його компанії, що забезпечувала сполучення між містами Париж і Шарантон-ле-Пон.

Перші двигуни Ж. Ленуара розвивали потужність 3…12 к. с. за частоти обертання 100 хв$^{-1}$, їх ефективність становила біля 4 %. Незважаючи на такі низькі показники, ці двигуни будувалися протягом майже 20 років до появи та розповсюдження двигунів Ніколауса Отто.

Атмосферний двигун, який побудував Н. Отто спільно з Е. Лангеном, багато в чому повторював принцип двигуна Барзанті й Матеуччі. Рух

поршня перетворювався на обертання вихідного вала за допомогою зубчасто-рейкової передачі й кулькової муфти вільного ходу. За потужності 0,635 к. с. ККД двигуна досягав 15 %.

Завдяки високій економічності (майже у 4 рази більший ніж у двигуні Ленуара) двигуни Отто-Лангена потужністю 0,5…3 к. с. стали користуватися значним попитом, їх було випущено біля 5 тис. од., загальна потужність становила біля 6 тис. к. с. Окремі двигуни експлуатувалися ще на початку XX ст. Атмосферні двигуни Отто-Лангена багато в чому стали попередниками сучасних дизель-молотів.

Дещо раніше Отто і Лангена атмосферну машину побудував інженер Шиль на германському заводі Гумбольдта. Двигун працював спокійніше й рівномірніше порівняно з першою машиною Отто-Лангена, але був набагато складнішим, мав значно більші габарити (довжина 5 м за потужності 1 к. с.).

На Всесвітній виставці 1878 р. у Парижі демонструвалося декілька модифікацій двигуна Отто, що мали ті якості, завдяки яким ДВЗ отримали всесвітнє розповсюдження: компактність, висока потужність, плавний хід. Ці якості були досягнуті завдяки реалізації циклу, який у подальшому отримав назву «*чотиритактного*» і був викладений Отто у його патенті, отриманому в серпні 1877 року.

До речі, ще у 1862 р. Альфонс Бо де Роша описав у своїй книзі принцип дії двигуна з чотиритактним циклом простої і подвійної дії та обґрунтував переваги попереднього стиснення горючої суміші. Робота А. Бо де Роша стала причиною звинувачення Отто у запозиченні ним ідеї чотиритактного циклу.

У 1873 р. американець Брайтон побудував і у 1876 р. продемонстрував на виставці у Філадельфії перший бензиновий двигун, який працював на гомогенній повітряно-бензиновій горючій суміші, що запалювалася від постійного джерела полум'я. Склад горючої суміші регулювався зміною подачі бензину плунжерним насосом. Спочатку Брайтон застосував гас, а потім через його слабку випаровуваність перейшов на бензин. Досягненням Брайтона було й те, що він винайшов і застосував для свого двигуна випарний карбюратор.

Майже через 20 років після створення ним же водневого двигуна Х. Рейтман у 1873 році побудував перший чотиритактний двигун, що працював на світильному газі. Він першим у світі застосував у своєму двигуні примусове відкриття впускного та випускного клапанів. Двигун мав потужність 0,75 к. с. за частоти обертання 200 $хв^{-1}$, він майже протягом 8 років забезпечував привід свердлильних і фрезерних верстатів у майстерні винахідника.

У 1892 р. фірмою «Горнсбі та сини» побудовано двигун, який працював на нафті, що впорскувалася в ту ж камеру, у яку надходило стиснене у двигуні повітря, випаровувалося і запалювалося від розжарених поверхонь камери, яку перед пуском спеціально накаляли.

У 1893 р. на Всесвітній виставці у Чикаго демонструвалися зразки гасових двигунів з випарниками і запальниками (так званих калоризаторних двигунів). Такі двигуни замість електричної свічки мали розташований у кришці циліндра калоризатор – розжарену від згоряння палива у циліндрі деталь, яка використовувалася для запалення рідкого палива, що впорскувалося через форсунку під тиском, створюваним паливним насосом. Але ж бензин має значну перевагу перед гасом за випаровувальними властивостями.

Поштовхом для подальшого розвитку бензинових двигунів стало бажання застосувати їх у автомобілі. Вирішальну роль у створенні бензинового двигуна відіграли німецькі інженери Ю. Даймлер і В. Майбах. Головна ставка у створенні автомобільного двигуна була зроблена на двотактний двигун, винахідником якого вважається англієць Дуглас Кларк (1878 р.). Очікувалося, що потужність такого двигуна, зважаючи на те, що на один робочий такт припадає тільки один підготовчий такт (у чотиритактному – три підготовчих такти), буде більшою. Двигун уперше демонструвався інженером В. Ехельгейзером на виставці у м. Дюссельдорфі. На цій же виставці був представлений двотактний двигун подвійної дії Е. Кертінга (Німеччина). Але надії на двотактний двигун не виправдовувалися і майже всі наступні автомобільні двигуни були чотиритактними.

Першим автомобільним двигуном, прообразом усіх сучасних автомобільних двигунів був двигун Даймлера і Майбаха, який розвивав потужність 1,5 к. с. і мав частоту обертання 900 $хв^{-1}$ за об'єму циліндра 250 $см^3$.

Двигун Даймлера і Майбаха почав вироблятися у значних кількостях у різних країнах. З 1887 р., коли Даймлер у Канштаті й Карл Бенц у Мангеймі здійснювали перші виїзди на екіпажах з бензиновими двигунами, розпочалася всесвітня моторизація наземного транспорту. Автомобільні двигуни Даймлера і Майбаха були бензиновими, але мало відрізнялися від газових, тому що були обладнані випарними карбюраторами. Справжню революцію в автомобільному двигунобудуванні спричинило винайдення угорським інженером Донатом Банкі й механіком Яношем Лонка розпилюючих карбюраторів. До речі, Банкі першим запропонував додавати воду до паливоповітряної суміші карбюраторного двигуна з метою підвищення ступеня стиснення.

З розвитком автомобільних двигунів вони ставали багатоциліндровими, підвищувалася частота обертання, що сприяло зменшенню їх маси й габаритів.

Цікавий факт! Сьогодні майже всі дизелі потужністю більше 100 кВт випускаються з турбонаддувом. А все починалося так: у 1905 р. швейцарський інженер Альфред Бюхі, зважаючи на те, що тиск газів на виході з дизеля вищий за атмосферний, запропонував додатково розширити ці гази в турбіні до атмосферного тиску, а отриману роботу використати для стиснення повітря перед подачею його до двигуна (стиснення повітря підвищувало його густину, збільшувало масу повітряного заряду циліндра і, як наслідок, приводило до підвищення циліндрової потужності). Турбіна й компресор були зв'язані з колінчастим валом двигуна. Практичного втілення ідеї Бюхі не знаходили. Перед Першою світовою війною відомий французький конструктор Август Рато запропонував об'єднати турбіну й компресор в один агрегат – турбокомпресор – і від'єднати вал турбокомпресора від вала двигуна. Перший турбокомпресор за ідеями Рато був побудований у 1911 р. фірмою «General Electric», але змонтований на авіадвигуні тільки у травні 1918 р. У цьому ж 1911 р. приступив до реалізації своїх ідей Альфред Бюхі, який запропонував підводити вихлопи окремих циліндрів до турбіни так, щоб вихлоп з одного циліндра не накладався на вихлоп з іншого. Ця система наддування (патент на неї Бюхі отримав у 1915 р.) подалі отримала назву «імпульсної». Так виникли дві системи турбонаддуву дизелів: *імпульсна* (Бюхі) та *ізобарна* (Рато). Кожна з них має свої недоліки й переваги.

Не можна не відмітити ще низку етапних досягнень у створенні працездатних ДВЗ.

Так у 1887–1890 рр. Джеймс Харгревс побудував декілька двотактних двигунів із самозапалюванням палива (дігтярного масла) від високої температури стиснення повітря.

У 1885 р. Капітен виготовив двигун, який працював на гасі, з подачею його до випарника поршневим насосом у кінці такту випуску. У двигуні застосовувалися автоматичний впускний і привідний випускний клапани. Двигуни Капітена випускалися у значних кількостях.

У 1890 р. на заводі Свідерського в Лейпцизі побудовано двигун Капітена із самозапалюванням мазуту від високої температури стисненого повітря. Паливо розпилювалося стисненим повітрям.

Нарешті наступив 1892 р., який поклав початок тріумфальному поширенню нового типу двигуна. У цьому році Рудольфу Дизелю на запропоновану конструкцію двигуна було видано германський патент.

Історична довідка. Рудольф Дизель народився в Парижі у 1858 р. в сім'ї палітурника. У 1873 р. був зарахований до Аугсбурзької політехнічної школи, після закінчення якої вступив до Мюнхенської вищої технічної школи. Після закінчення цієї школи проходив практику на Вінтертурзькому машинобудівному заводі братів Зульцер. До речі, знайомство Р. Дизеля з власником мало серйозний вплив на подальший розвиток світового двигунобудування. У подальшому він працював на заводі з виробництва холодильних установок (Франція) інженером, а потім – директором. У Німеччині 28 лютого 1892 р. отримав перший патент на двигун своєї конструкції, який мав усі ознаки сучасного дизельного двигуна. Патентом передбачалося адіабатичне стиснення

чистого повітря у циліндрі двигуна до тиску 25 МПа з досягненням високої температури. Впорскування палива та його згоряння повинно було відбуватися ізотермічно, без подальшого підвищення температури, розширення продуктів згоряння передбачалося адіабатичним. У ті часи отримати такі високі тиски було дуже складно, тому стиснення передбачалося багатоступеневим, а в подальшому він знизив тиск стиснення до 5 МПа. Запуск двигуна – стисненим повітрям. Як паливо Р. Дизель застосовував вугільний дрібнодисперсний порошок або рідке дрібно розпилене паливо.

Теоретичні положення, визначальні для створення цього двигуна, були викладені Р. Дизелем у книзі з багатозначною назвою «Теорія і конструкція раціонального теплового двигуна, покликаного замінити парову машину та інші існуючі двигуни», яка вийшла друком через рік після отримання патенту.

У 1893 р. Р. Дизель одержав новий патент, додатковий до основного, і виготовив за ним тепловий двигун, випробовування якого у 1895 р. були успішними: він показав ККД 36 %, тобто у 2 рази вище порівняно з існуючими на той час найкращими двигунами.

Рудольф Дизель отримав патенти на свій двигун у всіх промислово розвинених країнах. Патенти на право виробництва двигунів Дизеля серед інших придбали фірми «Зульцер» (Швейцарія), «Бурмейстер і Вайн» (Данія), «Людвиг Нобель».

Заслугою Р. Дизеля є не тільки те, що він запропонував новий тип двигуна, але й колосальна його наполегливість у реалізації своїх ідей до промислового застосування.

У 1908 р. закінчився термін дії патентів Дизеля і його двигуни почали виготовляти заводи всього світу. У той же час розпочалися нападки на авторство Дизеля, його звинувачували в тому, що основні ідеї, закладені у конструкцію дизельних двигунів, були запропоновані раніше до нього.

Доля Р. Дизеля була трагічною. Він дуже важко переживав нападки на нього та фінансову руйнацію. Він почав зазнавати періоди пригніченого настрою, занепаду сил та втоми. Мабуть саме в такий період з 29 по 30 вересня 1913 р. сталася неймовірна подія. Рудольф Дизель раптово зник з борту судна, яке здійснювало рейс з Антверпена до Англії. Вважають, що він покінчив життя самогубством, кинувшись у море.

Ті обставини, що практична реалізація двигунів Р. Дизеля здійснювалася зі значними відхиленнями від його первинних ідей та із залученням пропозицій, реалізованих раніше іншими винахідниками, призвели до багаточисельних виступів з боку його недоброзичливців.

З окремими зауваженнями, які закидали Р. Дизелю, можна було б і погодитися, але не можна не визнати його серйозних заслуг у створенні нового двигуна та в широкому впровадженні у промисловості й на транспорті. Символічно, що двигун, який працює на важкому рідкому

паливі із самозапалюванням і утворенням горючої суміші в робочому циліндрі, отримав назву «Дизель» (рис. 5.1).

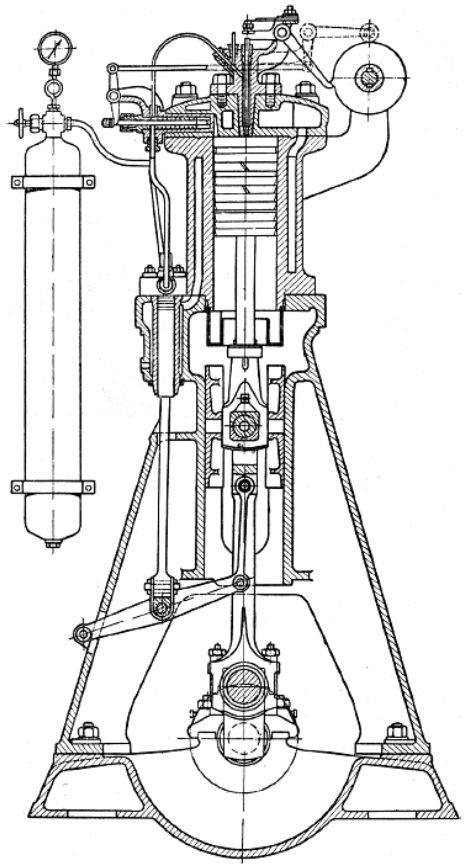


Рис. 5.1. Експериментальний двигун Дизеля (1896 р.) [1]

На поперечному перерізі двигуна Дизеля зразка 1896 р. показані основні елементи, застосовані його творцем. Це компресор, що приводиться в дію від шатуна двигуна через балансир, і пусковий балон стисненого повітря, за допомогою якого гас вдувається до робочої порожнини циліндра через голчастий клапан, розташований на геометричній осі циліндра. У лівій частині кришки циліндра розташовано клапан для всмоктування повітря і вихлопу продуктів згоряння, який приводиться в дію від кулачка, розташованого на кронштейні, праворуч від двигуна.

Пішов з життя Р. Дизель, а його двигун знаходив усе більше застосування і все більше вдосконалювався. Конструкція перших дизелів була недосконалою. Деякі іноземні заводи, які отримали ліцензії та почали випускати ці двигуни, через ненадійну роботу випущених дизелів

вимушені були припинити їх виробництво. Серйозним недоліком дизеля було те, що він працював на дорогому паливі – гасі.

У 1898 р. Петербурзький механічний завод фірми «Людвиг Нобель», що належала всесвітньо відомій родині Нобелів, придбав патент і розпочав будівництво дизелів. Рудольф Дизель спочатку серйозно сумнівався у технічних можливостях заводу, але все ж таки приступив до переговорів, які закінчилися позитивно.

Цікавий факт! Династію Нобелів, яка включає у себе 62 особи, без перебільшення можна вважати видатним явищем у світовій історії. Вони залишили свій слід у розвитку багатьох країн, прославили своє прізвище технічними відкриттями й різноманітною промисловою діяльністю. Голова цієї династії Емануель Нобель у 1859 р. повернувся до Швеції із синами Альфредом (більш відомим як винахідник динаміту і засновник Нобелівської премії) та Емілем.

Завод одразу ж поставив перед собою завдання – забезпечити роботу двигунів на сирій нафті. На заводі були розроблені й реалізовані важливі конструктивні вдосконалення, які стосувалися робочого процесу й механічної частини дизеля. І вже у 1899 р. пройшли випробовування першого двигуна, який за потужності 20 к. с. витрачав сирої нафти 221 г/(к. с. × год), у той час як закордонні двигуни витрачали більш дорого палива – гасу 240 г/ (к. с. × год). Це висунуло завод Нобеля у лідери двигунобудування. Виробництво двигунів цього типу стало основним профілем заводу.

До Першої світової війни на електростанціях, промислових підприємствах, військових та комерційних суднах були встановлені дизелі, вироблені на заводі Нобеля, загальною потужністю 65 000 к. с.

Особливою заслугою заводу Нобеля стала розробка двигунів і обладнання для суднових енергетичних установок. Навесні 1903 р. було прийнято до експлуатації перший у світі теплохід «Вандал», побудований заводом «Людвиг Нобель». Це було нафтоналивне судно озерного типу довжиною 75 м, шириною 10 м, з осадкою 1,8 м, вантажопідйомністю 820 т. Швидкість судна у 7,4 вузлів забезпечували 3 триціліндрові чотиритактні дизелі потужністю по 120 к. с. за частоти обертання 240 $хв^{-1}$. Для забезпечення переднього ходу і здійснення маневрів застосовувалася електрична передача. Таким чином, перший у світі теплохід одночасно був і першим у світі дизель-електроходом. У цьому ж 1903 р. у Франції побудоване річкове судно з реверсивним двигуном потужністю 25 к. с. а у 1904 р. дизельний двигун потужністю 200 к. с. установлено на підводному човні.

У 1904 р. ввійшло в експлуатацію аналогічне судно «Сармат», на якому встановлені два двигуни потужністю по 180 к. с. На «Сарматі»

була застосована передача, розроблена на заводі Нобеля інженером Ч. А. Дель-Пропосто. Між вихідним фланцем дизеля і валом гребного гвинта послідовно розміщувалися генератор, електромагнітна муфта та гребний електродвигун. На прямому ходу муфта вмикалася, а електричне коло розмикалося, тобто ротори генератора й електричного двигуна виконували роль звичайного валопроводу (ВП). Задній хід здійснювався за розімкненої муфти передачею потужності з електричного генератора на електродвигун.

Уже в 1908 р. на заводі Нобеля були побудовані реверсивні трициліндрові чотиритактні двигуни потужністю 120 к. с. за частоти обертання 400 хв$^{-1}$, призначені для підводного човна «Минога».

1907 р. ознаменувався застосуванням дизелів на підводних човнах Німеччини, і на кінець 1918 р. було побудовано 355 підводних човнів.

У Швеції в 1907 році була побудована шхуна «Orion» з реверсивним дизелем потужністю 60 к. с. У ці роки суттєвий внесок у розвиток дизелебудування для військових кораблів і транспортних суден зробив завод «MAN» (Maschinenbau Augsburg Nurnberg), який випускав у шестициліндровому виконанні двигун з діаметром циліндра й ходом поршня по 530 мм і з циліндровою потужністю 200 к. с. У подальшому завод «MAN» підвищив циліндрову потужність до 300 к. с. і кількість циліндрів до 10, тобто потужність двигунів доходила до 3000 к. с.

У 1910 р. побудовано танкер «Вулкан» з дизелем потужністю 400 к. с., а у 1911 р. введено в дію перше суховантажне судно з дизельною установкою потужністю 2400 к. с. – датське судно «Selandia».

У 1911 р. завод Нобеля побудував перший V-подібний восьмициліндровий двигун потужністю 200 к. с.

5.2. Класифікація та маркування суднових дизелів

Класифікація суднових дизелів. За своїм призначенням суднові дизелі поділяються на *головні* та *допоміжні* (рис. 5.2). Перші приводять у дію гребні вали з гвинтами та забезпечують рух судна. Другі призначені для обертання генераторів електричного струму допоміжних СЕС, насосів та інших допоміжних механізмів. Крім того, дизелі можуть бути *реверсивними*, у яких напрям обертання колінчастого вала може змінюватися, та *нереверсивними*, у яких він є незмінним.

Залежно від частоти обертання КВ дизелі поділяються на МОД (до 250 хв$^{-1}$), СОД (до 750 хв$^{-1}$) та ВОД (вище 750 хв$^{-1}$).

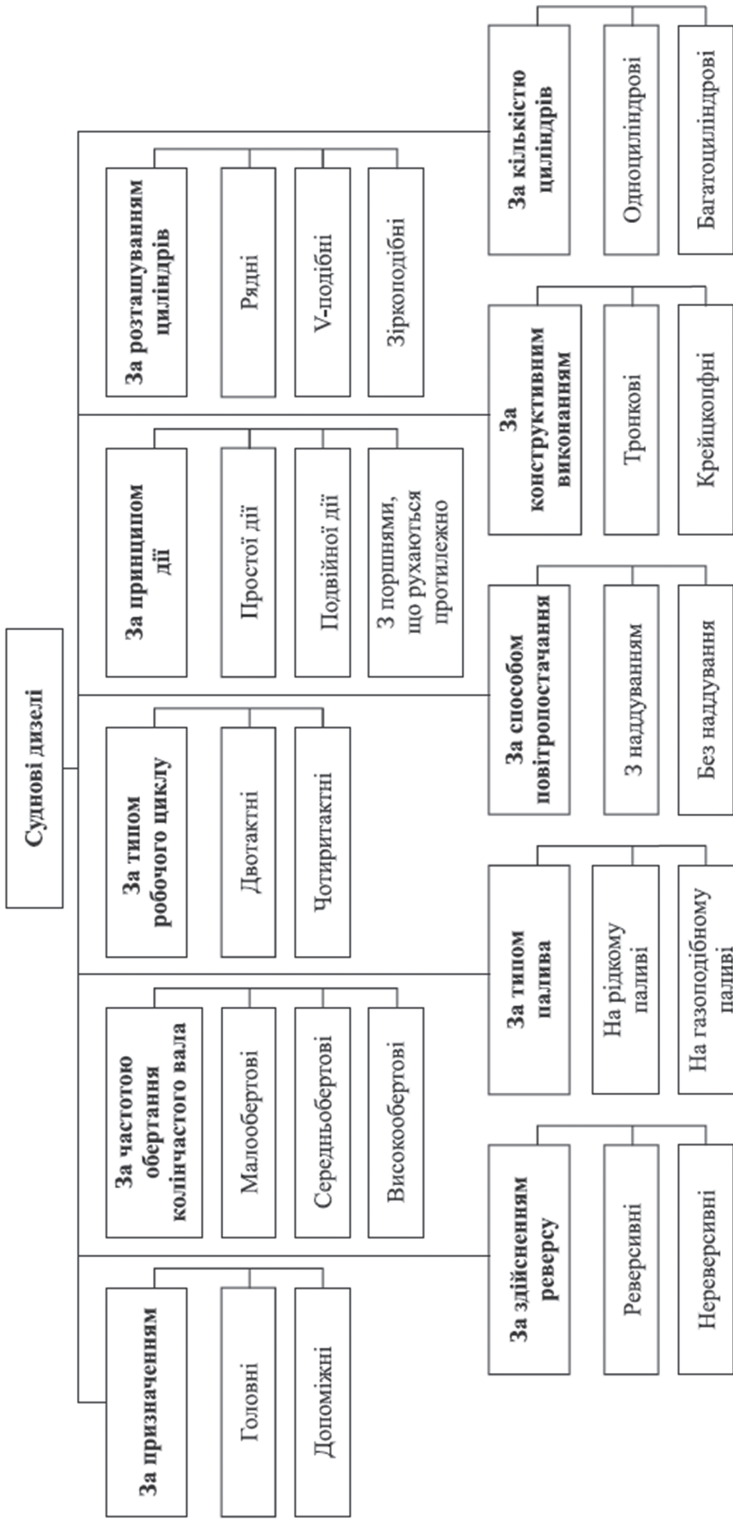


Рис. 5.2. Класифікація суднових дизелів

Корисна інформація! Наведений розподіл суднових двигунів на МОД, СОД і ВОД є умовним. Останнім часом до СОД окремі фахівці із суднової енергетики пропонують відносити двигуни із частотою обертання 350…1200 $хв^{-1}$. У подальшому викладенні матеріалу дотримуватимемося загальновизнаної класифікації.

За типом застосовуваного палива суднові дизелі бувають такими, що працюють на *рідкому* і *газоподібному паливах*. До перших належать двигуни, які без конструктивних доопрацювань можуть працювати на різних паливах, у тому числі на газі. Їх ще називають *двопаливними*. До газових належать дизелі, у яких основне паливо газоподібне, а рідке паливо у невеликій кількості використовується як запальне.

Усе різноманіття суднових дизелів поділяється на *чотиритактні* та *двотактні*. У перших робочий цикл здійснюється за чотири ходи поршня, у двотактних – за два.

Розрізняють дизелі й за характером наповнення циліндра повітрям – *без наддування* і *з наддуванням*, коли повітря у циліндри нагнітається під тиском.

Існують дизелі *простої* та *подвійної дій*. Якщо у перших процеси робочого циклу відбуваються у циліндрі з одного боку поршня, то у других вони відбуваються попеременно з обох боків поршня, тобто паливо впорскується спочатку у верхню частину циліндра (робочий хід спрямований від верхньої мертвої точки (ВМТ) до нижньої мертвої точки (НМТ), а потім у нижню (робочий хід спрямований від НМТ до ВМТ). У кожному циліндрі *дизелів з поршнями*, *що рухаються протилежно*, розміщено два поршні, які переміщуються вертикально у протилежних напрямках і утворюють у середній частині циліндра спільну камеру згоряння. Кожен поршень через шатун обертає свій колінчастий вал, потужність від обох валів через редукторну передачу передається на один гребний вал.

За конструктивним виконанням кривошипно-шатунного механізму всі суднові дизелі поділяються на *тронкові* та *крейцкопфні*. У тронковому двигуні сили нормального тиску, які виникають під час нахилу шатуна, передаються до циліндра нижньою напрямною частиною поршня – тронком. У крейцкопфному двигуні нормальне зусилля утворюється у крейцкопфному з'єднанні й передається повзунами на паралельні напрямні, закріплені на станині двигуна. Тронковими є всі СОД і ВОД, МОД виконують крейцкопфними.

Залежно від кількості циліндрів дизелі бувають одно- або багатоциліндровими. Циліндри багатоциліндрових дизелів можуть бути розташовані в один ряд (*рядні*), у вигляді букви V (V-*подібні*) або зірки (*зіркоподібні*).

Одноциліндрові двигуни на суднах майже виключно знайшли застосування для приводу гвинтів рятувальних та робочих шлюпок.

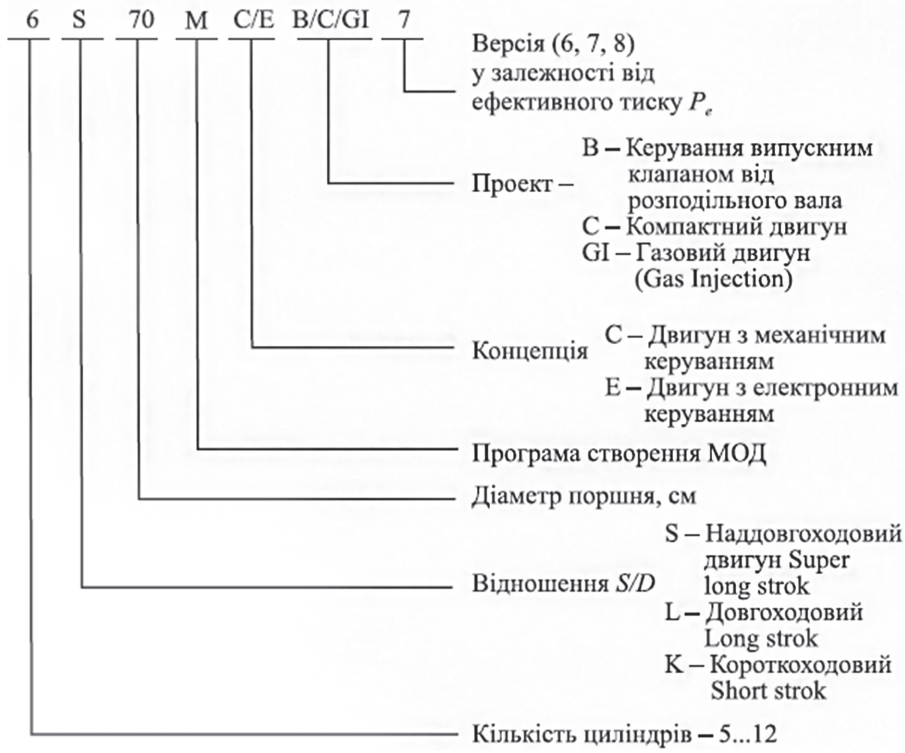
Максимальна кількість циліндрів сучасних суднових дизелів обмежується 20, причому існують рядні дизелі із 14 циліндрами. Максимальний діаметр циліндра – 980…1080 мм.

Існують й інші ознаки, за якими класифікують суднові дизелі, але навіть наведене вище свідчить про різноманітність типів дизелів, застосовуваних на суднах.

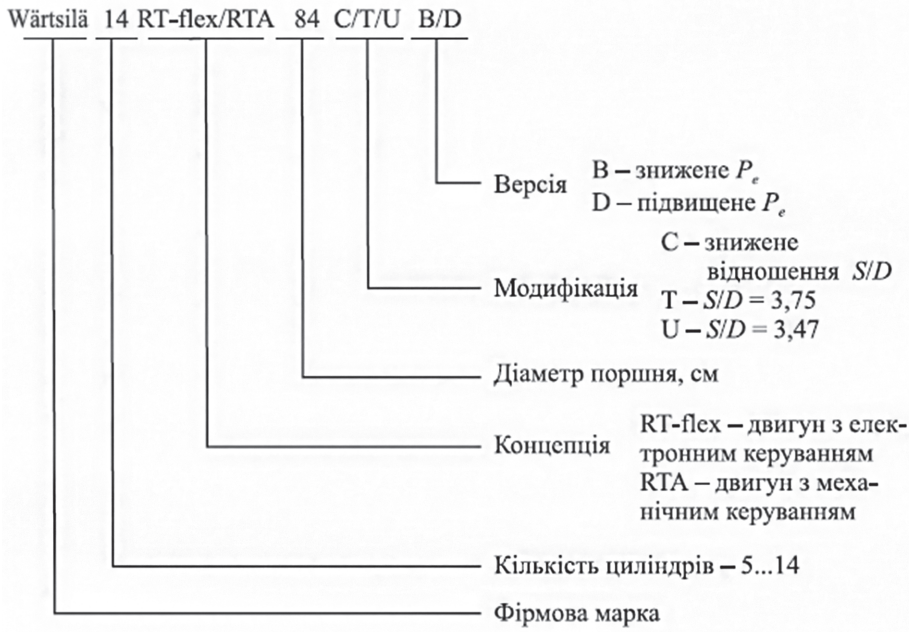
Маркування суднових дизелів. Єдиного світового позначення дизельних двигунів не існує, тому кожна дизелебудівна компанія використовує для маркування своїх двигунів власні системи.

Далі наведені позначення суднових дизелів, застосовані для найпоширеніших двигунів компаніями, що їх виробляють.

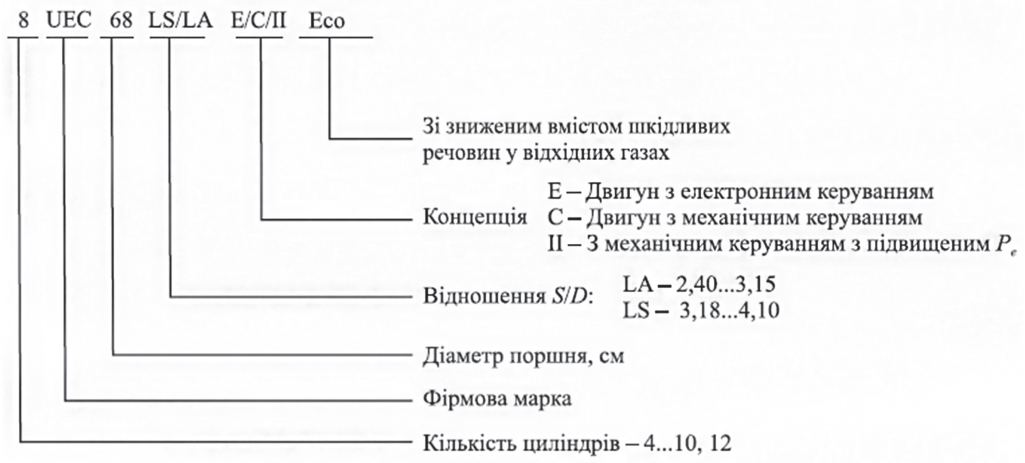
Малообертові двигуни компанії «MAN B&W Diesel Group»



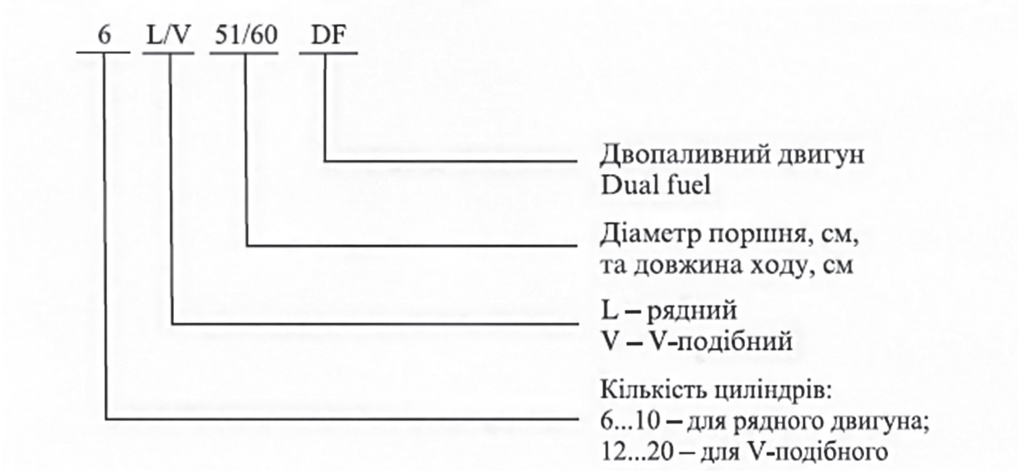
Малообертові двигуни компанії «Wärtsilä Corporation»



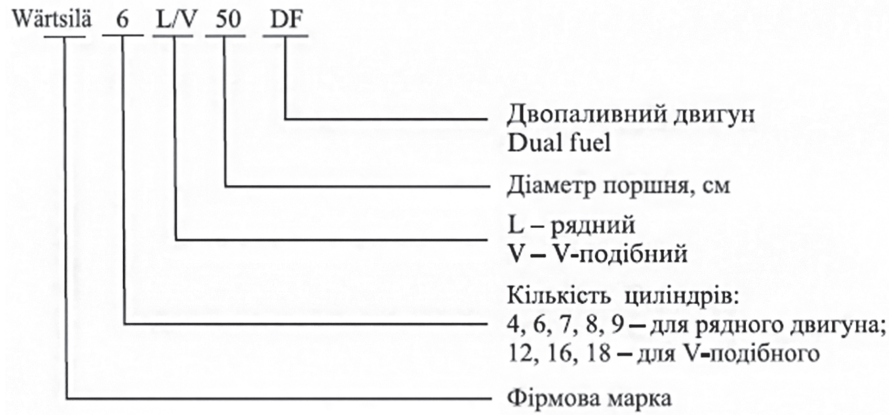
Малообертові двигуни компанії «Mitsubishi Heavy Industries Ltd»



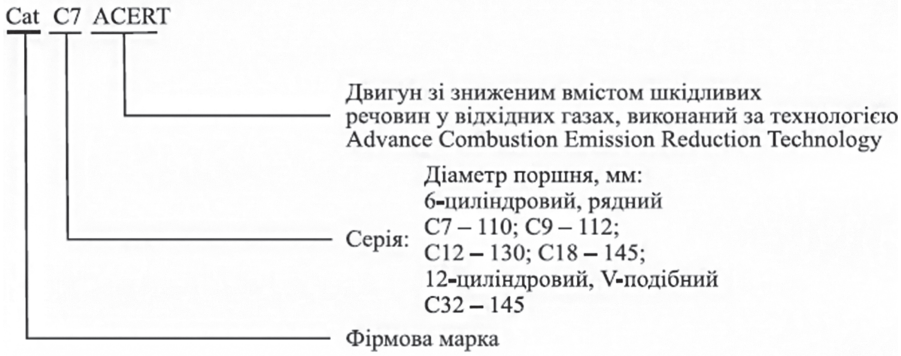
Середньо- та високообертові двигуни компанії «MAN B&W Diesel Group»



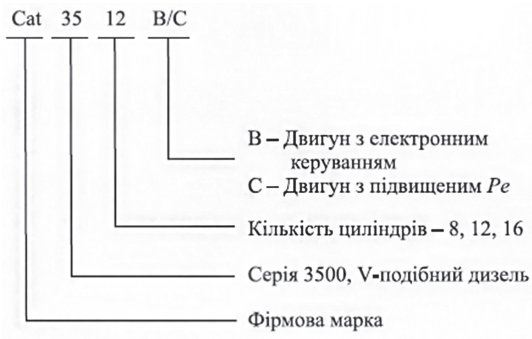
Середньообертові двигуни компанії «Wärtsilä Corporation»



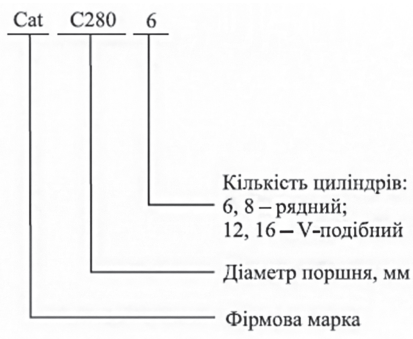
Середньообертові двигуни компанії «Caterpillar Marine Power Systems»



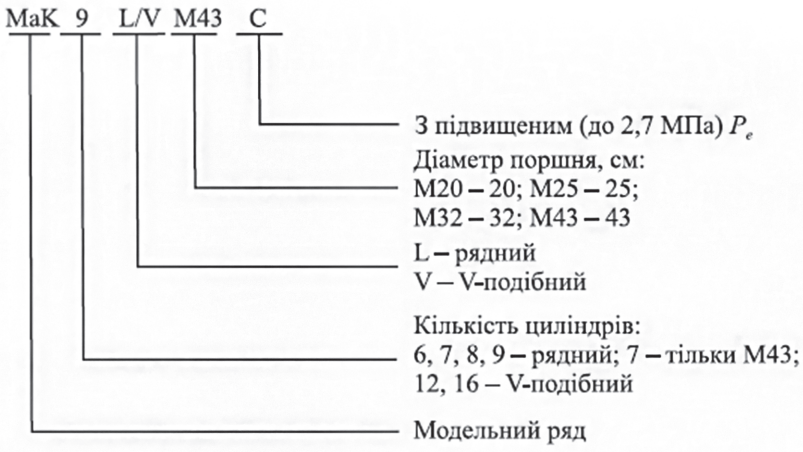
а – з діаметром поршня до 145 мм



б – з діаметром поршня 170 мм



в – з діаметром поршня 280 мм



г – модельний ряд дизельних двигунів MaK

5.3. Принцип дії суднових дизелів. Терміни та визначення

Наведемо загальні визначення, необхідні для пояснення роботи суднових дизелів.

Верхня та нижня мертві точки – це точки, які відповідають верхньому й нижньому крайнім положенням поршня в циліндрі.

Хід поршня – відстань, яку проходить поршень з одного крайнього положення до другого.

Робочий об'єм циліндра – об'єм, описаний поршнем під час його переміщення між мертвими точками.

Робочий цикл – сукупність різних процесів, що відбуваються в циліндрі ДВЗ у певній послідовності. Під час роботи двигуна вони періодично повторюються.

Індикаторна діаграма – діаграма зміни тиску в циліндрі по ходу поршня за цикл. Її отримують під час випробування двигуна за допомогою спеціального приладу – індикатора – або будують за результатами розрахунку робочого циклу. На такій діаграмі ординати відповідають тиску газів у циліндрі *p*, а абсциси – ходу поршня і відповідним об'ємам циліндра. Горизонтальна тонка лінія, нанесена на діаграмі, характеризує тиск p_x у випускному трубопроводі, вертикальними лініями позначені крайні точки положення поршня (ВМТ та НМТ).

Чотиритактні дизелі. Розглянемо схему роботи чотиритактного дизеля [31].

Перший такт – впуск або наповнення. На початку цього такту поршень знаходиться в положенні, близькому до ВМТ. Камера згоряння ще заповнена продуктами згоряння від попереднього процесу з тиском, дещо більшим за атмосферний.

На індикаторній діаграмі (рис. 5.3) початковому положенню поршня *1* відповідає точка *r* [38]. Під час обертання колінчастого вала за стрілкою поршень переміщується до НМТ, а розподільний механізм відкриває впускний клапан *2* і з'єднує надпоршневий простір циліндра двигуна з впускним трубопроводом через впускний патрубок *3*, унаслідок чого циліндр заповнюється повітрям. На індикаторній діаграмі такту впуску відповідає лінія *r-a*.

У впускному трубопроводі тиск близький до атмосферного (у двигунах без наддування) або вищий за нього ($p_к = 0{,}13…0{,}45$ МПа) залежно від ступеня наддування. Наддування підвищує заряд циліндра й потужність двигуна, але при цьому зростають тиски і температури циклу. Впускний клапан відкривається дещо раніше (точка *r*) ВМТ (точка *r'*) (тобто з кутом випередження $\phi_{r-r'} \approx 20…50°$), що створює більш сприятливі умови для входу повітря на початку наповнення. Впускний клапан закривається після НМТ (точка *a*) з кутом запізнення $\phi_{a-a'} \approx 20…50°$.

Другий такт – стиснення. При подальшому ході поршня ВМТ з моменту закриття впускного клапана свіжий заряд повітря стискується, унаслідок чого підвищується його температура до рівня, необхідного для самозапалювання палива. Для найкращого використання теплоти, що виділяється під час згорянні, необхідно, щоб згоряння палива закінчувалося за положення поршня, максимально наближеного до ВМТ. Тому паливо впорскується в циліндр з деяким випередженням до ВМТ (кут $\phi_{п-с} = 1…16°$), що потрібно для підготовки його до самозапалювання на час приходу поршня у ВМТ. Таким чином, на початку другого такту продовжується зарядження циліндра, відбувається стиснення заряду і в кінці починається згоряння палива. На індикаторній діаграмі другому такту відповідає лінія *ac*.

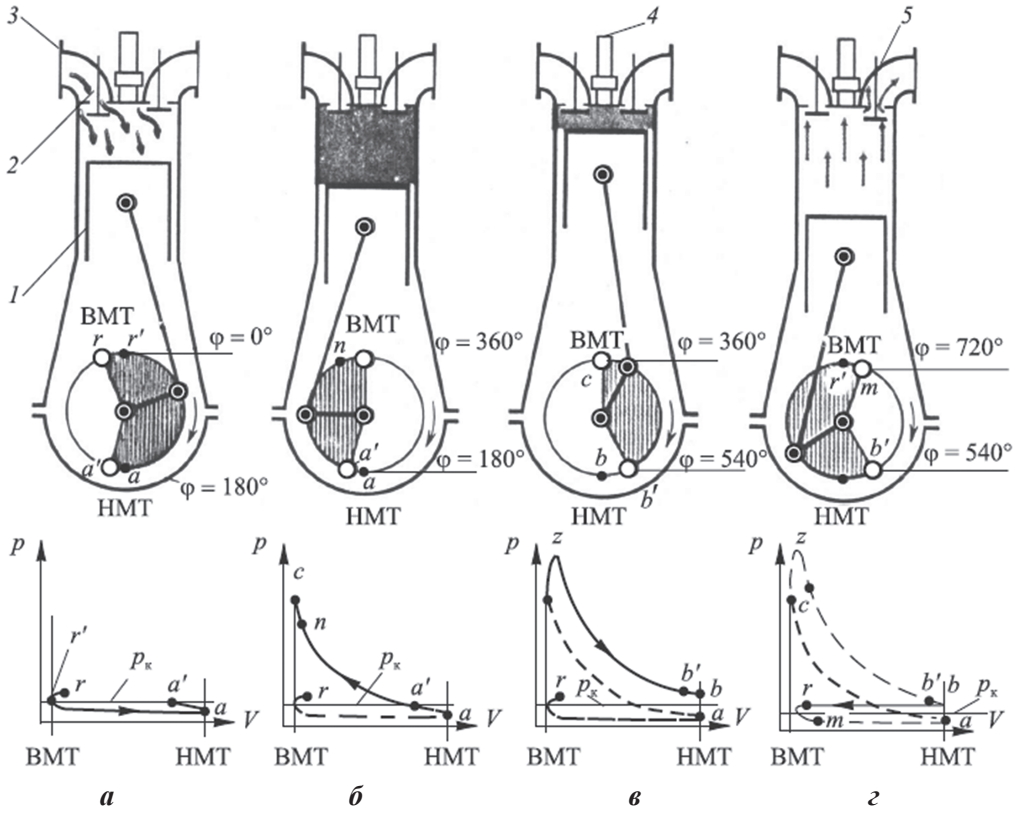


Рис. 5.3. Схема роботи чотиритактного двигуна:
а **–** перший такт – впуск; ***б*** **–** другий такт – стиснення; ***в*** **–** третій такт – згоряння та розширення; ***г*** **–** четвертий такт – випуск

Третій такт – робочий хід (*згоряння та розширення*). Під час руху поршня від ВМТ до НМТ розпилене форсункою *4* паливо, змішане з гарячим повітрям, запалюється і згоряє, що призводить до різкого підвищення тиску газів (точка *z*) і подальшого їх розширення. Саме в цьому такті гази, впливаючи на поршень, здійснюють корисну роботу, яка через кривошипно-шатунний механізм передається споживачу енергії. Закінчується процес розширення на момент початку відкриття випускного клапана *5* (точка *b*), яке відбувається з кутом випередження $\phi_{b-b'} = 20…40°$. Під час розширення гази здійснюють корисну роботу, тому третій такт називають також *робочим ходом*. На індикаторній діаграмі третьому такту відповідає лінія *c-z-b'*.

Четвертий такт – випуск. Тільки такти згоряння і розширення є робочими, інші три такти здійснюються за рахунок кінетичної енергії колінчастого вала з маховиком та роботи інших циліндрів. Чим краще буде очищений циліндр від випускних газів і чим більше надійде до нього свіжого заряду, тим більше можна отримати корисної роботи за цикл.

Під час руху від ВМТ до НМТ поршень виштовхує відпрацьовані гази із циліндра, причому для повного їх видалення випускний клапан закривається після проходу поршнем ВМТ (кут запізнення закриття складає $\phi_{r'-m} \approx 10\ldots60°$ повороту колінчастого вала). У зв'язку із цим протягом часу, що відповідає куту $\phi_{r-m'} \approx 30\ldots110°$ повороту колінчастого вала, у циліндрі одночасно відкриті впускний та випускний клапани. Таке положення клапанів називається «*перекриттям клапанів*». Воно сприяє поліпшенню наповнення внаслідок ежектуючої дії потоку газів у випускному трубопроводі. Це покращує процес очищення камери згоряння від відпрацьованих газів, тому в дизелі з наддуванням у цей період тиск наддувного повітря вище від тиску відпрацьованих газів. Загалом випускний клапан відкритий протягом 210…280° повороту колінчастого вала. На індикаторній діаграмі четвертому такту відповідає лінія *b'-r-m*. Четвертим тактом завершується робочий цикл. При подальшому русі поршня всі процеси циклу повторюються у тій же послідовності.

Корисна робота, отримана під час здійснення циклу, визначається площею *a-c-z-b-a* індикаторної діаграми.

У реальних умовах робота насосних ходів (1-й та 4-й такти, коли двигун виконує функції насоса), яка повинна бути віднята з корисної роботи, що дорівнює різниці робіт у період 3-го та 2-го тактів, достатньо мала, у зв'язку із чим цю роботу умовно відносять до механічних втрат. У дизелях з наддуванням за умови, що тиск наддувного повітря, яке подається в циліндр, вищий за середній тиск газів у циліндрі в період витиснення їх поршнем, робота насосних ходів стає додатною.

На рис. 5.4 наведена розгорнута індикаторна діаграма чотиритактного дизеля без наддування, де p – тиск газів; ϕ – кут повороту колінчастого вала від ВМТ. У другому такті дизель працює як компресор, він витрачає енергію на стиснення повітря, тому його робота в цьому такті буде від'ємною. Також від'ємною буде робота насосних ходів.

Наочною ілюстрацією моментів відкриття і закриття впускних та випускних клапанів є колова діаграма фаз газорозподілу (рис. 5.5), на якій представлені моменти відкриття і закриття клапанів газорозподілу, а також кути, що відповідають окремим фазам.

Розглядаючи схеми роботи дизеля, було встановлено, що фази газорозподілу не збігаються з ВМТ та НМТ поршня. Правильний вибір фаз газорозподілу в значній мірі впливає на потужність та економічність двигуна. Остаточну установку фаз газорозподілу здійснюють під час доводки двигуна на випробному стенді й корегують за отриманими індикаторними діаграмами.

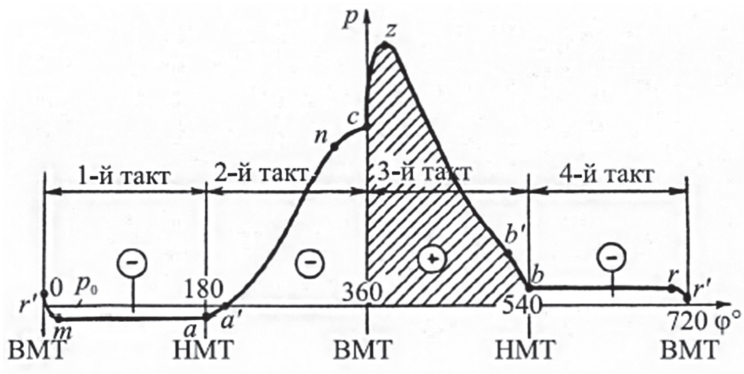


Рис. 5.4. Розгорнута індикаторна діаграма чотиритактного дизеля

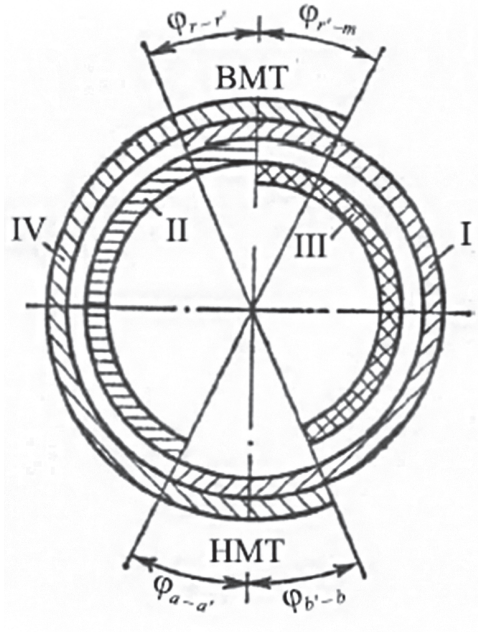


Рис. 5.5. Колова діаграма фаз газорозподілу чотиритактного дизеля:
I, IV – випуск; II – стиснення; III – згоряння і розширення

Двотактні дизелі. Таким чином, чотиритактний двигун тільки половину часу, витраченого на цикл, працює як тепловий двигун (такти стиснення і розширення). У двотактних двигунах, у яких робочий цикл відбувається за два такти, тобто за один оберт колінчастого вала, час, відведений на робочі ходи, використовується більш раціонально. На відміну від чотиритактних двигунів у двотактних очищення робочого циліндра від продуктів згоряння і наповнення його свіжим зарядом (процес газообміну) відбуваються тільки під час руху поршня поблизу НМТ. Очищення

циліндрів від випускних газів відбувається шляхом витиснення їх повітрям, попередньо стисненим у ТНА. У процесі газообміну у двотактних двигунах певна частина повітря неминуче втрачається з циліндра разом з випускними газами через випускні органи [31].

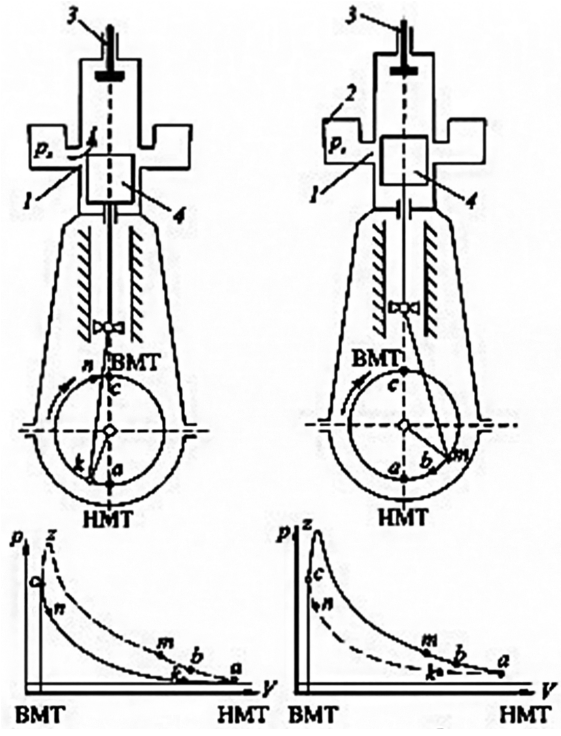
На рис 5.6 наведена схема роботи двотактного двигуна з прямоточною клапанною продувкою. Особливостями будови цього двигуна є наступні:

впускні вікна розташовані у нижній частині циліндра: висота вікон становить 10…20 % від ходу поршня, їх відкриття та закриття здійснюються поршнем під час його руху у циліндрі;

випускний клапан *3* (у сучасних ДВЗ застосовується один випускний клапан) розміщений у кришці циліндра з приводом від розподільного вала, частота обертання якого забезпечує відкриття клапанів один раз за один оборот колінчастого вала;

повітряний компресор (з приводом від газової турбіни, що працює на відхідних газах дизеля) нагнітає повітря під тиском у ресивер для очищення циліндра від продуктів згоряння і наповнення свіжим зарядом.

Робочий цикл у двигуні здійснюється наступним чином:



а ***б***

Рис. 5.6. Схема двотактного двигуна:
а – перший такт; ***б*** – другий такт

перший такт відповідає руху поршня від НМТ до ВМТ. На початку ходу поршня *4* перекриваються продувальні вікна. Кінець продувки циліндра та наповнення свіжим зарядом (точка *k*) визначаються моментом закриття впускних вікон та випускного клапана. Клапан закривається одночасно із закриттям впускних вікон або дещо раніше. Тиск у циліндрі на кінець газообміну вищий від атмосферного й залежить від тиску в ресивері. Після цього розпочинається процес стиснення повітря у циліндрі, який закінчується, коли поршень прийде у ВМТ (точка *c*). Точка *n*, розташована за 10…30° до ВМТ, відповідає моменту початку впорскування палива форсункою (форсунка на схемі не наведена).

Таким чином, протягом першого такту в циліндрі закінчуються випуск, продувка й наповнення циліндра, відбуваються стиснення свіжого заряду і починається впорскування палива.

Другий такт – хід поршня від ВМТ до НМТ. У ділянці ВМТ впорскується паливо, яке запалюється і згоряє. Тиск газів набуває максимального значення (точка *z*), і починається їх розширення, тобто здійснюється робочий хід. Дещо раніше від моменту підходу поршня до впускних вікон відкривається випускний клапан і продукти згоряння починають витікати із циліндра у випускний патрубок, при цьому тиск у циліндрі різко падає (ділянка *m-b* на індикаторній діаграмі). Впускні вікна *1* відкриваються поршнем, коли тиск у циліндрі дорівнює тиску попередньо стисненого повітря p_s у ресивері *2* або дещо вище від нього. Повітря, яке надходить до циліндра через впускні вікна, витісняє через випускний клапан продукти згоряння, що залишилися в циліндрі, та заповнює циліндр, тобто здійснюється газообмін (ділянка *b-a* на індикаторній діаграмі).

Таким чином, протягом другого такту в циліндрі згоряє паливо, розширюються гази, відбуваються випуск відпрацьованих газів, продувка й часткове наповнення циліндра.

Ефективність двотактних двигунів багато в чому залежить від прийнятої схеми газообміну. Поширення у сучасних двотактних ДВЗ набули наступні схеми газообміну: прямоточно-клапанна (розглянута вище), прямоточна з поршнями, що рухаються протилежно, та контурна.

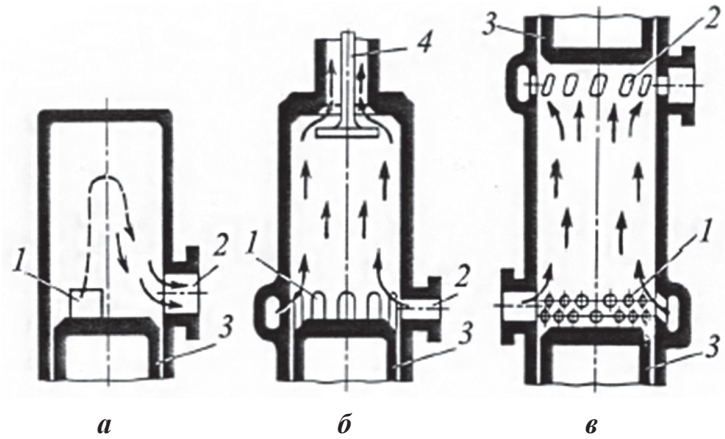
Особливістю *контурних систем* є розташування випускних і продувальних вікон у нижній частині циліндра, тому під час руху продувального повітря з нижньої частини до верхньої продувається один з боків циліндра, а під час зворотного руху – протилежний.

У *прямоточних системах* впускні й випускні органи розташовані по кінцях циліндра, потоки продувального повітря переміщуються тільки в одному напрямі. Це майже у два рази скорочує довжину шляху потоків повітря порівняно з контурними.

За розташуванням вікон у циліндрі контурні системи поділяються на поперечні, у яких випускні вікна розташовані напроти продувальних, і петльові (рис. 5.7,***а***), у яких продувальні й випускні вікна розташовані на одному боці циліндра.

Прямоточно-клапанна продувка (рис. 5.7,***б***) передбачає наявність продувальних вікон, розташованих по всьому колу циліндра, і випускного клапана. Завдяки пошаровому заміщенню відпрацьованих газів продувальним повітрям досягається ефективне очищення циліндра.

У прямоточній системі газообміну з поршнями, що рухаються протилежно, один поршень керує впускними вікнами, другий – випускними, що забезпечує високу якість газообміну (рис. 5.7,***в***).



а ***б*** ***в***

Рис. 5.7. Схеми газообміну двотактних двигунів:
а **–** *1*, *2* – продувальні й випускні вікна відповідно; *3* – поршень;
б **–** *1*, *2* – продувальні вікна; *4* – випускний клапан;
в **–** *1*, *2* – відповідно впускні та випускні вікна

Переважна більшість сучасних суднових МОД передбачає застосування прямоточно-клапанної продувки.

Індикаторна діаграма двотактного двигуна (рис. 5.8) однакова як для дизеля без наддування, так і з наддуванням. Корисна робота циклу тут визначається площею діаграми *a-k-n-c-z-m-b-a*. Розгорнута індикаторна діаграма двотактного двигуна у системі *p*–φ (тиск – кут повороту колінчастого вала) наведена на рис. 5.7. Робота газів у циліндрі є додатною у період другого такту і від'ємна під час першого.

Колова діаграма фаз газорозподілу наведена на рис. 5.8. Як випливає з діаграми відкриття впускних вікон відбувається за 40…65° до НМТ. Випускний клапан відкривається за 70…95° до НМТ, а закривається при куті 55…80° після НМТ.

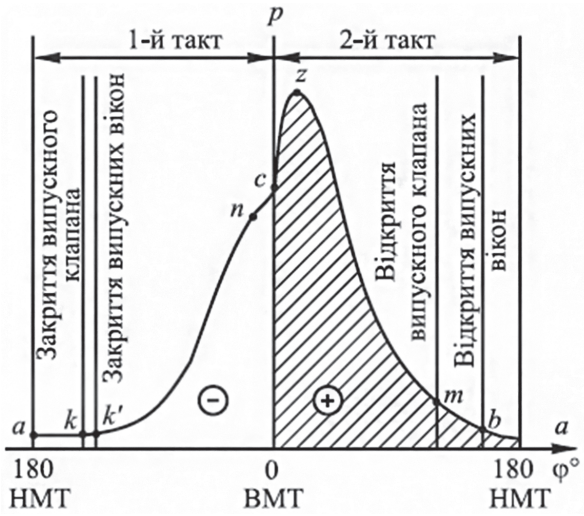


Рис. 5.8. Розгорнута індикаторна діаграма двотактного дизеля

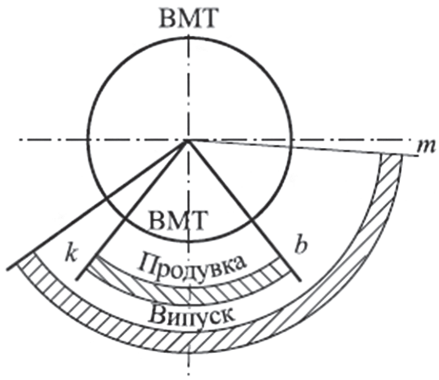


Рис. 5.9. Колова діаграма фаз газорозподілу двотактних дизелів

5.4. Основні конструктивні елементи, агрегати та системи суднових двигунів внутрішнього згоряння

У конструкції суднового ДВЗ (як двотактного, так і чотиритактного) можна виділити такі основні механізми, системи та групи деталей [31, 38]: *корпус або остов двигуна* включає в себе нерухомі деталі, які підтримують рухомі елементи кривошипно-шатунного механізму та сприймають усі зусилля під час роботи двигуна: фундаментна рама, станина, циліндри, кришки циліндрів, а також анкерні зв'язки, шпильки й болти, що стягують ці деталі.

Під час роботи ДВЗ елементи корпусу навантажені силами тиску газів та силами інерції рухомих частин. Унаслідок цього елементи корпусу повинні бути зв'язані між собою у жорстку систему для усунення неприпустимих деформацій.

Форма та конструкція корпусу визначаються загальним компонуванням двигуна і його призначенням, розміри внутрішніх порожнин залежать від розмірів та траєкторії руху деталей кривошипно-шатунного механізму. Зовнішні розміри та форма корпусу визначаються кількістю циліндрів та їх розташуванням, схемою механізму газорозподілу, умовами монтажу й обслуговування.

Поряд з тим, що конструкція корпусу має забезпечити поздовжню та поперечну жорсткість при раціональній силовій схемі й зовнішній сучасній формі, вона повинна бути простою, зручною у виготовленні та мати мінімально можливу масу (за статистикою маса корпусу доходить до 70 % загальної маси МОД і до 30 % – ВОД).

Основою побудови корпусу сучасного двигуна є *силова схема*, яка передбачає механізм передачі основних зусиль окремими елементами двигуна, а також двигуном загалом та його опорами під час роботи.

Наприклад, у загальну силову схему суднових МОД включаються фундаментна рама, картер, блок та силові шпильки – анкерні зв'язки, які об'єднують ці елементи в єдине ціле.

Фундаментна рама є основою корпусу, на якій збирається весь двигун. Окремі фундаментні рами застосовують зазвичай для МОД і СОД, у ВОД їх не використовують.

За конструктивним виконанням розрізняють такі фундаментні рами:

тронкових дизелів з відносно жорсткими картерами та поздовжніми невисокими балками;

крейцкопфних крупних дизелів з високими й жорсткими поздовжніми балками та легкими піддонами.

У фундаментній рамі розташовуються вкладиші корінних (рамових) підшипників, які є опорою колінчастого вала.

До найвідповідальніших елементів корпусу належать *циліндри* – елементи двигуна, у яких відбувається робочий цикл. Циліндр складається з *оболонки* і вставної втулки робочого циліндра. У втулці рухається поршень і відбуваються робочі процеси. Оболонка є опорою для втулки та утворює порожнини охолодження для неї. Внутрішні стінки циліндрової втулки – *дзеркало циліндра* – є напрямними для поршня під час його зворотно-поступального руху.

Під час роботи двигуна втулки знаходяться під впливом високих температур і тиску газів, а також бокових сил тертя, які виникають під час

руху поршня. Таким чином, втулки повинні бути достатньо міцними та жорсткими, щоб протидіяти силам, що на них впливають, а їх внутрішня поверхня – зносостійкою.

Для чотиритактних двигунів втулка виконується у вигляді тонкостінного циліндра зі змінним за висотою перерізом, втулки двотактних двигунів відрізняються наявністю вікон, необхідних для газообміну. Внутрішню поверхню втулок ретельно обробляють, щоб зменшити тертя поршня та кілець. Виконання втулок вставними суттєво спрощує їх виготовлення та заміну під час ремонту.

У суднових ДВЗ зазвичай застосовуються «мокрі» втулки, які омиваються водою з боку позаоболонкового простору.

У чотири- і двотактних суднових дизелях циліндри конструктивно оформлені у вигляді блоків циліндрів, які мають коробчастий вигляд з вертикальними перебірками між окремими циліндрами, а також порожнинами для охолоджуючої води, підведення продувального повітря і відведення випускних газів (тільки для двотактних дизелів).

Внутрішня частина циліндра, обмежена кришкою циліндра та днищем поршня, утворює камеру згоряння.

Під час роботи дизеля кришка піддається впливу значних тисків газу і температур. У більшості суднових ДВЗ кришка має коробчасту конструкцію, форма якої визначається типом двигуна, конструкцією камери згоряння, кількістю робочих клапанів, формою підвідних каналів до них, розташуванням форсунок. Для ДВЗ кришки можуть виконуватися блочними на весь двигун чи для групи у два-три циліндри, кришки МОД та СОД для зручності монтажу завжди виконують індивідуальними.

Кришки сучасних МОД звичайно обладнують одним випускним клапаном, СОД – двома або чотирма. Окрім робочих клапанів, у кришках розміщують форсунку, індикаторний кран (у МОД і СОД), пусковий клапан. Для зниження температури нагрітих частин, кришки охолоджують прісною водою.

Кривошипно-шатунний механізм призначений для перетворення зворотно-поступального руху поршня на обертальний рух колінчастого вала. Під час роботи двигуна на поршень впливає рушійна сила $P_р$, одна зі складових якої Q (проєкції цієї сили T і Z) спрямована по шатуну, інша – нормальна – N перпендикулярна до осі циліндра (рис. 5.10) [38].

Склад елементів кривошипно-шатунного механізму та місто прикладання нормальної сили залежать від конструктивних особливостей тронкового і крейцкопфного двигунів. До складу кривошипно-шатунного механізму тронкових двигунів входять поршень *3*, шатун *2* і колінчастий вал (рис. 5.10,***а***); крейцкопфних – поршень 2, шток *3*, крейцкопф *4*, шатун *5* та колінчастий вал *1* (рис. 5.10,***б***).

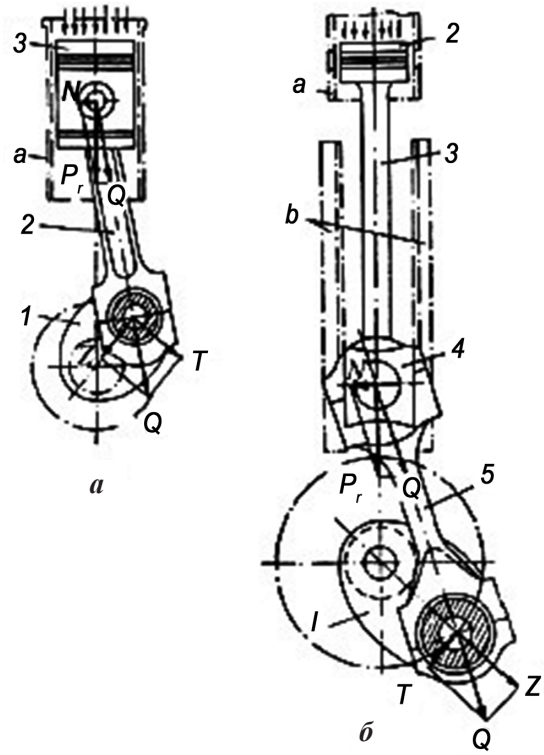


Рис. 5.10. Кривошипно-шатунний механізм тронкового (***а***) та крейцкопфного (***б***) двигунів

Поступальний рух поршня у тронковому двигуні перетворюється на обертальний рух колінчастого вала за допомогою шатуна, з'єднаного шарнірно верхньою головкою з поршневим пальцем і нижньою головкою із шийкою колінчастого вала.

У тронкових двигунах поршень притискується нормальною силою до стінки циліндра ***а***, що підвищує теплове й механічне навантаження пари поршень–циліндр, прискорює знос її поверхонь. У крейцкопфному кривошипно-шатунному механізмі поршень з'єднується із шатуном за допомогою жорстко зв'язаного з поршнем штока і крейцкопфа, які рухаються поступально.

Нормальна сила у крейцкопфних двигунах передається від шатуна через крейцкопф, який складається з поперечки та повзуна, на напрямні паралелі ***b***. Це забезпечує розвантаження циліндра ***а*** від дії нормальної сили. Пара повзун–паралель розташована в зоні низьких температур, що сприяє її доброму змащенню та охолодженню.

Сучасні чотиритактні двигуни виконуються виключно тронковими, двотактні малообертові – крейцкопфними.

На рис. 5.11 [31] наведені найпоширеніші конструктивні схеми кривошипно-шатунних механізмів суднових дизелів. У тронковому двигуні (рис. 5.11,***а***) шатун за допомогою пальця з'єднаний безпосередньо з поршнем. У цьому випадку істотно знижується загальна висота двигуна, але існує можливість потрапляння продуктів окиснення, які видаляються поршневими кільцями з поверхні втулки циліндра в картер двигуна і, як результат, у змащувальне циркуляційне масло двигуна. У крейцкопфному двигуні (рис. 5.11,***б***) наявність крейцкопфа суттєво підвищує висоту та масу двигуна.

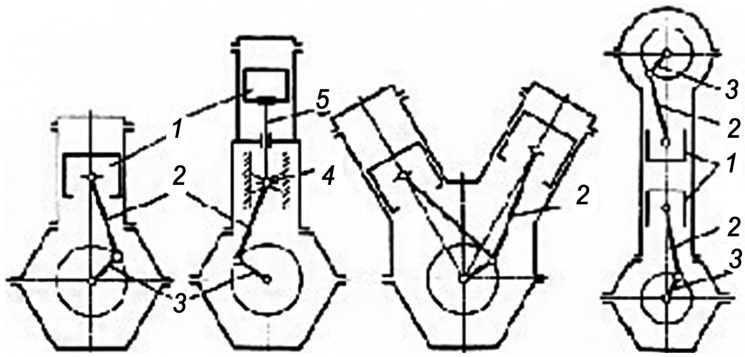


Рис. 5.11. Схеми кривошипно-шатунних механізмів суднових ДВЗ:
1 – поршень; *2* – шатун; *3* – кривошип колінчастого вала; *4* – крейцкопф; *5* – шток

Особливістю кривошипно-шатунного механізму двигуна з V-подібним розташуванням циліндрів є те, що з одним коліном з'єднуються два робочих поршні (рис. 5.12,***в***). Така схема широко застосовується у середньо- та високообертових ДВЗ. У схемі кривошипно-шатунного механізму з поршнями, що рухаються протилежно, і двома колінчастими валами (рис. 5.12,*г*) сумарна потужність від обох колінчастих валів передається споживачу за допомогою шестеренної передачі. Незважаючи на певні позитивні риси цих двигунів, такі, як краща урівноваженість, менша питома маса, гарна продувка, вони не отримали широкого розповсюдження через суттєве ускладнення конструкції.

Поршнева група кривошипно-шатунних механізмів суднових дизелів. До деталей поршневої групи належать поршень, поршневий палець, поршневі кільця, шток поршня (у крейцкопфних двигунах).

Поршень є одним з найбільш відповідальних і напружених елементів двигуна. Він виконує наступні функції:

сприймає силу тиску газів і передає її через шатун на колінчастий вал;

забезпечує потрібну форму камери згоряння і герметичність внутрішньоциліндрового простору;

передає нормальну силу циліндровій втулці (у тронкових двигунах), керує газообміном (у двотактних двигунах, щілинній схемі продування).

Залежно від типу двигуна, будови кривошипно-шатунного механізму поршні виконуються суцільними або складеними, охолоджуваними чи неохолоджуваними.

На рис. 5.12,***а*** [31] наведена конструкція суцільного неохолоджуваного поршня тронкового двигуна, який складається з головки *2*, яка є ущільнювальною частиною, і тронкової (напрямної) частини *4*. Головка утворена днищем *1* і циліндричною стінкою, на боковій поверхні якої у верхній її частині виконані канавки *3* для ущільнювальних кілець, що забезпечують ущільнення циліндра від прориву газів і потрапляння масла з картера в камеру згоряння.

Тронкова частина, яка має назву «*юбки*», забезпечує спрямування руху поршня в циліндрі й передачі нормальної (бокової сили) на остов двигуна. З обох боків усередині «юбки» виконані бобишки *6* з отворами для поршневого пальця. На зовнішній поверхні «юбки» проточують канавки *5* та *7* для маслознімних кілець. Масло, яке зіскоблюється цими кільцями, видаляється до картера через отвори, виконані у поршні.

Для вільного переміщення поршня у циліндрі між стінкою циліндра та «юбкою» передбачений робочий зазор. З урахуванням нерівномірного нагрівання поршня за висотою діаметр головки виконується дещо меншим за діаметр «юбки».

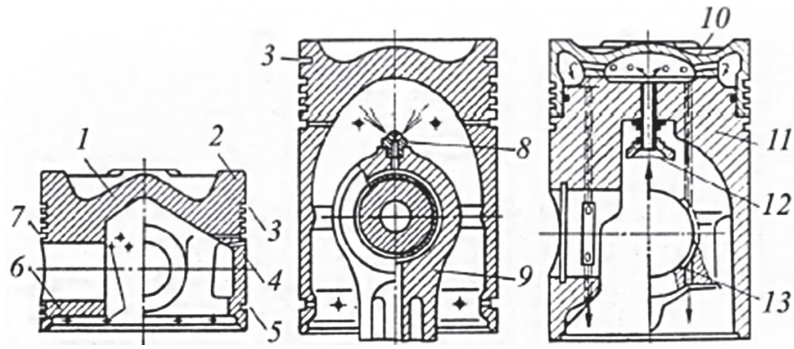


Рис. 5.12. Конструкції поршнів тронкових двигунів

Форма днища поршня, яке сприймає тиск і теплоту гарячих газів, обмежує та формує камеру згоряння, залежить від способу сумішоутворення, розташування камери й типу продувки. Для підвищення

тепловіддачі від днища застосовується примусове охолодження поршня, у тронкових двигунах – маслом.

Приклад охолоджуваного поршня наведений на рис. 5.12,***б***. Тут застосоване струминне охолодження (існує також циркуляційне охолодження та охолодження збовтуванням), за якого внутрішня поверхня головки поршня омивається маслом, що подається з форсунки *8*, розміщеної на шатуні *9*. У поршні безпосередньо під днищем передбачена порожнина. Масло також може підводитися з допомогою шарнірного чи телескопічного механізму.

У потужних суднових ДВЗ застосовують охолоджувані складені поршні (рис. 5.12,***в***) з рознімною головкою *10* з жароміцної сталі і тронком *11* із чавуну або алюмінієвого сплаву, з'єднуваних довгими шпильками. У наведеній конструкції масло у поршень подається через шатун і ущільнювальний «стакан» *12*, а зливається у картер через канали *13*. Це відповідає системі охолодження збовтуванням. Тонкостінне днище сприяє ефективному охолодженню головки поршня, а малі перерізи переходу від днища до стінок утворюють тепловий бар'єр над кільцями. Міцність днища забезпечується кільцевим опорним поясом.

Конструкція поршня крейцкопфного двигуна визначається типом продувки і способом охолодження.

Поршень двигуна з прямоточно-клапанною продувкою складається з головки *6* (рис. 5.12,***а***), яка кріпиться шпильками до верхнього фланця *4*, штока *8* поршня *3* і короткої напрямної частини *5*. Охолоджувана рідина (це може бути і масло, і вода) підводиться до поршня по кільцевому каналу між трубою *2* і штоком *3*, а зливається – по трубі *2*.

У двигунах з контурною продувкою (рис. 5.13,***б***) поршень складається з головки *6* та довгої напрямної частини *7*, яка перекриває вікна. Охолоджуюча рідина подається до поршня і відводиться з нього по телескопічним пристроям *8*.

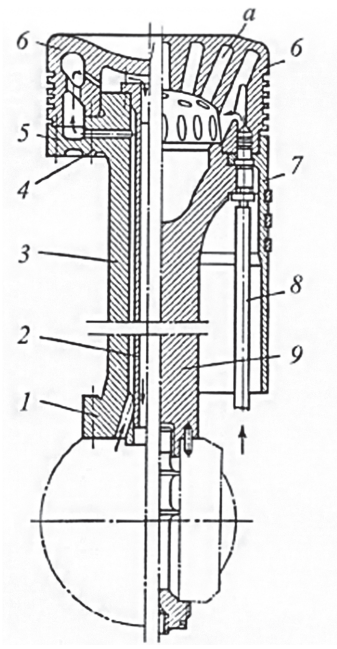
Матеріал для виготовлення поршнів та їх елементів повинен мати високі механічні характеристики, гарну теплопровідність, невисокий коефіцієнт лінійного розширення, бути жаростійким і добре оброблятися. Цим вимогам відповідають чавуни, леговані жаростійкі сталі та алюмінієві сплави.

Шток поршня (тільки у крейцкопфних двигунах) жорстко з'єднує поршень з поперечкою крейцкопфа фланцем *1* і передає через її шатуну зусилля від тиску газів. Він являє собою сталевий стрижень кільцевого *3* (рис. 5.13,***а***) або круглого *9* (рис. 5.13,***б***) перерізу.

Поршневі кільця (рис. 5.14) за призначенням поділяються на *ущільнювальні* (компресійні) та *маслознімні*. Компресійні кільця ущільнюють робочий зазор, попереджаючи прорив газів до картера під час стиснення

і розширення, частково відводять теплоту від поршня. Вони являють собою розрізний пружний елемент прямокутного, конусного або трапецієподібного перерізу. Кільце повинно щільно притискуватися до внутрішньої поверхні циліндра. Для цього кільце виготовляють розрізним, його діаметр у вільному стані дещо більший від діаметра циліндра.

Маслознімні кільця регулюють кількість масла, що надходить до тронка поршня й ущільнювальних кілець, видаляючи залишки його з дзеркала циліндра. На поршні встановлюють 1–3 маслознімні кільця, розташовуючи їх на головці нижче від ущільнювальних кілець у нижній частині тронка. Маслознімні кільця виконують скребкового або коробчастого типів [31]. Матеріалом для виготовлення кілець є сірий чавун з пластинчастим графітом або високоміцний чавун з кулеподібним графітом, леговані хромом, нікелем, молібденом, міддю, ванадієм.



а ***б***

Рис. 5.13. Поршні крейцкопфних двигунів

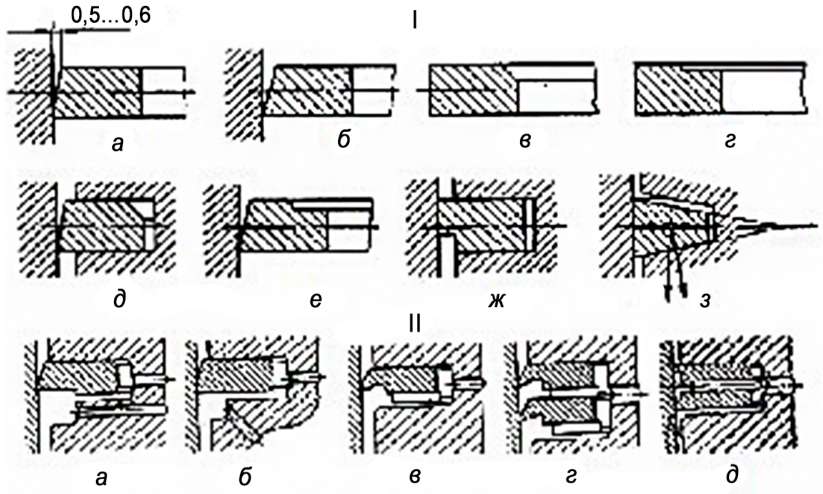
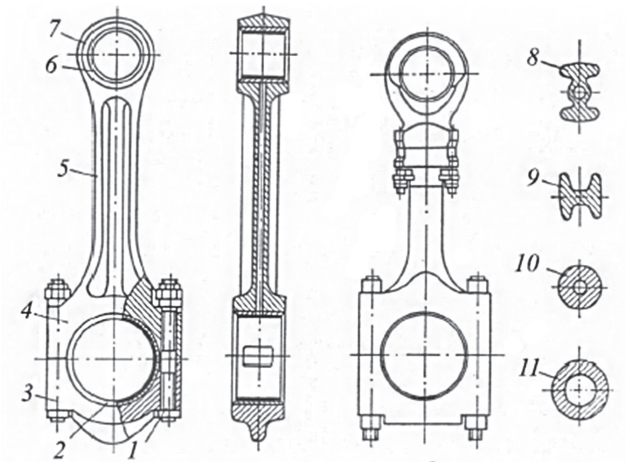


Рис. 5.14. Конструкції поршневих кілець:
I – ущільнювальні; II – маслознімні;
I – ***а***, ***б*** – прямокутні з конусним переднім зрізом; ***в***, ***г*** – з несиметричним перерізом;
д, ***е*** – такі, що під час роботи набувають конусної форми; ***ж*** – зі зменшеною висотою з боку втулки; ***з*** – трапецієподібні;
II – ***а***, ***б*** – зі скосами на поверхні прилягання; ***в*** – з одинарними кромками;
г, ***д*** – з подвійними кромками

Деталі шатунної групи. До їх складу входять шатун, вкладиші верхньої та нижньої головок, кришки шатуна, шатунні болти і гайки.

Призначенням шатуна, який з'єднує поршень або поперечку крейцкопфа з колінчастим валом, є забезпечення переміщення поршня під час здійснення робочих і допоміжних ходів (рис. 5.15). Шатун піддається дії сили від тиску газів, сил інерції мас, що поступально рухаються, і сил інерції, які виникають під час коливання шатуна.

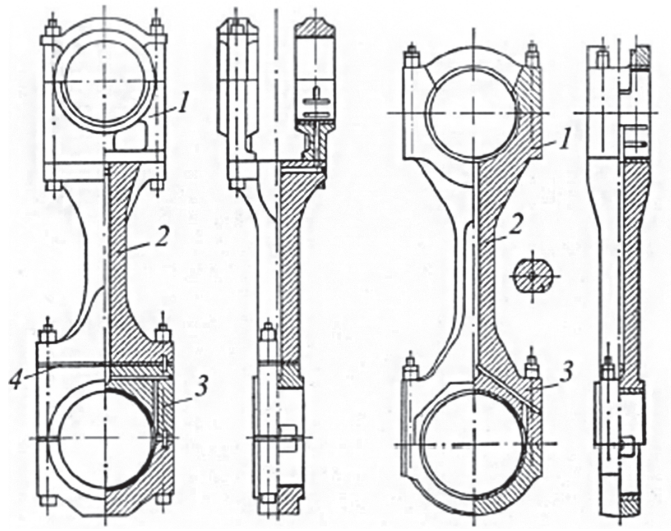


а ***б*** ***в***

Рис. 5.15. Шатуни тронкових двигунів:
а, ***б*** – із суцільним і рознімним стрижнями; ***в*** – перерізи стрижня

Основними елементами шатуна тронкового двигуна (рис. 5.15,***а***) є верхня поршнева головка *7*, нижня (кривошипна) головка *4* та стрижень *5*, який їх з'єднує. Стрижень *5* може мати двотавровий *8*, Н-подібний *9* або круглі *10*, *11* перерізи (рис. 5.15,***в***). У більшості конструкцій у стрижні виконують поздовжній наскрізний отвір, по якому масло надходить на змащення головок шатуна. Верхня головка забезпечує шарнірне з'єднання шатуна з поршнем. У тронкових двигунах вона виконується без рознімання. В отвір верхньої головки (рис. 5.15,***а***) запресовують втулку підшипника *6*, виконану з антифрикційної бронзи. Нижня головка здійснює шарнірне з'єднання шатуна з кривошипною шийкою колінчастого вала та утворює корпус шатунного підшипника. Вона завжди виконується з прямим або косим розрізом. Рознімна кришка *3* нижньої головки *4* кріпиться за допомогою шатунних болтів *1* (рис. 5.15,***а***), шпильок або конічних штифтів. Підшипники кривошипної головки *4* виготовляють у вигляді сталевих тонкостінних вкладишів *2*, робочу поверхню яких заливають шаром бабіту. Виготовляють шатуни з вуглецевих або легованих сталей.

Ковані шатуни крейцкопфних двигунів верхньою головкою *1* (рис. 5.16,***а***) з'єднуються з поперечкою, а нижньою *3* – з кривошипною шийкою колінчастого вала. Верхня й нижня головки завжди виконуються з рознімання і можуть бути рознімними (рис. 5.16,***а***) або кованими разом зі стрижнем *2* шатуна (рис. 5.16,***б***). Стрижень шатуна має круглий переріз із центральним отвором для підведення масла до кривошипного підшипника. Іноді у МОД для зниження маси шатуна застосовують круглий переріз зі зрізами (рис. 5.16,***б***). Прокладка *4* призначена для регулювання довжини стрижня і висоти камери згоряння.



а ***б***

Рис. 5.16. Шатуни крейцкопфних двигунів

Підшипники шатунів виконують по-різному. У шатунах зі знімними головками антифрикційний сплав найчастіше заливають у тіло головки (рис. 5.16,***а***), у конструкціях, де головки виконані разом зі стрижнем, підшипники мають залиті бабітом тонкостінні вкладиші (рис. 5.16,***б***).

Крейцкопф (рис 5.17) складається з поперечки *1* і повзунів («башмаків») *3*. Поперечка з'єднує гайкою *4* поршневий шток *2* і повзуни з вилчастою головкою шатуна через цапфи *5* та передає зусилля від поршня до шатуна. До поперечки на оброблені поверхні кріплять шток, повзун, труби масляної системи.

Повзун сприймає нормальну силу від шатуна й передає її паралелям, забезпечуючи прямолінійні рухи верхньої головки шатуна. Робочі поверхні повзунів заливають бабітом, на них виконують поздовжні та поперечні канавки для розподілу масла по всій площині заливки.

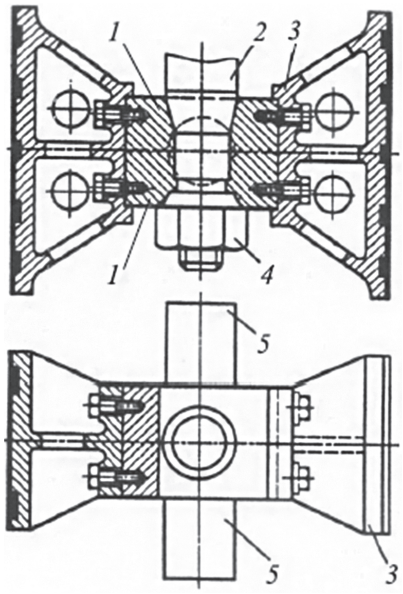


Рис. 5.17. Крейцкопф

Колінчастий вал призначений для сприйняття зусиль від шатунів, перетворення їх на обертальний момент і передачі його споживачу, забезпечення переміщення поршнів у допоміжних ходах, приводу розподільного вала та допоміжних механізмів. Він сприймає зусилля від тиску газів і сил інерції мас, що рухаються поступально та обертаються, а також згинальні й крутні моменти від цих сил. Це призводить до виникнення деформацій у його елементах, концентрації напружень, тертя і зношування його штока й підшипників.

Крутні моменти, що періодично змінюються, викликають крутильні коливання вала, які підвищують напруження у його елементах, що може призводити до утомного руйнування [31]. Основними елементами колінчастого вала (рис. 5.18) є шатунні (мотилеві) *4* і корінні (рамові) *2* шийки, щоки *3*, що їх з'єднують, кормовий та носовий кінці вала. Кормовий кінець вала закінчується фланцем *8* для відбирання потужності до споживача.

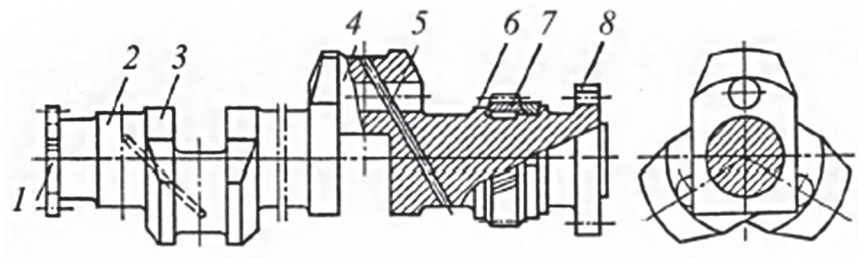


Рис. 5.18. Загальна будова колінчастого вала

На цьому кінці розташовані шестірня *7* або зірочка для приводу розподільного вала та бурт *6* для встановлювального підшипника рами. Шестірня *1*, що закріплена на носовому кінці вала, призначена для приводу навішених допоміжних механізмів. На носовому кінці вала може розташовуватися і маховик, призначений для забезпечення необхідної рівномірності обертання колінчастого вала. У потужних СОД та МОД моменти інерції обертальних мас забезпечують необхідну рівномірність, тому в цих двигунах на носовій частині колінчастого вала замість маховика розташовується зубчасте колесо валоповоротного пристрою.

Шатунні шийки разом зі щоками утворюють коліна (кривошипи), кількість яких дорівнює кількості циліндрів. Корінні шийки з'єднують кривошипи (розгорнуті один відносно одного під кутом $\alpha = (360/i)z$, де i – кількість циліндрів; $z = 1$ – для двотактних і $z = 0{,}5$ – для чотиритактних) в єдину конструкцію. Таке розташування кривошипів забезпечує певну послідовність спалаху в циліндрах, отримання рівномірного крутного моменту та зрівноваженості двигуна.

Масло на рамові шийки подається під тиском із циркуляційної системи двигуна. Від рамових підшипників до шатунних масло надходить по отворам в елементах вала. Іноді в ці отвори вставляють латунні трубки *5*.

Колінчасті вали ВОД і СОД виконують суцільними, МОД – складеними з декількох частин, з'єднаних фланцями. Окремі кривошипи вала виготовляють суцільними, напівскладеними, складеними і зварними.

Щоки, які з'єднують між собою шийки вала, можуть мати різну форму: *прямокутну зі скосами* (рис. 5.18), *круглу*, *овальну*.

Колінчасті вали виготовляють куванням або литтям з вуглецевих або легованих сталей, іноді – з модифікованого чавуну.

Механізм газорозподілу призначений для керування процесами впуску повітря та випуску відпрацьованих газів відповідно до прийнятих фаз газообміну. Найбільшого поширення у суднових ДВЗ набули клапанні системи газорозподілу.

У чотиритактних двигунах застосовується клапанний газорозподіл, за якого впускні й випускні отвори у кришках відкриваються та закриваються відповідними клапанами. Золотниковий розподіл використовується у двотактних двигунах з прямоточно-щілинною продувкою, у яких впускні та випускні вікна перекриваються поршнем, що виконує функцію золотника. Комбінований газорозподіл, який поєднує в собі клапанний та золотниковий пристрої, застосовується у двотактних ДВЗ із прямоточно-клапанною продувкою.

До складу клапанного механізму (рис 5.19) входять: клапани *1* (впускні та випускні), деталі приводу до них (штовхачі *4*, штанги *5*, важелі *6*), розподільний вал *2* з кулачковими шайбами *3*, пружини *8* і тарілки *7*.

Двотактні МОД найчастіше мають один клапан, розташований у центрі, у чотиритактних СОД передбачається два або чотири клапана. Клапани можуть безпосередньо розташовуватися у кришці циліндра (рис. 5.20,***а***) або встановлюватися у змінному корпусі *9* (рис. 5.20,***б***). Клапан складається з тарілки *1*, стрижня *2*, напрямної втулки *3*, клапанної пружини *4* та її тарілки *5*, замка тарілки пружини *7* у вигляді розрізних конічних сухарів, ковпачка *6*, сідла клапана *8*.

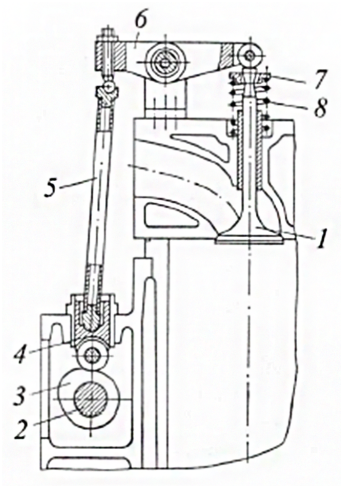
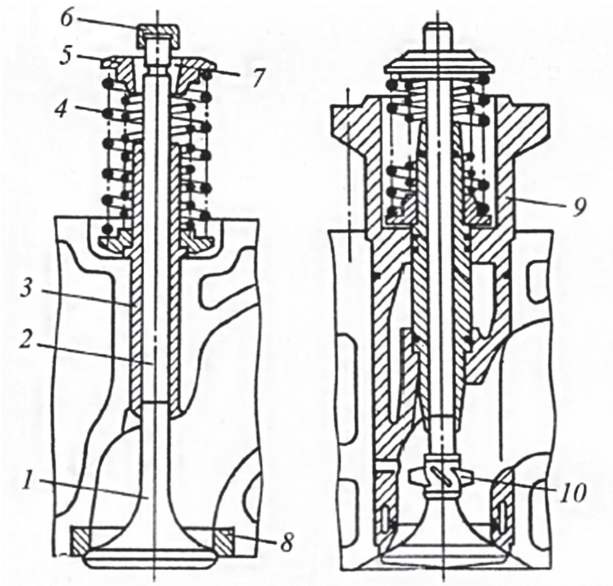


Рис. 5.19. Клапанний механізм газорозподілу



а *б*

Рис. 5.20. Робочі клапани

Для підвищення терміну придатності й вирівнювання температурного поля випускні клапани приводять в обертальний рух за допомогою спеціального механізму або крилатки *10*, яка діє від потоку газу. Випускні клапани, які витримують температуру до 700…800 °С, виготовляють з високоякісних жаростійких сталей.

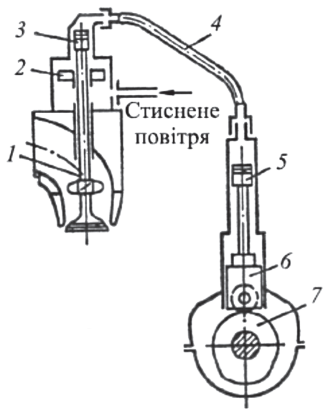


Рис. 5.21. Випускний клапан малообертового двигуна з гідропневматичним приводом

Розподільчий вал керує клапанами. Він складається з власне вала з опорними шийками, кулачкових шайб для приводів клапанів, паливного насоса високого тиску, шестерні, приводу самого вала. Вал розташовується вздовж двигуна у спеціальних порожнинах зовні картера.

У сучасних МОД механічний привід випускного клапана замінений на гідропневматичний (рис. 5.21) [31]. Клапан *1* відкривається під дією тиску масла до 30 МПа, що впливає на поршень *3* сервомотора, який напресований на хвостовик стрижня. Масло подається до сервомотора по трубопроводу *4* поршнем *5*, який приводиться через штовхач *6* кулачковою шайбою *7*.

Для закриття клапана стиснене повітря тиском біля 2 МПа подається на поршень *2*, зв'язаний з клапаном *1*. Застосування гідропневматичного приводу підвищує надійність роботи, зменшує шум, знос, підвищує термін придатності клапана.

Агрегати наддуву дизелів. У сучасних дизелях для забезпечення продувки та наддуву застосовують виключно *турбокомпресорні агрегати*, які складаються з газової турбіни і відцентрового компресора, розташованих на єдиному валу. Енергія, необхідна для стиснення повітря компресором, надходить від газової турбіни. Турбокомпресори можуть бути виконані за різними конструктивними схемами, найбільш поширені наступні (рис. 5.22).

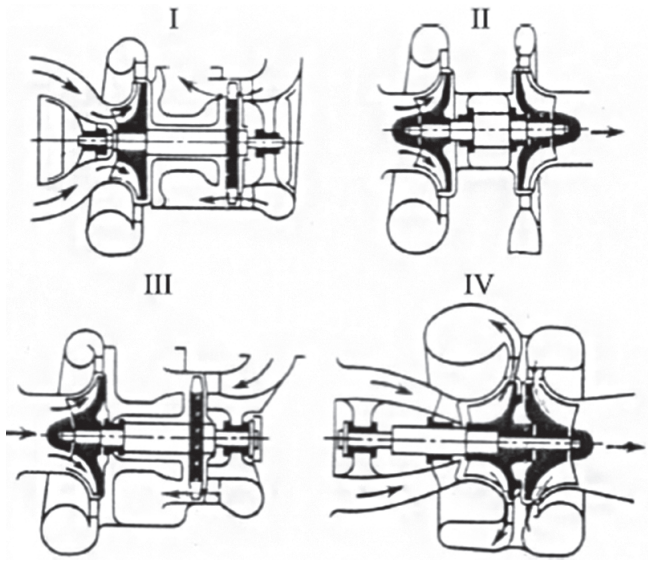


Рис. 5.22. Конструктивні схеми турбокомпресорів суднових ДВЗ:
I – безконсольна схема (відцентровий компресор, осьова турбіна);
II – двоконсольна схема (відцентровий компресор, доцентрова турбіна);
III – одноконсольна схема (відцентровий компресор, осьова турбіна);
IV – схема з моноротором (відцентровий компресор, доцентрова турбіна)

У цих схемах опорами ротора можуть бути як підшипники ковзання, так і підшипники кочення. У сучасних конструкціях турбокомпресорів перевагу надають підшипникам ковзання, які мають більшу довговічність. Найбільшого поширення набули відцентрові компресори (рис. 5.23).

Роботу відцентрового компресора характеризують витрата повітря $G_{пов}$ через компресор, міра підвищення тиску $\pi_к$ і ККД компресора $\eta_к$. У сучасних турбокомпресорах $\pi_к = 1{,}4…4{,}5$; $\eta_к = 0{,}78…0{,}82$.

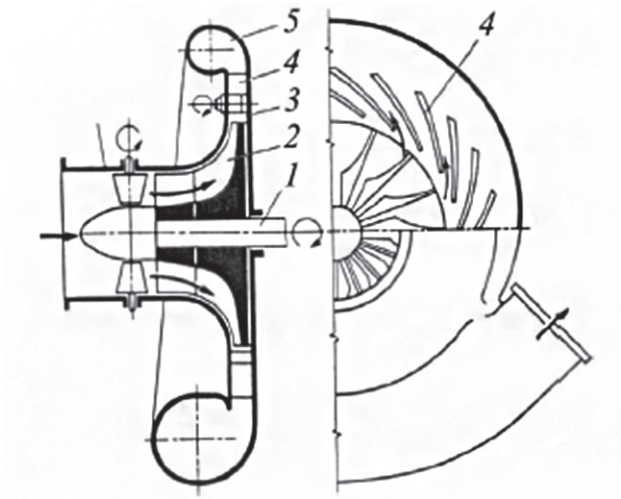
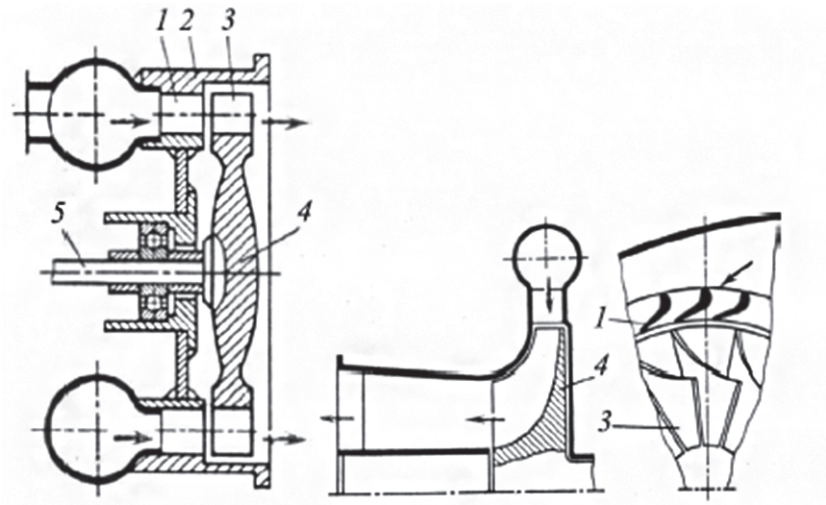


Рис. 5.23. Схема відцентрового компресора:
1 – вал; *2* – робоче колесо; *3* – корпус компресора; *4* – напрямний апарат; *5* – завиток

Газова турбіна турбокомпресора може бути *осьовою* і *радіальною*. З радіальних турбін у турбокомпресорах найчастіше застосовують доцентрові турбіни, у яких газ рухається радіально від периферії до центру і, здійснивши поворот на 90°, виходить з турбіни в осьовому напрямку (рис. 5.24).



а ***б***

Рис. 5.24. Схеми осьової (***а***) та доцентрової (***б***) газових турбін:
1, *3* – соплові й робочі лопатки відповідно; *2*, *5* – відповідно корпус і вал турбіни;
4 – робоче колесо

На рис. 5.25 наведено загальний вигляд турбокомпресора суднового ДВЗ із консольним розташуванням опор.

Підвищення температура повітря в результаті його стиснення у компресорі, знижує масове наповнення циліндрів свіжим зарядом, підвищує теплонапруженість двигуна. Для того щоб уникнути наведених негативних наслідків, у суднових ДВЗ широко використовується охолодження повітря перед підведенням його до циліндра. Це не тільки знижує теплонапруженість двигуна, але й збільшує масове наповнення циліндра.

У суднових ДВЗ застосовуються виключно поверхневі (рекуперативні) охолодники, у яких передача теплоти від повітря в охолоджуюче середовище відбувається через поверхню, що їх розділяє. Ця поверхня утворюється з трубок або пластин різної конфігурації. Охолодники суднових двигунів як охолоджуюче середовище використовують забортну воду. Порівняно з двигунами інших транспортних засобів, до суднових охолодників не висуваються жорсткі вимоги щодо компактності.

Підвищення ефективності процесів охолодження повітря можна досягти, випаровуючи у ньому воду, що розпилюється перед компресором або після нього. На рис. 5.26 наведено компонування агрегатів повітропостачання сучасного МОД і визначені напрямки руху повітря і газів під час продувки циліндра [31].

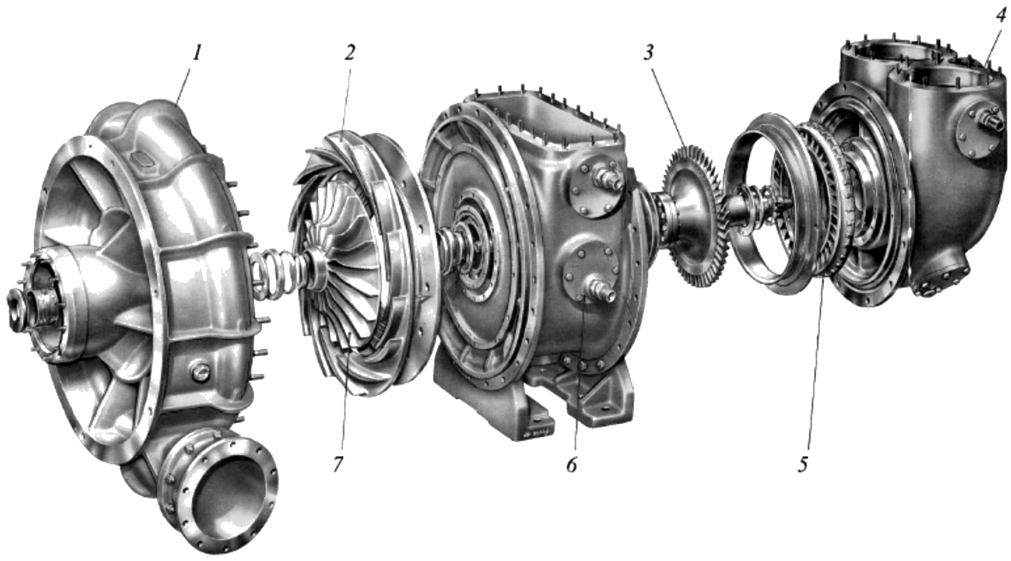


Рис. 5.25. Загальний вигляд турбокомпресора суднового ДВЗ:
1, *2* – відповідно корпус та напрямний апарат компресора; *3*, *7* – робочі колеса відповідно турбіни й компресора; *4*, *5* – корпус і сопловий апарат турбіни відповідно; *6* – підведення масла

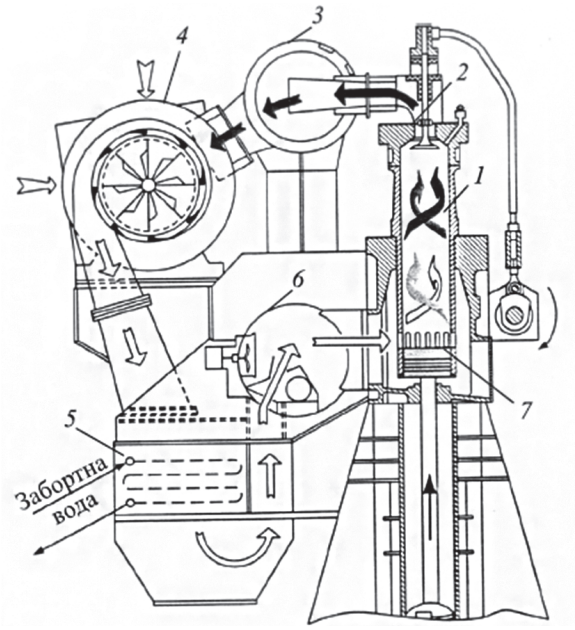


Рис. 5.26. Рух повітря і газів під час продувки циліндра працюючого МОД:
1 – циліндр двигуна; *2* – випускний клапан; *3* – газовипускний колектор;
4 – турбокомпресор; *5* – охолодник наддувного повітря; *6* – повітряний ресивер;
7 – продувочні вікна

Системи, що забезпечують роботу суднового ДВЗ

Паливна система забезпечує зберігання, підготовку й подачу палива у робочі циліндри. Вона складається із систем низького і високого тисків.

Призначенням системи низького тиску є підготовка й подача палива до системи високого тиску. Вона включає в себе цистерни, фільтри, насоси, сепаратори, підігрівачі та паливопроводи.

Важке паливо, на якому працює переважна більшість суднових двигунів, має високу в'язкість і низьку температуру застигання, тому цистерни запасу обладнують паровим підігрівом, а паливопроводи ізолюють. Основним засобом паливопідготовки на морських суднах є *сепарація.*

Система високого тиску забезпечує використання палива в камері згоряння, вона складається з паливного насоса високого тиску, кінцевого підігрівача, що забезпечує потрібну в'язкість палива для якісного розпилу, і форсунок, з'єднаних паливопроводом високого тиску.

Паливна система високого тиску ДВЗ повинна забезпечити:

дозовану циклову подачу палива;

задані фази газорозподілу (тобто подавати паливо у певні моменти робочого циклу і протягом одного й того ж інтервалу кута повороту колінчастого вала);

якісне розпилювання палива (його високий тиск перед розпилювальними отворами) на всіх режимах роботи дизеля з урахуванням малих навантажень і холостого ходу.

Паливні насоси у СОД і МОД виконуються автономними для кожного циліндра. Найбільшого поширення набули насоси золотникового (плунжерного) типу. Плунжер приводиться у рух від кулачкової шайби, розміщеної на розподільному валу двигуна.

Форсунки суднових дизелів мають голку, яка виконує роль клапана. Після закінчення впорскування палива голка форсунки, навантажена згори пружиною, опускається на сідло, тим самим виключаючи підтікання палива у робочий циліндр. Останнім часом отримали розповсюдження форсунки з електронним регулюванням процесу впорскування палива.

Масляна система. Масло подається у ДВЗ до поверхонь тертя для його зменшення, відведення теплоти, що при цьому виділяється, а також для очищення поверхонь тертя від продуктів зносу, нагару та інших сторонніх частинок. Поряд із цим масло використовується як охолоджувальна рідина для відведення теплоти від нагрітих деталей. Змащенню підлягають втулки циліндрів, підшипники колінчастого та розподільного валів, турбокомпресора, насосів, шестерні приводів і передач, штовхачі й напрямні поверхні механізму газорозподілу.

За місцем розміщення масла у системі розрізняють масляні системи із «сухим» та «мокрим» картерами. У першому випадку відпрацьоване масло, яке стікає з вузлів тертя до картера двигуна, не накопичується в ньому, а подається до спеціальної цистерни – стічно-циркуляційної. У системах змащення з «мокрим» картером піддон використовується як ємність для масла. На деяких двигунах частина масла знаходиться у картері, а інша частина – у спеціальній цистерні.

За способом забезпечення напору масляні системи поділяються на *гравітаційні*, у яких масло до нагнітального трубопроводу подається самопливом із цистерни, розташованої вище від точок змащення, і *примусові*, у яких для підведення масла до споживача використовуються насоси. За рухом масла розрізняють *циркуляційні* (*замкнені*), у яких масло здійснює багатократно замкнений цикл, та *лінійні* (*лубрикаторні*), у яких масло підводиться до поверхні змащення один раз і більше в систему не повертається.

Основними елементами масляної системи є масляні насоси, масляні фільтри, охолодники масла, масляні вмістища – баки й цистерни, маслопроводи. Масляні насоси призначені для безперервної або періодичної подачі певної порції масла в нагнітальний маслопровід. Насоси, які

подають масло безперервно, називаються *циркуляційними.* Вони виконуються шестеренними або гвинтовими. На великих суднових двигунах такі насоси мають автономний привід (найчастіше електричний), на інших вони є навішеними (тобто отримують енергію від колінчастого вала двигуна).

Змащення циліндрів великих суднових двигунів забезпечується за допомогою *лубрикаторів* – багатоплунжерних насосів, у яких кожен плунжер забезпечує періодичну подачу невеликих порцій масла до одного отвору на втулці циліндра. Привід лубрикаторів здійснюється від колінчастого вала двигуна. Лубрикатори мають пристрій дозування, який дозволяє змінювати момент і тривалість подачі масла на внутрішню поверхню циліндра. У сучасних двигунах з електронним керуванням дозування масла забезпечують електронні системи.

У процесі роботи дизеля масло, що циркулює у системі, повинно піддаватися безперервному ретельному очищенню від механічних домішок та асфальтово-смолистих речовин. Для цього існують масляні фільтри. Для охолодження масла застосовують теплообмінники поверхневого типу – трубчасті або пластинчасті.

Системи водяного охолодження призначені для охолодження деталей, що нагріваються від згоряння палива або під час тертя, відведення теплоти від масла, води, наддувного повітря.

Охолодженню підлягають наступні деталі двигуна:

кришка циліндра – для зниження температури вогневого днища й температурних напружень до значень, що забезпечують збереження механічних властивостей матеріалу деталей;

втулка циліндра – для зниження температури дзеркала до значень, що забезпечують збереження масляної плівки;

поршень – для зниження температурних напружень і забезпечення працездатності поршневих кілець;

корпус турбіни турбокомпресора – для зменшення підігрівання повітря у компресорі;

випускний колектор – для зниження тепловиділення у МВ судна.

До складу системи охолодження входять насоси, охолодники, розширювальна цистерна, терморегулятори, трубопроводи. Призначенням охолодників є відведення у воду надмірної теплоти від охолоджуваних рідин і наддувного повітря. Розширювальна цистерна компенсує зміну об'єму води у системі в разі зміни її температури. Терморегулятор автоматично підтримує температуру води й охолоджуваних рідин у заданих межах.

5.5. Загальна будова суднових дизелів

3.5.1. Малообертові двигуни

Висока надійність, значний ресурс, простота конструкції та висока екологічність є характерними рисами малообертових двигунів. Саме цим, а також високою агрегатною потужністю до 97 МВт визначається їх переважне застосування в пропульсивних установках морських суден.

Тільки три компанії у світі випускають малообертові ДВЗ: компанія «MAN B&W Diesel Group» (майже 65 % світового випуску), «Wärtsilä Corporation» (близько 25 %), компанія «Mitsubishi Heavy Industries Ltd» (біля 10 %).

Розглянемо загальну будову МОД цих виробників.

Малообертові двигуни типу МС компанії «MAN B&W Diesel Group». Програма виробництва компанією «MAN B&W Diesel Group» двигунів з прямоточно-клапанною продувкою класу МС, яка реалізується із середини 80-х рр., передбачає випуск довгоходових малообертових високоефективних дизелів, здатних успішно експлуатуватися на низькоякісних важких паливах із застосуванням сучасних технологій та матеріалів.

З 1996 р. МС-програма була розширена включенням до неї дизелів S-MC-C, L-MC-C, K-MC-C, де «С» позначає компактний двигун менших розмірів, порівняно з двигунами класу МС. Застосування на суднах таких двигунів, з урахуванням їх компактності, суттєво спрощує їх розміщення в машинному відділенні.

На рис. 5.27 наведені потужнісні та швидкісні параметри двигунів цієї компанії. Двигуни типу МС базуються на однакових конструктивних принципах, що забезпечують простоту й надійність усіх елементів двигуна.

Жорстку фундаментну раму для двигунів з великим діаметром циліндрів зібрано з поздовжніх бічних балок з відлитими сталевими опорами підшипників. Для невеликих двигунів фундаментна рама виробляється литою. Головні підшипники залиті бабітом (сплавом свинцю та олова). Упорні підшипники встановлені в кормовому кінці рами, який має більшу жорсткість.

Станина являє собою єдину зварну конструкцію для двигунів великої потужності й відлиту конструкцію для двигунів менших типорозмірів, що сприяє збільшенню жорсткості двигуна. Станина обладнана з боку вихлопу запобіжним клапаном, а з боку розподільного вала – широкими люками для кожного циліндра з метою полегшення доступу до елементів колінчастого вала. Відлитий сталевий блок циліндрів підвищує жорсткість конструкції двигуна, а анкерні болти з гідравлічною затяжкою об'єднують фундаментну раму, станину і блок циліндрів у жорстку конструкцію.

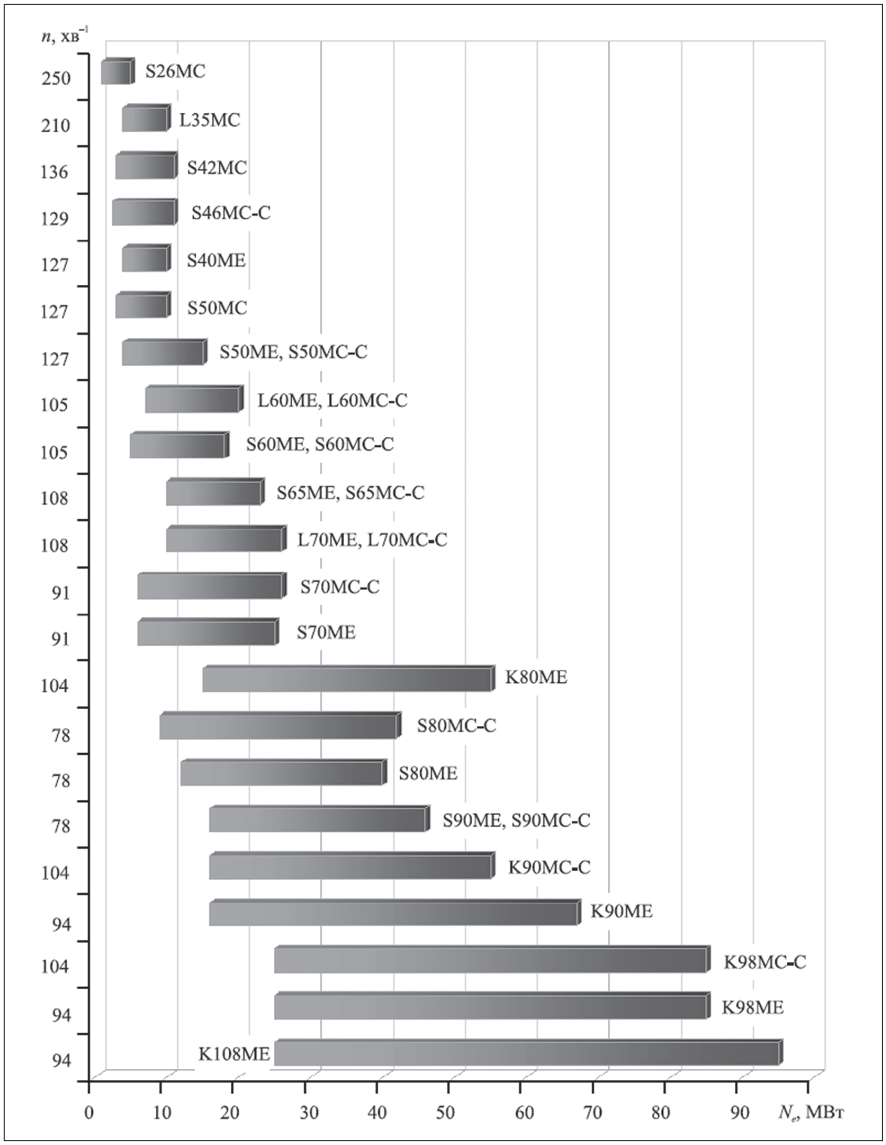


Рис. 5.27. Програма випуску малообертових двигунів компанії «MAN B&W Diesel Group» (станом на 2010 р.)

Колінчастий вал – стандартний, напівскладений, передача на розподільний вал – ланцюгова. Демпфери осьової вібрації розміщені на вільних кінцях колінчастого вала. З метою обмеження висоти двигуна використовуються відносно короткі шатуни.

Робочі втулки циліндрів мають просту симетричну конструкцію, що забезпечує низьке споживання масла і малий знос. Втулки двигунів з великим діаметром поршня мають канальне охолодження. У двигунах

з невеликим діаметром поршня застосовуються втулки без охолоджуючих каналів. Для обох типів втулок відповідний температурний контроль поверхні втулки забезпечує відсутність низькотемпературної корозії і стабільні умови змащення, попереджуючи зростання температури.

Сталеву кришку циліндрів відлито з каналами для проходу охолоджуючої води, центральним каналом для випускного клапана, каналами для паливних форсунок та індикаторного клапана.

Головку поршня, яка охолоджується маслом, виконано з теплостійкої хромо-молібденової сталі. Вона жорстко прикріплюється до штока поршня з метою забезпечення вільної передачі зусиль від тиску гарячих газів. Поршень має чотири канавки для поршневих кілець, які зміцнені хромовим покриттям на верхній і нижній поверхнях канавок, сталеву литу «юбку» (з полосами накатаної бронзи для двигунів з великим діаметром поршня) прикріплено до нижньої частини головки поршня.

Шток поршня піддається поверхневій обробці для мінімізації тертя сальниками штока поршня і забезпечення підвищеного контактного тиску в ущільнюючому кільці. Сальник штока забезпечує ефективне ущільнення між чистим відсіком колінчастого вала і зоною згоряння, що приводить до низького рівня витрати циліндрового масла.

Розподільний вал керує паливним насосом та гідравлічним приводом випускних клапанів. У двигунах серії MC використовується ланцюгова передача для приводу розподільного вала.

Випускні клапани відкриваються гідравлікою за допомогою масла, що надходить з привідного механізму, а зусилля закриття забезпечується «пневматичною пружиною», яка дозволяє штоку клапана вільно обертатися. Закриття клапана амортизується масляною подушкою на вершині штока клапана. Обертальне зусилля забезпечується відпрацьованими газами, які діють на імпелер, що знаходиться на штоку клапана. Для забезпечення тривалої служби випускного клапана його осі виконано зі сплаву з високим вмістом нікелю, а нижні частини – із загартованої сталі (стандартний варіант для двигунів з великим діаметром поршня).

У двигунах з великим діаметром поршня для оптимізації паливної економічності на часткових режимах до паливного насоса входить пристрій для настроювання моменту впорскування. Початок впорскування палива контролюється зміною позиції барабана насоса через зубчасту рейку і сервопривід. Індивідуальне настроювання може бути виконане для кожного циліндра, більш того, допускається спільне настроювання максимального рівня тиску у двигуні для різних палив та різного ступеня зносу. Обидва види настроювання можуть бути здійснені на працюючому двигуні.

У двигунах застосовується закрита паливна система під тиском, максимальна температура підігріву палива дорівнює 150 °C для створення

необхідної в'язкості під час впорскування. Паливні форсунки не охолоджуються. Паливна система зберігає тепло шляхом циркуляції гарячого палива, що дозволяє працювати на важкому паливі на всіх режимах.

Двигуни реверсуються простим і надійним механізмом, який включає в себе кутовий рухомий ролик у приводі паливного насоса кожного із циліндрів. Важіль приводиться в дію стиснутим повітрям, до того ж кожний із циліндрів реверсується індивідуально. Двигун залишається працездатним навіть у випадку, коли один із циліндрів вийде з ладу, при цьому відповідний паливний насос установлюється в нульову позицію.

Уявлення про конструкцію двигунів дає рис. 5.28, на якому наведений загальний вигляд МОД S60MC [98].

Фундаментна рама *1* двигуна складається з високих поздовжніх балок, з'єднаних шляхом зварювання зі зварнолитими поперечними корпусними конструкціями, у яких розміщені рамові (розташовані у рамі) опорні підшипники. Станина *2* – зварна, блок циліндровий *6* – чавунний. Фундаментна рама, станина і циліндровий блок стягнуті між собою анкерними зв'язками *3*. Втулка циліндра *6* спирається на блок циліндрів *7*, причому її верхня частина виведена з блока й охолоджується тонкою оболонкою, яка утворює порожнину охолодження. Штуцери для підведення циліндрового масла розташовані у верхній частині втулки. Кришка циліндра *9* кована зі свердленнями для охолоджуючої води. У кришці ж розташовуються один центральний випускний клапан, за допомогою якого здійснюється випуск газів із циліндра, дві форсунки, розташовані по боках випускного клапана, та запобіжні клапани. Випускний клапан *11* має гідропневматичний привід. Відкривається клапан гідравлічно маслом. У конструкції двигуна S60MC-C застосована кришка циліндра ковпакового типу, тому при знаходженні поршня у ВМТ головка поршня розташовується вище від площини ущільнення кришки та втулки циліндра. Поршень *12*, виготовлений з жаростійкої хромомолібденової сталі, охолоджується маслом, яке підводиться за допомогою *телескопічного* пристрою до штока поршня *13* у ділянці крейцкопфного з'єднання *15*. Шатун *16* має порівняно короткий стрижень. Колінчастий вал *17* виконано зварним, причому зварювання здійснюється всередині рамових шийок. Упорний вал виконаний спільним з колінчастим валом. Розподільний вал *14* обертається від колінчастого вала ланцюговою передачею, він приводить у дію випускний клапан, плунжерні насоси високого тиску й поршні гідравлічних приводів випускних клапанів. Випускні гази з газового колектора *10* надходять до газотурбонагнітача (ГТН) *8*. Циліндри продуваються повітрям з ресивера *5*, у який воно нагнітається ГТН через охолодник *4*.

Додаткове уявлення про будову МОД надасть загальний тривимірний вигляд двигуна S60MC-C [98] (рис. 5.29).

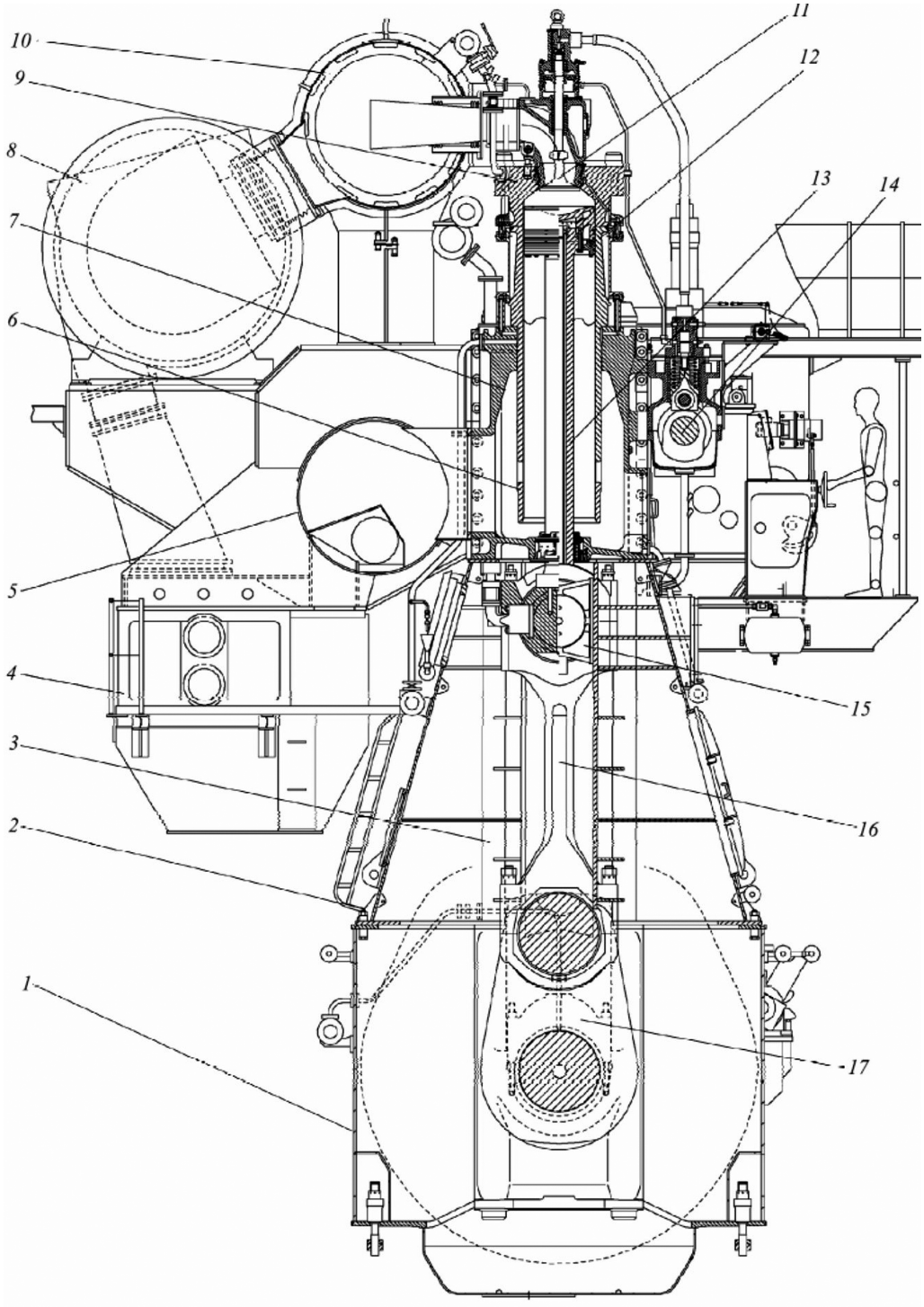


Рис. 5.28. Малообертовий двигун S60MC

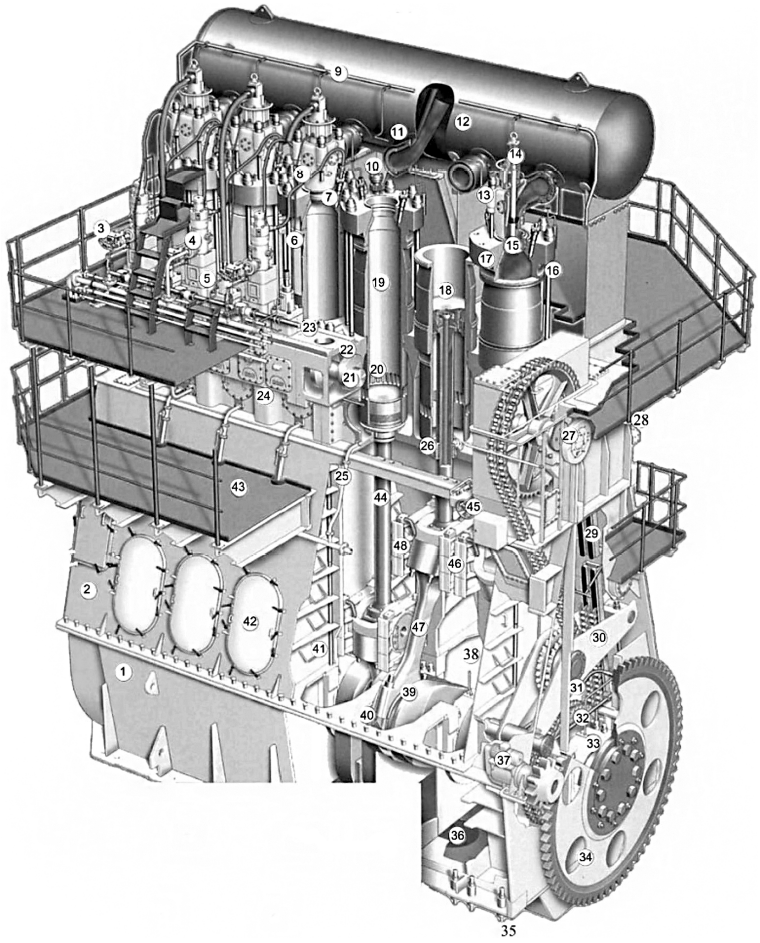


Рис. 5.29. Загальна будова малообертового двигуна S60MC-C (з боку протилежного розташуванню ТНА й охолодника повітря):
1 – фундаментна рама; *2* – картер; *3* – регулятор паливного насоса; *4*, *8* – відповідно паливні насос і трубки високого тиску; *5*, *13*, *15* – гідравлічний привід, корпус і шток випускного клапана; *6* – оболонка охолодження; *7* – форсунка; *9* – відведення охолоджуючої води; *10*, *27* – клапан та розподільник пускового повітря; *11* – компенсатор теплових розширень; *12* – газовипускний колектор; *14* – пневматичний демпфер; *16* – шпильки кришки циліндра; *17*, *33*, *40* – кришки відповідно циліндра, рамового й мотильового підшипників; *18* – поршень; *19* – циліндрова втулка; *20* – продувальні вікна; *21*, *39* – кулачковий і колінчастий вал; *22* – кулачок газорозподілу; *23* – привід рейок паливних насосів; *24* – блок циліндрів; *25* – дренажна труба з повітряного простору; *26* – сальник штока клапанів; *28* – повітряний ресивер; *29*, *30* – заспокоювач та натягувач ланцюга; *31*, *34* – шестерні колінчастого вала й валоповоротного пристрою; *32* – упорний підшипник; *35* – болти кріплення двигуна; *36* – злив масла у піддон; *37* – валоповоротний пристрій; *38* – підведення масла до рамових підшипників; *39* – колінчастий вал; *41* – анкерні болти; *42* – люки картера; *43* – платформа; *44* – шток поршня; *45* – контрольний блок системи керування; *46* – башмак крейцкопфа; *47* – шатун; *48* – крейцкопф

Малообертові двигуни типу ME компанії «*MAN B&W Diesel Group*». На початку XXI ст. подальше вдосконалення двигунів серії MC компанії «MAN B&W Diesel Group» стримувалося можливостями застосовуваною компанією системи газообміну й подачі палива.

Ще під час створення перших поршневих двигунів для регулювання фаз паливоподачі й газообміну був використаний розподільний вал з кулачковими шайбами, який приводився в обертання від вала двигуна. У подальшому його конструкція неодноразово підлягала модернізації, але кулачок з наперед визначеним профілем, зафіксований на валу, залишився певною перешкодою на шляху вдосконалення двигунів.

Швидкий розвиток електроніки за останнє десятиріччя дозволив спочатку у двигунах малої потужності, а потім у суднових СОД і МОД застосувати мікропроцесорну техніку, призначенням якої спочатку були контроль за роботою і дистанційне керування двигуном, а потім й керування процесами паливоподачі, газорозподілу, змащення циліндрів.

Перші двигуни з електронним керуванням робочим процесом випустила компанія «Caterpillar», перші суднові двигуни з електронним керуванням були введені в експлуатацію компанією «Sulzer» у 2001 р., компанією «MAN B&W» у 2003 р.

Двигун з електронним керуванням типу ME компанією «MAN B&W» був створений на основі моделі MC. У конструкції цього двигуна було вилучено розподільний вал з його приводом, введено електронне керування процесом паливоподачі, регулюванням частоти обертання, процесами пуску і реверсування, вихлопним клапаном та змащенням циліндрів.

Керування впорскуванням палива та вихлопними клапанами здійснюється гідравлічними сервоприводами. Для цього масло із циркуляційної системи змащення пропускається через самоочисний десятимікронний ФТО і насосами з приводом від двигуна або електроприводом (під час пуску) стискується до 20 МПа (рис. 5.30).

Стиснуте масло подається до акумуляторів, з них воно через керовані клапани надходить до гідропідсилювачів тиску впорскування палива й насосів гідроприводу вихлопних клапанів.

Електронно-керовані клапани ELF (впорскування палива) і ELVA (відкриття вихлопних клапанів) відкриваються під дією сигналу, який надходить від електронних блоків (CCU), установлених на циліндрі. Гідропідсилювачі тиску впорскування палива являють собою поршневі сервомотори, у яких поршень більшого діаметра піддається тиску масла у 20 МПа, а плунжер з меншим у 5 разів діаметром, який є продовженням цього поршня, під час руху догори стискує паливо до 100 МПа. Момент подачі масла під поршень сервомотора гідропідсилювача визначається подачею керуючого імпульсу від блока CCU [32].

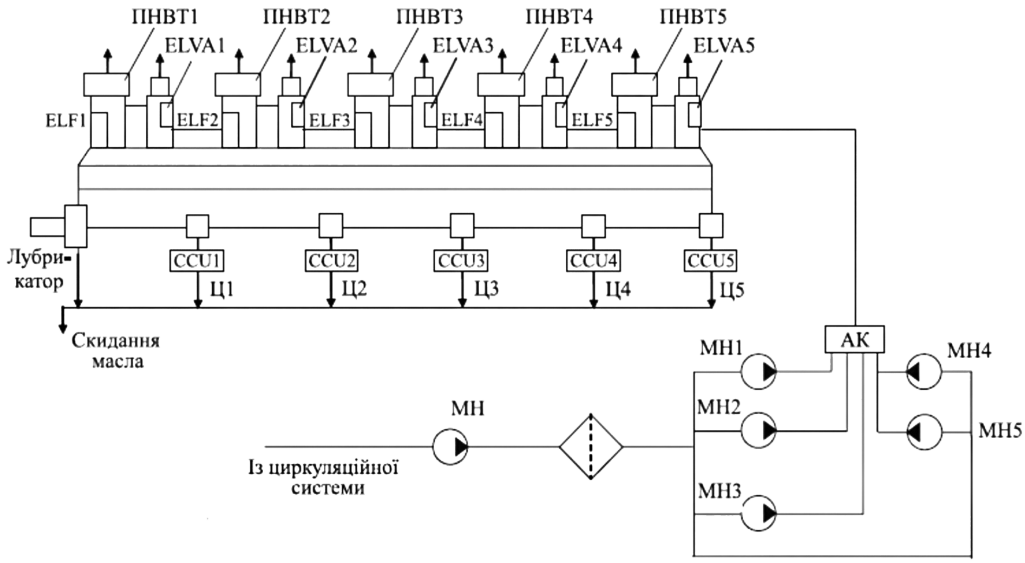


Рис. 5.30. Схема гідросистеми керування впорскуванням палива й вихлопними клапанами:
МН – циркуляційний масляний насос з електроприводом; МН1, МН2, МН3 – масляні насоси з електричними приводами; МН4, МН5 – масляні насоси з приводом від ГД; АК – акумулятор масла; CCU1…CCU5 – електронні блоки; ELF1…ELF5 – електронно-керовані клапани паливних насосів; ELVA1…ELVA5 – електронно-керовані клапани керування газовипуском; ПНВТ1…ПНВТ5 – паливні насоси високого тиску; Ц1…Ц5 – циліндри двигуна

Корисна інформація! Система впорскування й електронне керування дозволяють не тільки стабілізувати фази подачі палива, але й, у разі потреби, забезпечити більш високі тиски впорскування та змінювати закон подач.

Програма CCU дозволяє змінювати фази відкриття і закриття вихлопних клапанів залежно від режимів роботи двигуна. Це забезпечує більш економічну сталу роботу на малих навантаженнях.

Класична конструкція МОД передбачає використання для змащення циліндрових втулок багатоплунжерних насосів-лубрикаторів з механічним приводом від розподільного вала. Від кожного плунжерного елемента масло по трубках спрямовується до масляних штуцерів, розташованих в отворах у втулках циліндрів, через які воно надходить на змащення. Для забезпечення ефективного змащення необхідно, щоб масло надходило на дзеркало циліндра у простір між першим і другим поршневими кільцями, коли вони знаходяться у площині розташування змащувального отвору.

Електронна система керування забезпечує синхронізацію нагнітального ходу плунжера лубрикатора з рухом поршня робочого циліндра шляхом подачі в необхідний момент електричного сигналу на соленоїдний

клапан лубрикатора від керованого електронного блока CCU. Соленоїдний клапан відкриває доступ сервомаслу до поршня сервомотора, який переміщує плунжери лубрикатора. На малих навантаженнях змінюється частота подачі масла: одна подача через кожні 4, 5, 6 обертів колінчастого вала. Завдяки електронній системі протяжність подачі масла лубрикатором складає 25 мс, що за частоти обертання 100 $хв^{-1}$ відповідає 0,25° повороту колінчастого вала. Економія у витраті циліндрового масла у двигунах типу ME становить більше 0,3 г/(кВт · год).

На рис. 5.31 наведено порівняльну будову МОД S60MC та S60ME.

Підсумуємо зміни, які відбулися у двигунах серії ME з електронним керуванням порівняно з двигунами серії MC [32].

З конструкції вилучені наступні елементи:

ланцюговий привід розподільного вала;

розподільний вал з кулачками приводу ПНВТ і вихлопного клапана;

раніше застосовані ПНВТ та привід вихлопного клапана;

електронний регулятор з підсилювачем і валиком керування подачею ПНВТ;

механічно-привідні лубрикатори.

Замість цього встановлені:

гідравлічна система масла високого тиску з насосами, що приводяться від двигуна або електродвигунів;

електронна система керування з датчиками положення вала;

ПНВТ і вихлопні клапани з гідравлічно керованим приводом;

убудовані в систему електронного керування функції регулятора частоти обертання і пуску привідних повітродувок;

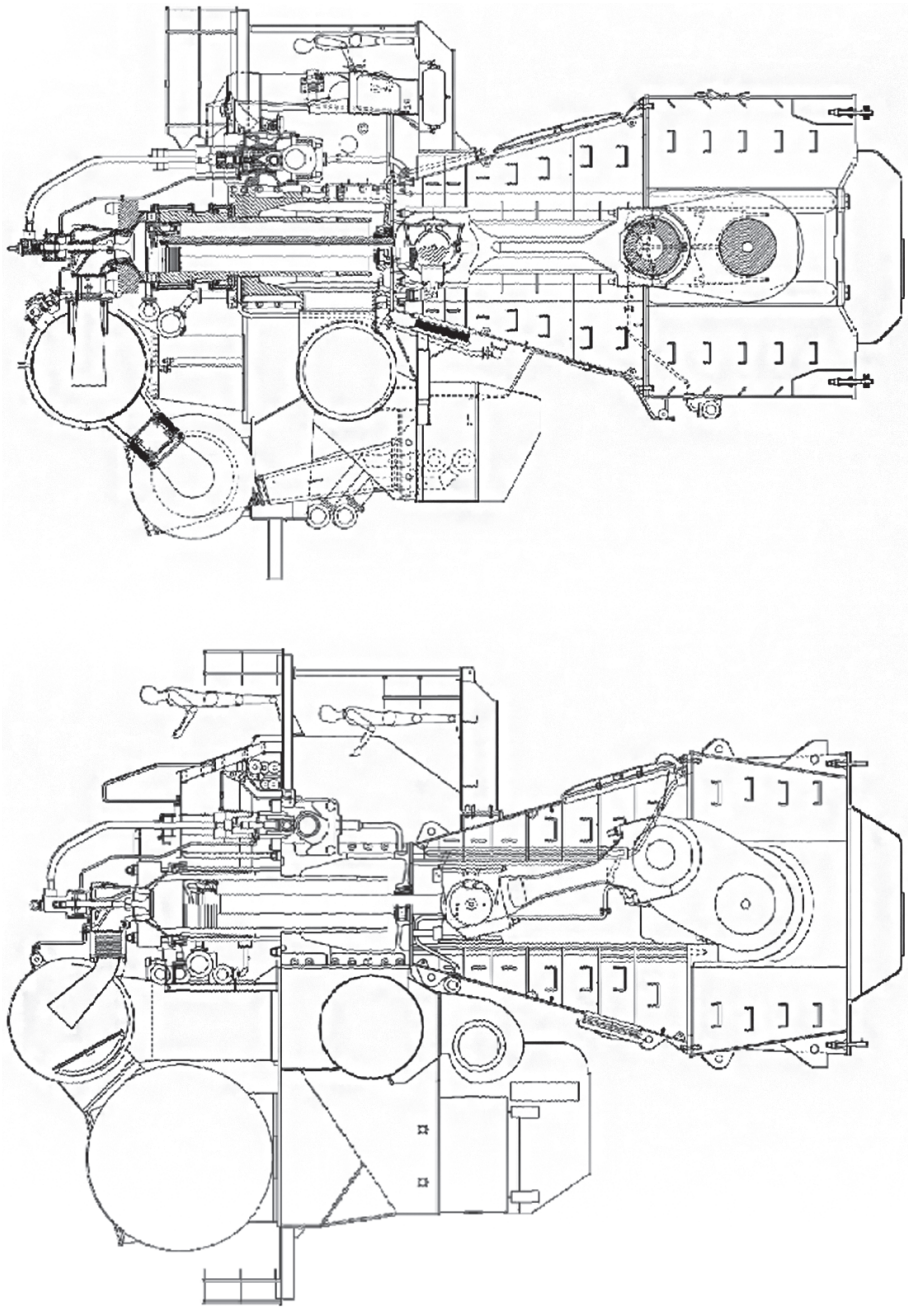
лубрикатори з електронним керуванням.

Малообертові двигуни типу RTA компанії «Wärtsilä Corporation». З 1981 р. фірма «Sulzer» розпочала виробництво повного модельного ряду двигунів RTA з прямоточно-клапанною системою газообміну (рис. 5.33).

Розглянемо основні конструктивні особливості двигунів RTA [32].

Остов двигуна складається з наступних елементів: чавунної литої фундаментної рами; зварних колон, з'єднаних між собою болтами; індивідуальних литих чавунних оболонок циліндрів, зв'язаних болтами у жорсткий спільний блок. Анкерні зв'язки забезпечують сприйняття розтяжних зусиль. Упорний підшипник сегментного типу вбудований у фундаментну раму.

Колінчастий вал напівскладений, включає в себе елементи, кожний з яких складається з мотильових шийок і двох щік, у які запресовують рамові шийки. Вкладиші рамових підшипників залиті бабітом. Їх змащення відбувається під тиском, що забезпечує роботу підшипників в умовах гідростатичного тертя, яке повністю виключає дотик шийки і металу підшипника.



б

а

Рис. 5.31. Конструктивне виконання двигунів типу МС та МЕ:
а – двигун S60MC; ***б*** – двигун S60ME

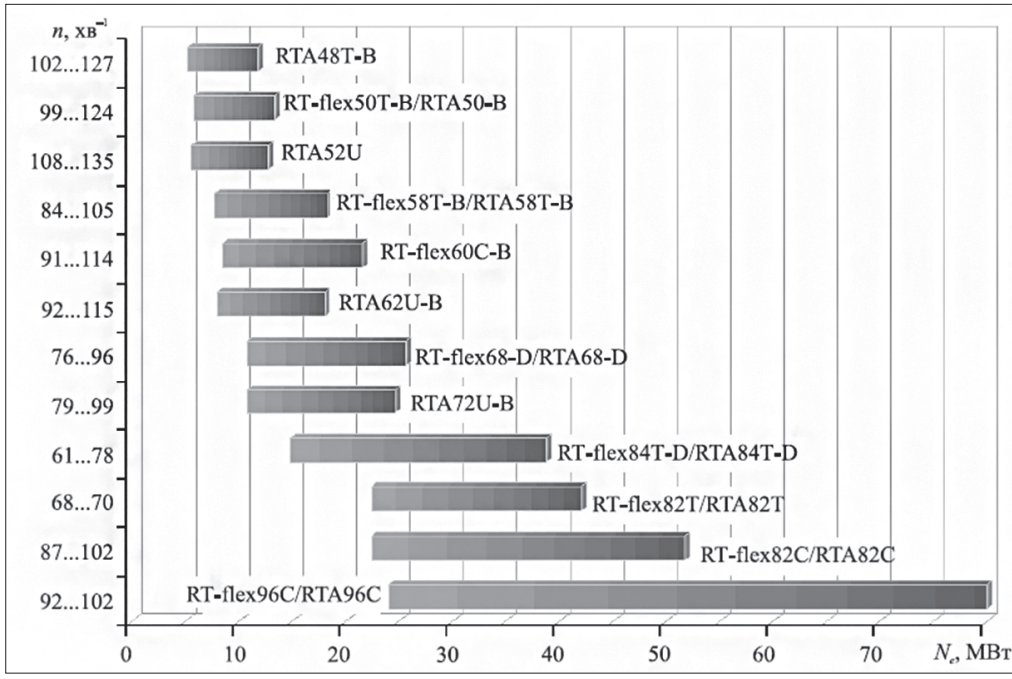


Рис. 5.32. Програма випуску суднових МОД компанії «Wärtsilä Corporation» (станом на 2010 р.)

Сталева суцільно кована кришка кріпиться до блока циліндрів вісьмома шпильками. У центрі кришки розташовується в окремому корпусі вихлопний клапан, який виготовляють із жаростійкого сплаву Nimonic8DA з високими антикорозійними властивостями.

Установлений на штоку клапана імпелер під впливом потоків газу, які його обтікають, обертає клапан, що забезпечує рівномірність розподілу температур по його поверхні. Відкриття клапана здійснюється гідравлічним пристроєм, який приводиться в дію кулачком, розташованим на розподільному валу. Для повернення клапана в закрите положення використовується пневматична пружина, яка забезпечує м'яку посадку клапана на сідло.

Зважаючи на те, що ефективність роботи МОД значною мірою визначається станом робочої поверхні поршня та його впливом на знос поршневих кілець і втулок циліндра, компанією розроблено і втілено в конструкцію двигуна цілий комплекс трибологічних заходів:

дворівневе підведення масла на дзеркало циліндра;

теплова ізоляція втулок у середині ходу поршня;

попереднє профілювання поршневих кілець;

хромокерамічне покриття верхніх кілець;

глибоке хонінгування (спосіб обробки циліндричної поверхні) робочої поверхні втулок.

Особливо важливим є підтримання температури робочої поверхні втулки циліндра на рівні, вищому за температуру конденсації водяних парів, інакше неминучою буде сірчиста корозія, яка призводить до інтенсивних зносів. Застосована ізоляція втулки в середній її частині дозволяє підвищувати температуру до рівня, що виключає конденсацію. Боротьба з конденсацією води в циліндрах не викликає необхідності відділення води з наддувного повітря після охолодника повітря. Для цього за ним розташовується сепаратор води.

Дворівнева система змащення циліндрів надає можливість створювати необхідну товщину масляної плівки та її оновлення на всій довжині ходу поршня.

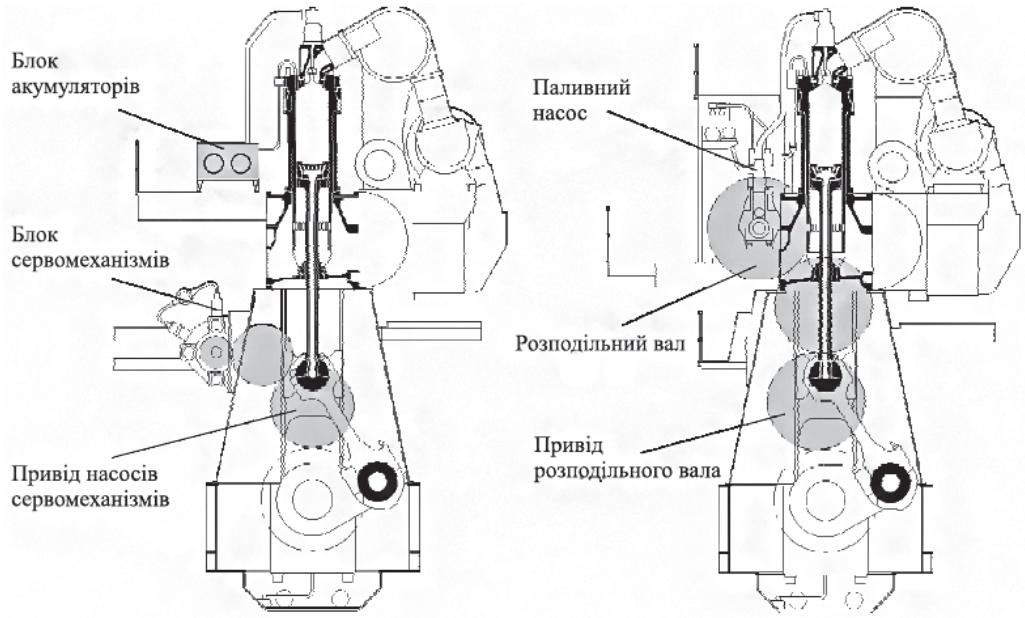
Головки поршнів двигунів RTA48 та 50 охолоджуються маслом, що подається до штока поршня, а з нього у встановлені в головку сопла, через які струмені масла спрямовуються у свердлення в голівці. Зливається масло через встановлену у шток трубу. У двигунах більших розмірів охолодження відбувається водою, що забезпечує більш ефективний теплообмін. Підводиться вода до крейцкопфного вузла і відводиться від нього по телескопічних трубах.

Малообертові двигуни типу RT-flex компанії «Wärtsilä Corporation». Перші двигуни з електронним керуванням робочим процесом були введені в експлуатацію фірмою «Sulzer» у 2001 р.

У двигунах з електронним керуванням модифікації RT-flex замість розподільних валів з їх приводом, традиційних ПНВТ і гідроприводів вихлопних клапанів (рис. 5.33) застосована акумуляторна система впорскування палива й керування вихлопними клапанами.

Це суттєво спростило його конструкцію. Привід гідронасосів сервомеханізмів розташований безпосередньо поруч із колінчастим валом. На рівні кришок циліндрів знаходяться акумулятори тиску масла й палива, сервоприводи ПНВТ і вихлопних клапанів [98]. Застосування електронного керування двигуном дозволило скоротити кількість шкідливих викидів з вихлопними газами, знизити питому витрату палива, а також підвищити гнучкість у керуванні законом подачі палива на всьому діапазоні робочих режимів.

Однією з основних особливостей таких двигунів стала акумуляторна система паливоподачі, яка складається з ПНВТ, що забезпечує тиск у 100 МПа, акумулятора палива й електронно-керованих клапанів, які розподіляють паливо по форсунках (рис. 5.34).



а *б*

Рис. 5.33. Порівняння двигунів RT-flex (*а*) і RTA (*б*)

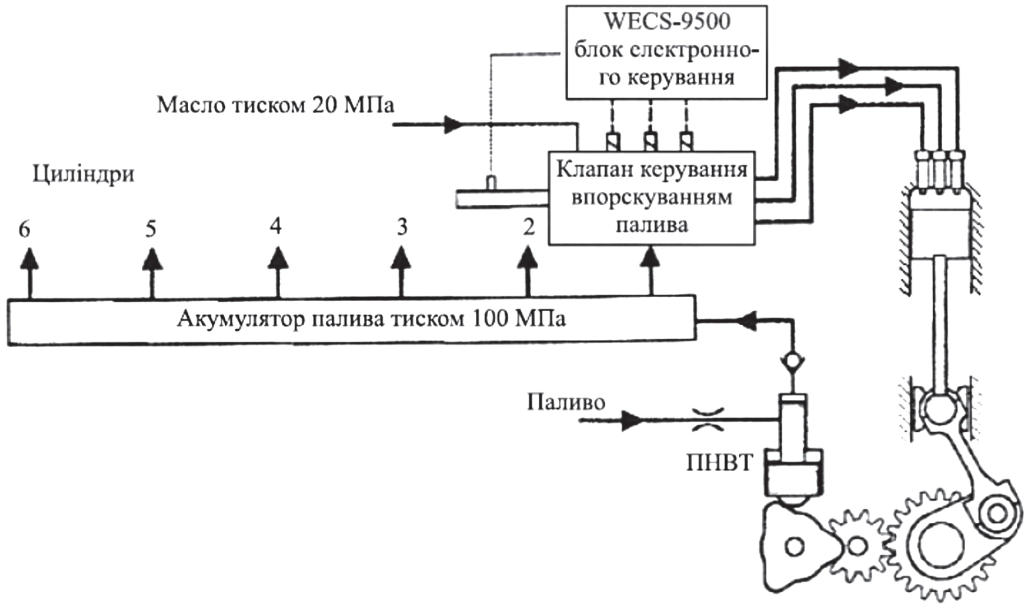


Рис. 5.34. Акумуляторна система паливоподачі

Акумулятор являє собою товстостінну трубу, розташовану по всій довжині двигуна на рівні кришок циліндрів. В акумуляторі під тиском

100 МПа розміщуються необхідний для впорскування об'єм палива і пристрій демпфірування виникаючих хвиль тиску.

Стиснення палива до визначеного тиску і його подача здійснюються у звичайних ПНВТ, плунжери яких приводяться в дію кулачковим валом. З акумулятора паливо надходить до звичайних форсунок, відкриття і закриття голок яких відбуваються звичайним шляхом під тиском палива, що подається від керуючого клапана. Цей клапан установлює момент відкриття голки: кут випередження, кількість палива, що впорскується, і закон подачі палива.

Три форсунки у кожному циліндрі керуються незалежно: кожна окремо або, за потреби, разом. Керування клапаном здійснюється мікропроцесорною системою електронного керування WECS9500, яка має модульне виконання з окремим мікропроцесором для кожного циліндра. Ця система забезпечує контроль за всім двигуном.

На сьогодні на міжнародному рівні екологічним параметрам суднових ДВЗ приділяється значна увага. Із 2000 р. всі МОД підлягають обов'язковій екологічній сертифікації на відповідність вимогам Міжнародної конвенції MARPOL 73/78 щодо викидів оксидів азоту з відхідними газами [32, 37].

Застосування електронного керування дозволяє індивідуально керувати кожною паливною форсункою, установленою на циліндрі. Виключення з роботи форсунок є ефективним способом поліпшення показників дизеля під час роботи на часткових режимах: збільшується паливна економічність; забезпечується стала робота двигуна, мінімальна стала частота обертання колінчастого вала не перевищує 10…12 % від номінальної; поліпшуються екологічні показники (у всьому діапазоні робочих режимів спостерігається бездимний вихлоп).

Керування випускним клапаном дизеля з електронним керуванням відбувається наступним чином (рис. 5.35): насос, приводом якого є колінчастий вал, нагнітає масло під значним (20 МПа) тиском у трубопровід, що подає масло до блока керування випускним клапаном. Далі масло надходить безпосередньо на гідропривід шпинделя випускного клапана й забезпечує потрібний закон руху клапана. Гнучке керування фазами випускного клапана дозволяє отримати оптимальний тиск стиснення для всього діапазону експлуатаційних навантажувальних режимів дизеля.

На рис. 5.36 наведений двигун з електронним керуванням Wärtsilä RT-flex50.

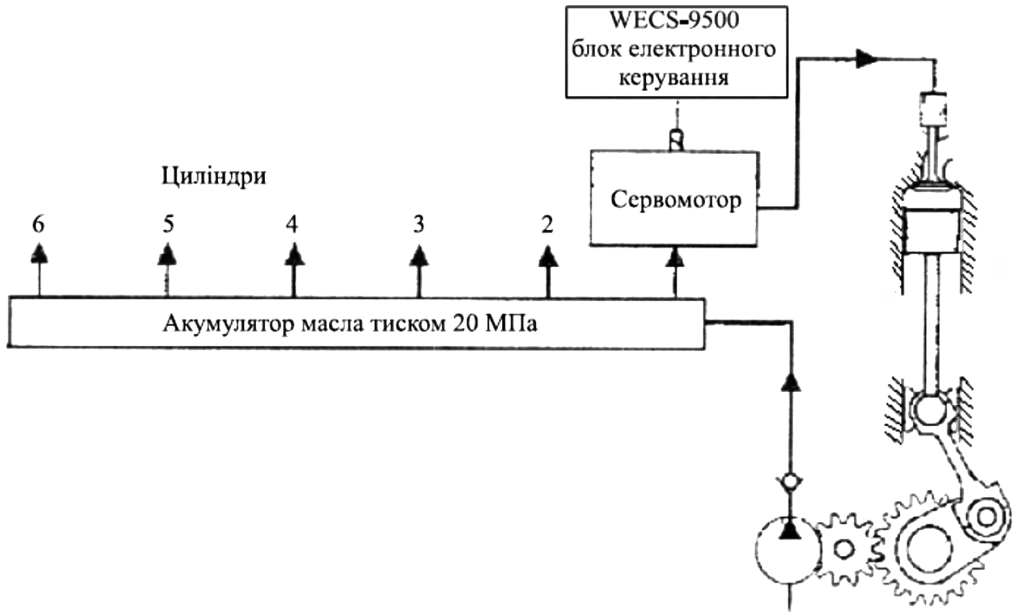


Рис. 5.35. Система керування вихлопним клапаном

5.5.2. Середньообертові двигуни

Сучасні СОД суттєво відрізняються від двигунів більш ранніх моделей як за конструкцією, так і за організацією робочого процесу.

Завдяки форсуванню робочого процесу з використанням газотурбінного наддування сучасний рівень середнього ефективного тиску суднових СОД складає 2,1…2,9 МПа.

Компанія «Wärtsilä» досягла такого рівня внаслідок застосування системи наддування SPEX (SwirlPuls-Exhaust), у якій одночасно поєднуються переваги імпульсного наддування і наддування за постійного тиску. Компанія «MAN B&W» адаптувала до чотиритактних двигунів систему наддування постійного тиску, широко застосовану в МОД. На сучасних двигунах використовують ТНА з керованими сопловими апаратами турбіни (компанії «Caterpillar» та «Wärtsilä»). Це дозволило довести максимальну потужність суднових СОД до 22 МВт.

Переведення СОД на важке паливо – це задача, необхідність вирішення якої диктувалася як істотно нижчою вартістю важких палив порівняно з дизельними (майже у два рази), так і перевагами у застосуванні для СЕУ єдиного палива. Якщо під час переведення МОД на важкі палива основним була організація відповідної підготовки палива, то для розв'язання цієї задачі щодо СОД потрібно було вжити радикальних заходів організації робочого процесу двигуна.

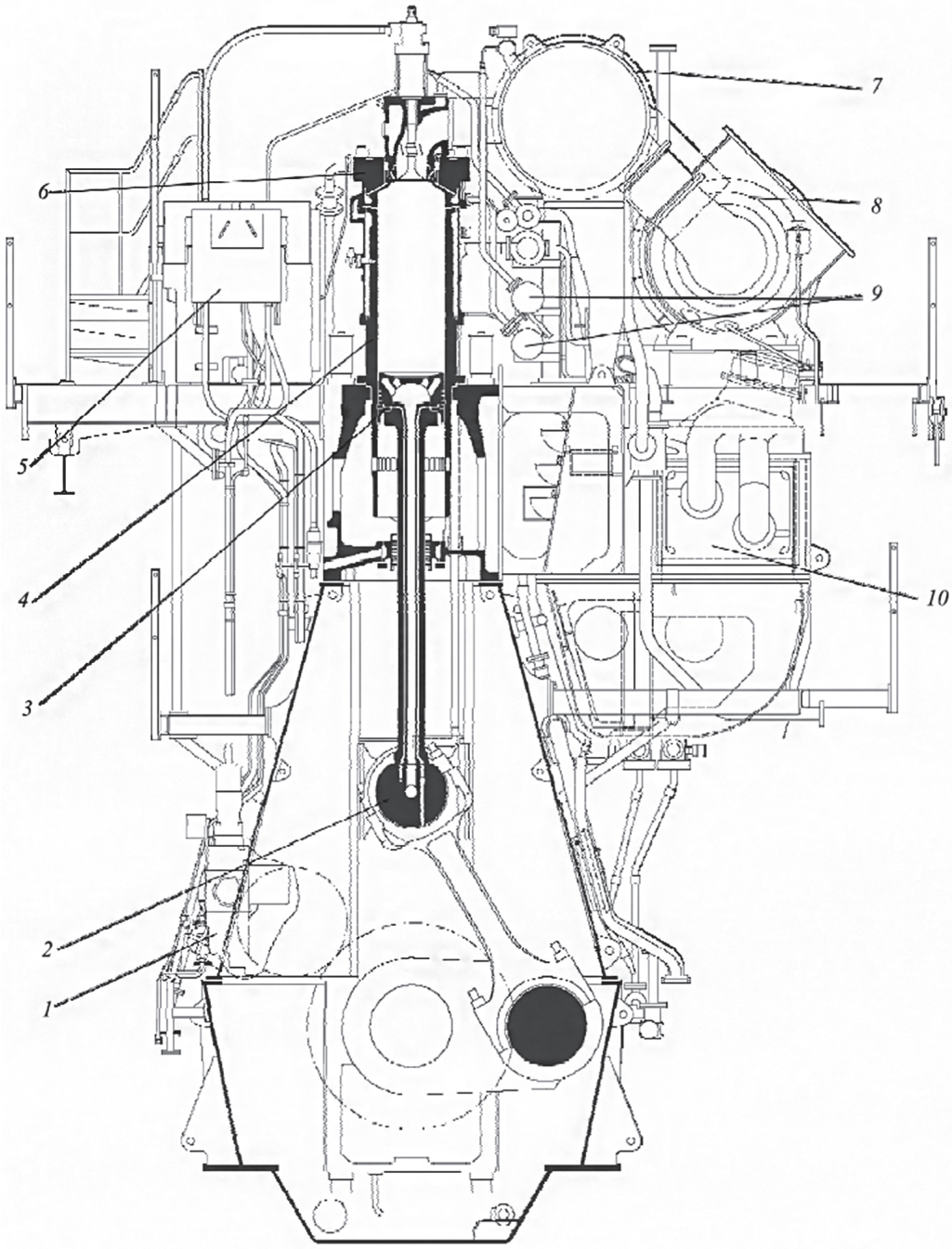


Рис. 5.36. Двигун з електронним керуванням Wärtsilä RT-flex50:
1 – привід гідронасосів сервомеханізмів; *2* – крейцкопф; *3* – головка поршня; *4* – втулка циліндра; *5* – сервоприводи ПНВТ; *6*, *7* – вихлопні відповідно клапан з імпелером і колектор; *8* – турбокомпресор; *9* – акумулятор палива та масла; *10* – охолодник повітря

Посилені норми емісії у відхідних газах оксидів азоту та сажистих частинок змусили двигунобудівників шукати шляхи радикального вдосконалення процесів згоряння палива. Підвищенню ефективності згоряння палива сприяли системи електронного керування двигуном, за допомогою яких оптимізувалися фази подачі палива в циліндри зі зміною навантаження, забезпечувалося керування фазами відкриття та закриття впускних клапанів.

Скорочення часу подачі палива за одночасного підвищення тонкості його розпилювання (завдяки підвищенню тиску впорскування до 120…150 МПа) дозволило проєктантам утримати його витрату на попередньому рівні й вирішити головне завдання – забезпечити ефективну роботу двигунів на важких паливах і зменшити утворення NO_x. Підвищення відношення *S*/*D* до 1,5 допомогло збільшити висоту камери згоряння, що забезпечило кращі умови для сумішоутворення, розвитку факела палива і згоряння. Одночасно збільшенням *S*/*D* була зменшена частота обертання, що знизило середню швидкість поршня, а відповідно й інтенсивність зносу циліндро-поршневої групи. Для зменшення підвищеної теплової напруженості, унаслідок форсування двигунів і використання важких палив, а також зниження температурних полів та їх рівномірного розподілу (зниженню температурних перепадів) було вдосконалене охолодження камери згоряння. Застосування канальних методів охолодження деталей камери згоряння дозволило наблизити охолоджуючу рідину до поверхонь, що сприймають теплоту.

Постійне скорочення чисельності машинної команди на судні з метою зниження експлуатаційних витрат викликає необхідність зменшення обсягу робіт з технічного обслуговування безпосередньо на судні й перенесення більшого обсягу цих робіт на берегові підприємства.

Ці обставини стали підставою для кардинальної зміни компонувальних схем двигунів нового покоління [98]. Концепцією цієї програми стало застосування модульних рішень, які передбачали об'єднання конструктивних елементів в окремі модулі – моноблоки, усунення низки зовнішніх трубопроводів і розміщення їх у моноблоках.

Так, наприклад, навішені на двигун насоси охолодження та змащення, охолодники, терморегулятори, самоочисний фільтр і трубопроводи об'єднуються в одну коробчасту конструкцію, яка встановлена на фронтальній частині остова двигуна. Уся циліндро-поршнева група, втулки циліндра і кришка можуть бути демонтовані як одне ціле [32]. Потім ці об'єднані елементи замінюються судновим персоналом на нові, які поставляються фірмою, або заздалегідь відремонтовані.

Середньообертові двигуни компанії «B&W Diesel Group». Найбільш поширеним серед двигунів цієї компанії є модельний ряд

двигунів L/V32/40, L40/54, L/V48/60, L58/64, який охоплює потужності 3000…21 000 кВт.

У цих двигунах застосовані практично ідентичні конструктивні рішення. Особливості конструкцій двигунів даного модельного ряду розглянемо на прикладі СОД V46, L32 та V32 та (рис. 5.37–5.39).

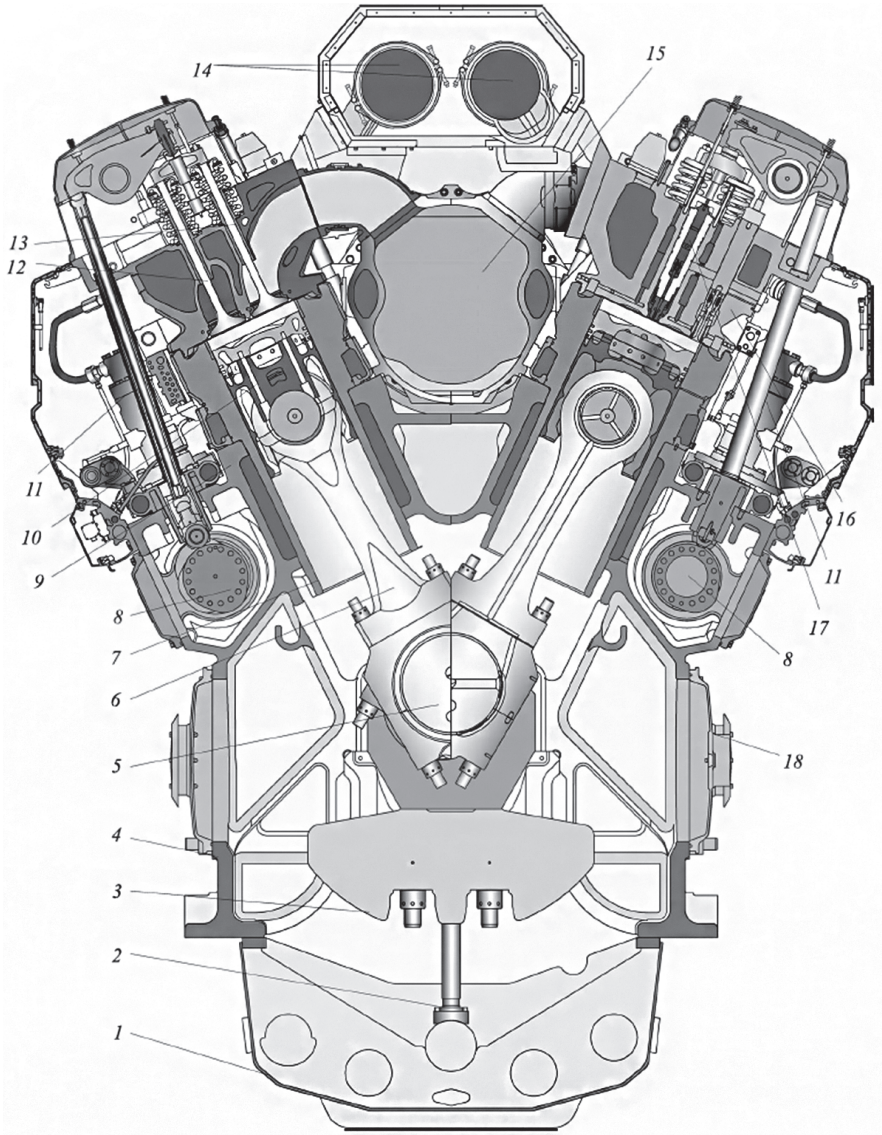


Рис. 5.37. Середньообертовий двигун Wärtsilä V48:
1 – картер; *2* – домкрат; *3* – противага; *4* – фундаментна рама; *5*, *8* – колінчастий і розподільний вали; *6* – шатун; *7*, *9*, *16* – втулка, блок та кришка циліндра; *10* – поршень; *11* – ПНВТ; *12*, *13*, *18* – випускний, впускний і запобіжний клапани; *14*, *15* – випускний та впускний колектори; *17* – паливна форсунка

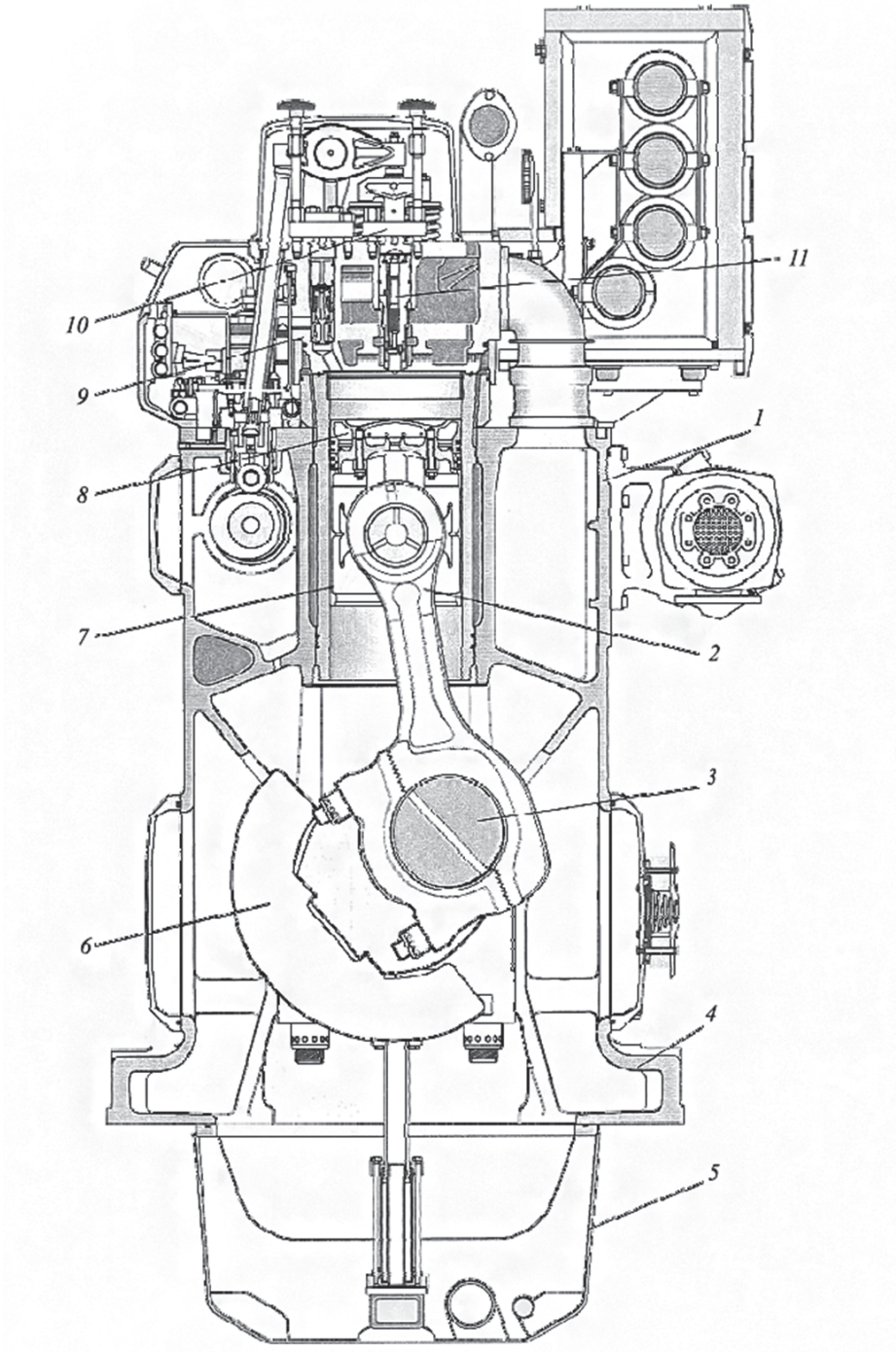


Рис. 5.38. Двигун Wärtsilä L32:
1 – блок циліндрів; *2* – шатун; *3* – колінчастий вал; *4* – фундаментна рама;
5 – піддон; *6* – противага; *7*, *9* – відповідно втулка і кришка циліндра; *8* – поршень;
10 – впускний та випускний клапани; *11* – форсунка

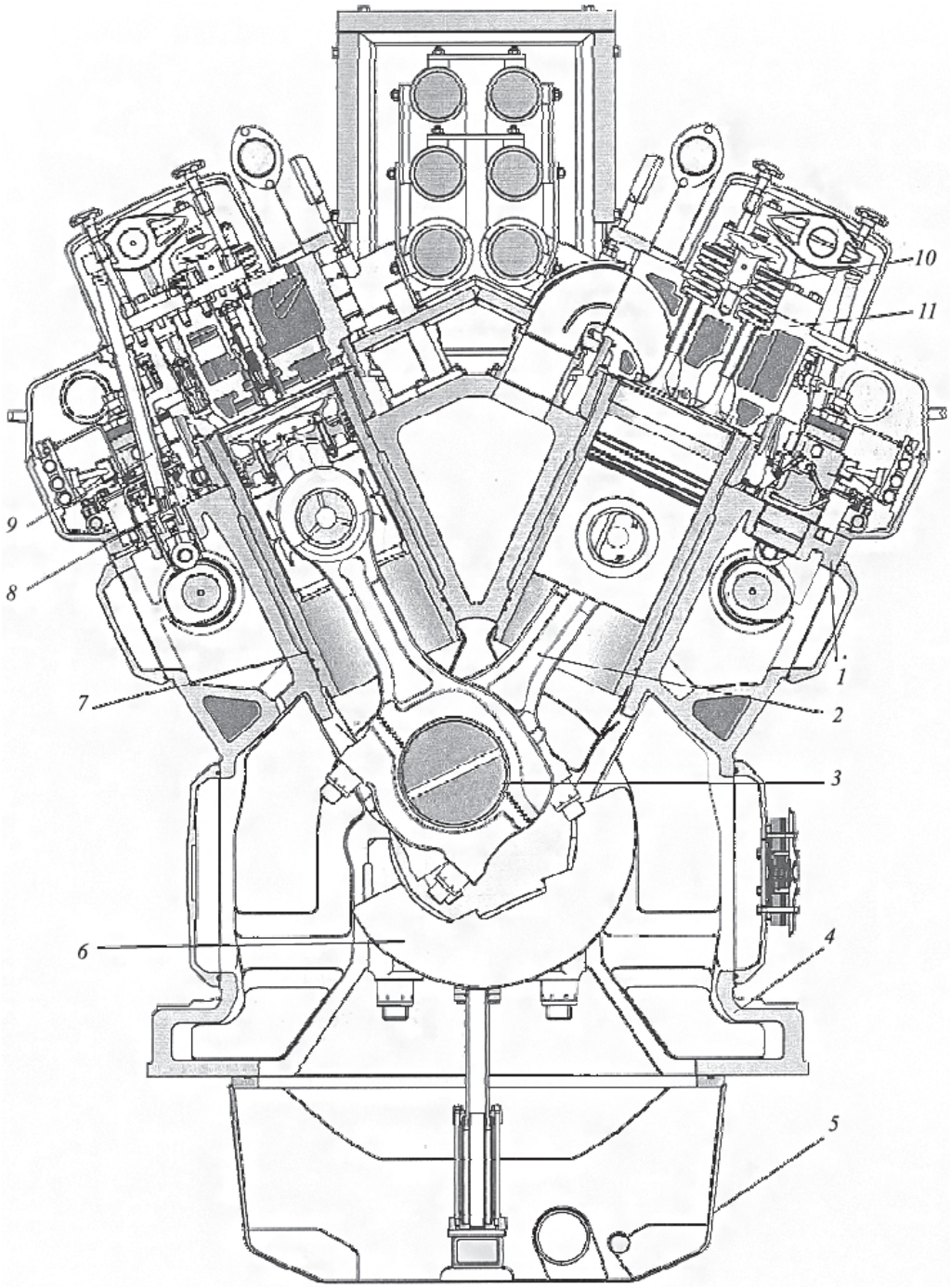


Рис. 5.39. Двигун Wärtsilä V32:
1 – блок циліндрів; *2* – шатун; *3* – колінчастий вал; *4* – фундаментна рама; *5* – піддон; *6* – противага; *7*, *11* – втулка та кришка циліндра; *8* – поршень; *9* – форсунка; *10* – впускний та випускний клапани

Остов двигуна являє собою моноблок, який об'єднує фундаментну раму і блок циліндрів. Від навантажень розтягу і відповідних деформацій він захищений анкерними зв'язками і довгими шпильками кріплення кришок циліндрів. Окремі для кожного циліндра кожухи викликають найменшу деформацію гільз циліндрів, малий знос втулок, відсутність деформуючого впливу на сусідні циліндри. Втулки циліндрів встановлюються на високі оболонки, які знаходяться зверху блока. Охолодження втулок відбувається лише у зоні оболонок, нижня їх частина не охолоджується. Товстостінні втулки й індивідуальні для кожного циліндра оболонки забезпечують мінімальні деформації дзеркала циліндра, що дозволяє зменшити зазори між поршнем і втулкою.

Змащення циліндрів забезпечується лубрикаторами по відводах, які виходять на внутрішню поверхню циліндра у зоні між першим та другим компресійними кільцями за положення поршня у НМТ. Кришка циліндра – з подвійним днищем: тонке днище для зменшення температурних напружень, а розташоване вище – товсте для зниження механічних навантажень під дією високого тиску газів [32].

Випускні й впускні клапани двигуна L58/64 розміщують в охолоджуваних корпусах, а у двигунах L/V32/40, L40/54 та L/V48/60 охолодженню піддаються тільки корпуси верхніх клапанів. Вихлопні клапани для забезпечення їх провертання випускними газами оснащені імпелерами.

Шатун виконаний з рознімання у верхній частині стрижня, що дозволяє витягувати поршень без розбирання нижньої головки шатуна. Для зменшення довжини дизеля у V-подібному виконанні застосовані причіпні шатуни.

Поршень – складений, його головка виготовлена сталевою кованою, «юбка» – кована алюмінієва. Охолодження поршня здійснюється маслом, яке по стрижню шатуна подається до верхньої головки, а потім – в охолоджуваний простір поршня.

З метою зниження інтенсивності утворення сажі на вихлопі було інтенсифіковане подавання палива, збільшений максимальний тиск впорскування до 160 МПа. Завдяки застосуванню комплексних технічних рішень за максимального тиску P, який збільшився до 20 МПа, витрата палива зменшилася порівняно з попередніми конструкціями.

Певні конструктивні особливості характерні для СОД L/V28/33. Це моноблочна конструкція тонкостінного поршня, що забезпечує невеликі значення інерційних сил. Охолодження поршня здійснюється маслом, що подається по шатуну. Інтенсифікація передачі теплоти здійснюється збовтуванням масла у головці поршня під час його руху (шейкерний ефект). На поршні встановлюються три ущільнювальні кільця й одне маслознімне. Робоча поверхня компресійних кілець виконана бочкоподібною, вона вкрита шаром хрому. Мотильовий шатун – двотавровий. Нижня головка його має косе рознімання

для забезпечення виїмки шатуна через втулку циліндра. Для виключення зміщення у площині рознімання вона виконана зубчастою.

Втулки циліндрів відлиті з дрібнозернистого перлітного чавуну, їх робоча поверхня хонінгована з метою полегшення припрацювання при поліпшенні утримання масла на поверхні. Для охолодження втулок використовується вода, яка циркулює у заоболонковому просторі блока циліндрів. Ущільнення від протікань здійснюється гумовими кільцями. Висока жорсткість втулки забезпечується її товстостінністю, що сприяє зменшенню можливих колових деформацій.

5.6. Захист навколишнього середовища під час експлуатації суднових дизельних установок

Нормування шкідливих викидів до атмосфери від ДВЗ

Підвищення вимог до екологічної чистоти СЕУ сприяло проведенню цілого комплексу досліджень, спрямованих на створення «екологічно чистих двигунів». Ці дослідження були обумовлені втіленням різних міжнародних та регіональних нормативів, які обмежували викиди від ДВЗ.

Корисна інформація! Для оцінки вмісту шкідливих викидів застосовуються різні показники. Так під час проведення газового аналізу визначаються об'ємні концентрації всіх газоподібних компонентів (C_i), що вимірюються у % для компонентів, доля яких складає більше 1 %. За менших концентрацій їх визначають у ppm (parts per million – часток на мільйон). Співвідношення між вказаними одиницями вимірювання наступне: 1 % = 10^4 ppm; 1 ppm = 10^{-4} %; 1 ppm = $1/10^6$. Концентрація твердих частинок у відхідних газах вимірюється у міліграмах на кубічний метр газів за нормальних умов (мг/нм^3). Об'ємна концентрація газоподібних компонентів також може бути виражена в мг/нм^3:

$$C_{img} = \frac{C_{i_{ppm}} \cdot \mu_i}{29{,}3},$$

де $C_{i_{ppm}}$ – об'ємна концентрація i-го компонента відхідних газів, ppm;

μ_i – молекулярна маса i-го компонента; 29,3 – молекулярна маса газів.

Характеристиками шкідливих викидів, які кількісно визначають їх величину, є наступні:

інтенсивність виділення викидів E_i, кг/год;

питомий викид e_i, г/(кВт×год);

викид шкідливого компонента на 1 кг палива ε_i, кг/кг палива.

Ці характеристики пов'язані між собою:

$$E_i = \varepsilon_i \times G_{\text{пал}}; \qquad e_i = E_i / N_e; \qquad e_i = \varepsilon_i \times g_e,$$

де N_e – ефективна потужність двигуна, кВт; g_e – питома витрата палива; $G_{\text{пал}}$ – витрата палива, кг/год. Найбільш об'єктивним показником кількісної оцінки викиду шкідливих компонентів з відхідних газів ДВЗ є питомий викид. Він прийнятий як нормативний у міжнародних та національних стандартах щодо обмеження викидів.

Уявлення про співвідношення різних одиниць вимірювання викидів суднових дизелів надають дані, наведені в табл. 5.1.

Зважаючи на те, що об'ємна концентрація шкідливих компонентів у відпрацьованих газах залежить від міри розбавлення їх повітрям, то з метою встановлення рівня емісії для різних дизелів об'ємну концентрацію перераховують на концентрацію залишкового кисню у сухих (після конденсації парів H_2O) відпрацьованих газах, яка дорівнює 15 %.

У 1997 р. Міжнародна морська організація (IMO) на конференції в Лондоні ініціювала прийняття на доповнення до Конвенції MARPOL 73/78 Додатка VI, яким передбачалося обмеження емісії таких шкідливих компонентів, як NO_x та SO_x, у випускних газах суднових дизелів. Складовою частиною Додатка був «технічний кодекс із контролю емісії оксидів азоту від суднових дизельних двигунів», який є міжнародним стандартом, що встановлює порядок і правила економічної сертифікації суднових дизелів на заводі-виробнику та під час експлуатації двигунів у суднових умовах. Технічний кодекс передбачав обмеження викидів лише оксидів азоту.

Таблиця 5.1. **Викиди з відхідними газами суднового МОД 10K60MC (18 900 кВт)**

Компоненти відхідних газів	C_i, ppm	c_i, г/м^3	E_i, кг/год	e_i, г/(кг · год)
NO*x*	1570	3,41	352,10	18,63
CO	57	0,08	7,1	0,41
HC	284	0,22	22,2	1,17
SO*x*	516	1,56	161,0	8,52
O_2	13,0	196	20 225	1070
CO_2	5,2	108	11 188	590
H_2O	5,4	0,00	4747	250
PM	–	0,12	12,10	0,66

Відповідно до Правила 13 Додатка VI, яке застосовується для обмеження викидів оксидів азоту двигунами з потужністю більше 130 кВт, установленими на суднах, побудованих після січня 2000 р., за винятком двигунів суднових аварійних ДГ, експлуатація двигуна забороняється, якщо викиди перевищують наступні межі:

17 г/(кВт×год) для $n < 130$ хв$^{-1}$;

$45n - 0{,}2$ г/(кВт×год) для $130 < n < 2000$ хв$^{-1}$;

9,8 г/(кВт×год) для $n > 2000$ хв$^{-1}$,

де n – номінальна частота обертання двигуна.

У табл. 5.2 наведені обмеження викидів NO_x, що установлені MARPOL. Графічне відображення цих обмежень наведено на рис. 5.40.

Таблиця 5.2. **Рівень викидів NO_x із суднових дизелів відповідно до MARPOL**

Рівень	Роки	Межа викидів NO*x*, г/(кВт год), за частоти обертання		
		$n < 130$	$130 \le n < 2000$	$n \ge 2000$
Рівень I	2000	17,0	$45\ n^{-0,20}$	9,80
Рівень II	2011	14,4	$44\ n^{-0,23}$	7,70
Рівень III*	2016	3,4	$9\ n^{-0,20}$	1,96

* У зоні контролю викидів NO*x* (рівень II – за межами ECA).

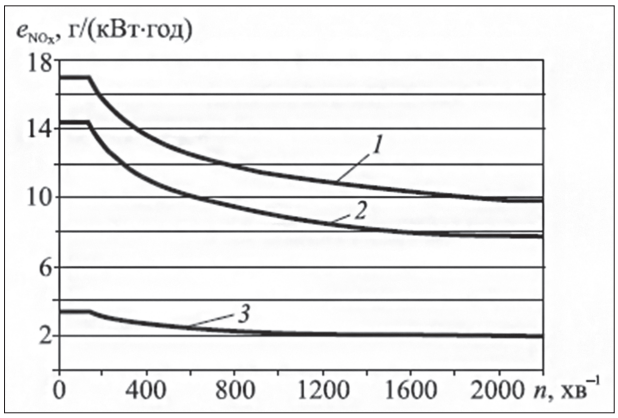


Рис. 5.40. Залежність питомих викидів NOx від частоти обертання колінчастого вала двигуна внутрішнього згоряння:
1 – рівень I; *2* – рівень II (глобальний); *3* – рівень III (у районах контролю викидів NO_x)

Поряд з обмеженнями на емісію оксидів азоту, які розроблені ІМО і носять глобальний міжнародний характер, поширення набули законодавчі акти регіонального рівня такі, як Каліфорнійські правила, законодавчі положення Швеції тощо. Вимоги подібних правил достатньо жорсткі, вони поширюються на ДВЗ суден, які експлуатуються в регіональних екваторіальних водах (США).

Так для прибережних вод штату Каліфорнія (США) розроблено два варіанти регіональних пропозицій щодо регулювання викидів NO_x від суднових двигунів. За одним з них Каліфорнійський департамент повітряних ресурсів пропонує обмежити викиди NO_x до 60 ppm (при 15 %-му вмісті у газах O_2) для ГД і ДД нових суден. Для існуючих суден пропонується обмежити викиди допоміжних двигунів у розмірі 75 ppm, а головних – до 60 ppm (також за 15 %-му вмісті у газах O_2). До того ж паливо повинно містити не більше 0,05 % сірчистих сполук.

Відповідно до другої пропозиції, розробленої Агенцією захисту довкілля Каліфорнії, пропонується призначати платню за викид оксидів азоту під час заходу суден у порти Лос-Анджелеса – 10 тис. дол. США за

1 тонну NO_x. Базовий викид NO*x* у г/(кВт×год) розраховується за формулою $NO_x = 64{,}3n - 0{,}2$, яка дає значення на 42 % вище, ніж при розрахунках за залежністю, запропонованою ІМО. За 80 %-му зниженні викидів NO_x порівняно з базовими передбачається 90 %-ве зниження оплати, за 30…80 %-му зниженні – 50 %, менше 30 % – 0 % зниження.

Швеція ввела обмеження на емісію оксидів азоту для поромів місцевого сполучення у 2 г/(кВт×год), які можуть бути досягнуті лише із застосуванням спеціальних засобів очищення відхідних газів. Відповідно до законодавства Норвегії судна, що знаходяться в її територіальних водах, мають відшкодовувати по 2,5 тис. дол. США за кожну тонну оксидів азоту у відхідних газах СЕУ.

Обмеження викидів оксидів сірки регламентується Правилом 14 Додатка VI до Конвенції MARPOL.

1. Уміст сірки в будь-якому рідкому паливі, що використовується на судні, не повинен перевищувати 4,5 %.

2. У разі знаходження суден у межах SECA (Sulfur Emission Control Area), районів контролю викидів SO_x, обов'язково має виконуватися одна з умов:

уміст сірки в паливі не повинен перевищувати 1,5 %, адміністрація судна має за вимогою надавати сертифікати на наявні на борту паливо-мастильні матеріали;

на судні застосовується система очищення відхідних газів, яка забезпечує рівень сумарних викидів SO_x усіма елементами СЕУ нижче 6,0 г/(кВт×год).

Наведені обмеження вступили в дію з травня 2006 р. на Балтиці та з 2007 р. вони розповсюджені на Північне море й Англійський канал (протока Ла-Манш).

Рис. 5.41 ілюструє характер зміни допустимого вмісту сірки в паливі за роками. На регіональному рівні уряди Греції та Іспанії прийняли ще більш жорсткі обмеження на вміст сірки в паливі для суден, що знаходяться у прибережних акваторіях – не більше 0,2 % у легкому паливі.

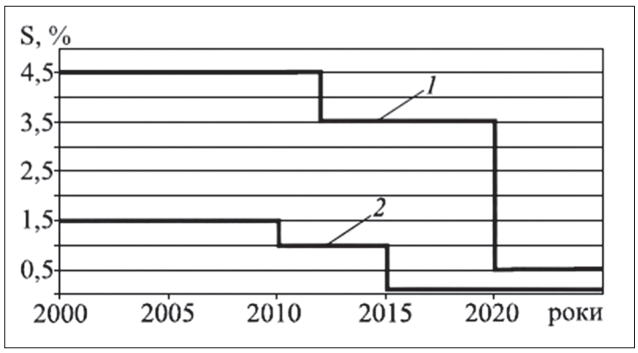


Рис. 5.41. Обмеження вмісту сірки в паливі:
1 – для всіх акваторій; *2* – для районів контролю викидів SO_x

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. *Охарактеризуйте сфери застосування ДЕУ з ВОД. Як класифікуються суднові дизелі за призначенням?*
2. *Назвіть, на які типи поділяються суднові дизелі за фазовим станом застосованого палива.*
3. *На які типи поділяються суднові дизелі за конструктивним виконанням кривошипно-шатунного механізму?*
4. *Як залежно від розташування циліндрів класифікуються суднові дизелі?*
5. *Дайте визначення основних показників роботи суднового ДВЗ: робочий цикл, індикаторна діаграма, верхня та нижня мертві точки, хід поршня, робочий об'єм циліндра.*
6. *Які процеси відбуваються у чотиритактному дизелі під час першого такту?*
7. *Охарактеризуйте процеси у чотиритактному дизелі на другому такті.*
8. *Розгляньте характер робочих процесів під час третього такту.*
9. *Поясніть процеси, що відбуваються у чотиритактному дизелі під час такту випуску.*
10. *Які функції виконує колова діаграма фаз газорозподілу?*
11. *Наведіть особливості будови двотактного двигуна з прямоточно-клапанною продувкою.*
12. *Визначте процеси, що відбуваються у циліндрі двотактного двигуна під час першого такту.*
13. *Охарактеризуйте процеси, які протікають у циліндрі двотактного двигуна протягом другого такту.*
14. *Розгляньте особливості існуючих систем газообміну двотактних двигунів.*
15. *Покажіть характерні точки процесів газообміну на індикаторній діаграмі двотактного двигуна.*
16. *Наведіть деталі, які входять до складу корпусу суднового двигуна.*
17. *Поясніть, якими силами навантажені елементи корпусу ДВЗ.*
18. *Чим визначаються зовнішні розміри та форма корпусу двигуна?*
19. *Дайте визначення силової схеми дизельного двигуна. Які елементи входять до неї?*
20. *Охарактеризуйте елементи циліндра та розгляньте їх призначення.*
21. *Під впливом яких навантажень знаходяться під час роботи двигуна втулки циліндрів?*
22. *Чим визначається форма кришки циліндрів ДВЗ?*
23. *Які деталі розташовуються у кришках циліндрів?*
24. *Охарактеризуйте призначення кривошипно-шатунного механізму.*

25. *Наведіть елементи, які входять до складу кривошипно-шатунного механізму тронкового двигуна.*
26. *Розгляньте особливості кривошипно-шатунного механізму крейцкопфного двигуна.*
27. *Яка особливість кривошипно-шатунного механізму дизельного двигуна з V-подібним розташуванням циліндрів?*
28. *Назвіть деталі, що входять до поршневої групи кривошипно-шатунного механізму суднових дизелів.*
29. *З яких елементів складається поршень тронкового двигуна?*
30. *Які способи охолодження поршнів застосовуються у дво- та чотиритактних дизелях?*
31. *Назвіть типи поршневих кілець, що використовуються у суднових дизелях.*
32. *Яким вимогам повинні відповідати ущільнювальні кільця суднового дизеля?*
33. *Наведіть матеріали, які застосовуються для виготовлення поршневих кілець.*
34. *Охарактеризуйте склад деталей шатунної групи.*
35. *З яких матеріалів виготовляють шатуни?*
36. *Охарактеризуйте склад крейцкопфа МОД і розгляньте передачу зусиль від шатуна до корпусу двигуна.*
37. *У чому полягає призначення колінчастого вала?*
38. *Проаналізуйте зусилля, що впливають на колінчастий вал.*
39. *Назвіть основні складові елементи колінчастого вала.*
40. *У чому полягає відмінність у змащенні рамових та шатунних шийок колінчастого вала?*
41. *Чим відрізняються за способом виготовлення колінчасті вали МОД, СОД і ВОД?*
42. *Яке призначення механізму газорозподілу?*
43. *Наведіть особливості клапанних систем газорозподілу дво- та чотиритактних двигунів.*
44. *Яким конструктивним рішенням забезпечується підвищення терміну придатності випускного клапана?*
45. *Охарактеризуйте призначення розподільного вала. З яких елементів він складається?*
46. *Розгляньте принцип дії гідропневматичного приводу випускного клапана.*
47. *З яких елементів складаються турбокомпресорні агрегати наддування?*
48. *Які типи турбін і компресорів знайшли застосування у складі агрегатів наддування?*
49. *Обґрунтуйте необхідність охолодження повітря після стиснення у компресорі ТНА.*

50. *Наведіть склад паливної системи низького тиску суднового ДВЗ.*
51. *Розгляньте склад паливних систем високого тиску ДВЗ.*
52. *Які функції виконує масло, що подається до ДВЗ?*
53. *Порівняйте масляні системи із сухим та мокрим картерами.*
54. *Наведіть типи масляних систем за способом забезпечення напору.*
55. *Як поділяються масляні системи ДВЗ?*
56. *Назвіть основні елементи масляної системи ДВЗ.*
57. *Охарактеризуйте призначення та будову лубрикаторів.*
58. *У чому полягає призначення систем водяного охолодження ДВЗ?*
59. *Які деталі ДВЗ підлягають охолодженню водою?*
60. *Розгляньте склад систем водяного охолодження і призначення їх елементів.*
61. *Назвіть дизелебудівні компанії, що випускають МОД.*
62. *Наведіть діапазон потужності двигунів типу MC.*
63. *Охарактеризуйте діапазон частот обертання двигунів типу MC.*
64. *Як здійснюється передача потужності на розподільний вал у двигунах типу MC?*
65. *Розгляньте особливості конструкції втулок циліндрів двигунів типу MC.*
66. *Проаналізуйте конструкції поршнів двигунів типу MC.*
67. *Наведіть спосіб керування випускними клапанами двигунів типу MC.*
68. *Як здійснюється охолодження паливних форсунок двигунів типу MC?*
69. *Назвіть функції розподільного вала у МОД типу MC.*
70. *Поясніть, які зміни у конструкцію двигунів типу ME були внесені порівняно з двигунами типу MC.*
71. *Розгляньте систему керування впорскуванням палива у двигунах типу ME.*
72. *Як забезпечується керування вихлопними клапанами у двигунах типу ME?*
73. *Розгляньте принципи забезпечення змащення циліндрових втулок у двигунах типу ME.*
74. *Перелічіть, які елементи були вилучені з конструкції двигунів типу MC під час переведення їх на електронне керування.*
75. *Перелічіть, які елементи введені в конструкцію двигунів з електронним керуванням порівняно з двигунами типу MC.*
76. *Як забезпечується рівномірність розподілу температури по поверхні вихлопного клапана двигунів RTA?*
77. *Розгляньте способи охолодження головок поршнів двигунів RTA.*
78. *Охарактеризуйте систему подачі палива у двигунах RT-flex.*
79. *Покажіть, як застосування електронного керування дозволяє поліпшити екологічні показники двигунів RT-flex.*
80. *Розгляньте систему керування випускним клапаном двигунів RT-flex.*

81. *Охарактеризуйте рівень форсування сучасних СОД.*
82. *Яка система наддування отримала переважне застосування у СОД?*
83. *Вирішення яких проблем набуло необхідності під час переведення СОД на важке паливо?*
84. *Як впливає на умови згоряння палива у циліндрі СОД збільшення співвідношення S/D?*
85. *У чому полягають зміни у компонувальних схемах сучасних СОД?*
86. *Наведіть основні показники вимірювання шкідливих викидів СЕУ до атмосфери.*
87. *Яким документом регламентуються викиди оксидів азоту судновими двигунами?*
88. *Охарактеризуйте рівень викидів, установлений Конвенцією MARPOL з 2000 р.*
89. *Який рівень викидів NOx з МОД буде встановлений з 2011 р.?*
90. *Назвіть рівень викидів NOx з МОД у зонах контролю викидів з 2006 р.*
91. *Яким документом регламентується вміст сірки у паливах, що застосовуються на суднах?*

ГЛАВА 6. СУДНОВІ ГАЗОТУРБІННІ УСТАНОВКИ

6.1. Створення передумов морського застосування газотурбінних двигунів

Якщо порівняти між собою парову й газову турбіни[7] як розширювальні машини, різниця між ними незначна. Їх конструкція містить велику кількість спільних елементів, особливо у проточній частині.

У той же час інші елементи газотурбінних двигунів і паротурбінних агрегатів дуже різні. По-перше, – нагрівники. У ПТУ – це котел, зазвичай габаритна споруда, яка за розмірами значно переважає саму турбіну. У ГТД функції нагрівника виконує камера згоряння, у якій паливо згоряє у стисненому повітрі та яка значно менша за габаритами.

Функції холодильника у газотурбінному двигуні виконує навколишнє середовище, куди надходять відпрацьовані гази з турбіни. Власне холодильник як конструктивний вузол у газотурбінному двигуні загалом відсутній. У той же час пара після парової турбіни охолоджується циркуляційною водою у дуже громіздкому пристрої – конденсаторі. Чи може паротурбінна установка працювати без конденсатора? Може (згадаймо парову машину паровоза), але це негативно відбиватиметься на її економічності.

Таким чином, газотурбінний двигун без котла й конденсатора, у яких відбуваються фазові перетворення робочого тіла (води на пару, а потім пари на воду), незрівнянно легший, компактний – у цьому його головна перевага.

Але газотурбінному двигуну властиві свої недоліки. Якщо у ПТУ робоче тіло у рідкому стані стискається після конденсації насосом з незначною роботою стиснення у пароводяному циклі, то у циклі ГТД стискається повітря, причому робота стиснення дуже велика (зазвичай близько 40 % від роботи, розвиненої газовою турбіною). Це призводить до зниження корисної роботи циклу та висуває серйозні вимоги до ефективності процесів стиснення у компресорі ГТД.

---

[7] Зауважимо, що необхідно чітко відрізняти «газову турбіну» від «газотурбінного двигуна», до складу якого входить компресор, камера згоряння та власне газова турбіна. На жаль, навіть у спеціальній технічній літературі іноді має місце неаргументоване вживання цих термінів. Газотурбінний агрегат – це сукупність газотурбінного двигуна, передачі (механічної чи електричної) та теплообмінних апаратів таких, як проміжний охолодник повітря, регенератор, утилізаційний котел.

У той же час термічний ККД газотурбінного двигуна, як і будь-якого іншого теплового двигуна, визначається залежністю, отриманою С. Карно:

$$\eta_t = 1 - T_2/T_1,$$

де T_1 і T_2 – початкова та кінцева температура продуктів згоряння.

Із цієї залежності випливає, що радикальним способом підвищення ККД є збільшення температури робочого тіла перед турбіною. Зважаючи на те, що у камерах згоряння газотурбінних двигунів використовуються вуглеводневі рідкі та газоподібні палива, максимальна температура продуктів згоряння може становити 2000…2200 °С (з урахуванням обмежень щодо жароміцності матеріалів робочих лопаток у сучасних ГТД температура T_1 становить 1250…1350 °С). Таким чином, щоб створити газотурбінний двигун, який би переважав за економічністю паротурбінний агрегат, необхідно забезпечити високу, значно більшу ніж у паротурбінному агрегаті, температуру на початку процесу розширення і створити високоефективний компресор для стиснення повітря.

Уперше в історії техніки ідея створення газової турбіни була запропонована англійцем Джоном Барбером. У 1791 році він отримав патент на тепловий двигун, принцип дії якого майже повністю відповідав принципу роботи сучасного газотурбінного двигуна. У двигуні Барбера паливо отримувалося шляхом газифікації вугілля, нафти, деревини. Одержаний горючий газ поршневим компресором подавався до камери згоряння, у яку аналогічним компресором нагніталося повітря. Утворені продукти згоряння надходили на робоче колесо газової турбіни активного типу, яка через досить складну механічну передачу з ланцюгів та балансирів приводила згадані вище компресори (рис. 6.1). Таким чином, патент Барбера містив основні елементи газотурбінного двигуна, але він значно випередив технічні можливості кінця XVIII ст., за якими здійснення його основної ідеї було неможливим.

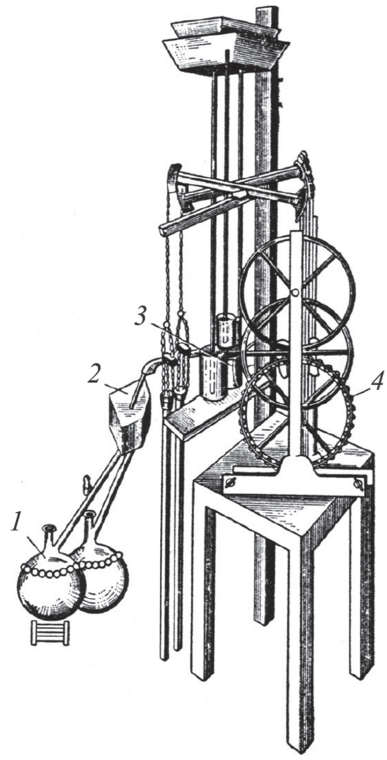


Рис. 6.1. Газотурбінний двигун Д. Барбера:
1 – газогенератор;
2 – газозмішувач; *3* – камера згоряння; *4* – газова турбіна

Необхідно згадати, що до Джона Барбера вже були відомі найпростіші типи

безкомпресорної газової турбіни. До одного з таких типів належить димовий вертел, який являв собою турбінне колесо, що монтувалося в димоході печі й оберталося потоком димових газів. Подібна ж турбіна, так зване «вогненне колесо», була описана у книзі Джованні Бранка «Машини». Суміш гарячого повітря і газоподібних продуктів згоряння від вогнища піднімалася по вертикальній димовій трубі, потрапляла на лопатки турбінного колеса й обертала його. Вал турбінного колеса через зубчасту передачу приводив у дію валки, призначені для прокату металевих заготовок.

Обидві розглянуті турбіни працювали на конвективних потоках газу, природа яких суто гравітаційна: нагріте, менш густе, повітря або продукти згоряння витісняються догори більш холодним і важким навколишнім повітрям.

У 1837 році француз Брессон запропонував газотурбінний двигун, у якому повітря стискувалося вентилятором, але практичного застосування конструкція не отримала. Значний внесок у розвиток та становлення газотурбінних двигунів зробив німецький інженер Штольце, який у 1872 р. запатентував «вогняну турбіну», побудовану і випробувану ним у 1900–1904 рр. Особливістю цієї газотурбінної установки (ГТУ) є те, що вона дуже схожа на сучасні газотурбінні двигуни (рис. 6.2). У ГТУ Штольце повітря стискувалося у 10-ступеневому осьовому компресорі, де робоче тіло рухалося паралельно осі обертання, потім підігрівалося в регенеративному теплообміннику й подавалося до камери згоряння. У камері згоряння менша частина повітря, так зване первинне повітря, змішувалася з паливом (горючим газом) та забезпечувала його горіння. Інша частина (вторинне повітря) змішувалася з продуктами згоряння, унаслідок чого температура газу, що подавався до турбіни, знижувалася до припустимих значень. Необхідно зауважити, що саме цей засіб застосовується у сучасних двигунах для охолодження продуктів згоряння.

Джерелом палива був газогенератор, який з вугілля виробляв гарячий газ і подавав його до камери згоряння. На жаль, випробування не дали очікуваних результатів. Установка була розрахована на потужність 200 к. с. за частоти обертання 2000 хв$^{-1}$, але під час випробувань з'ясувалося, що отримано лише біля 20 к. с. ефективної потужності. У чому полягала причина такої низької ефективності ГТУ Штольце? Зауважимо, що таке становище було характерне для більшості газотурбінних двигунів, які створювалися наприкінці XIX – початку XX ст. Для визначення ефективної потужності газотурбінної установки Штольце можна взяти, що теоретична потужність турбіни $N_т = 800$ к. с., компресора $N_к = 300$ к. с., а розрахункові ККД турбіни й компресора $\eta_т = 0{,}8$, $\eta_к = 0{,}7$.

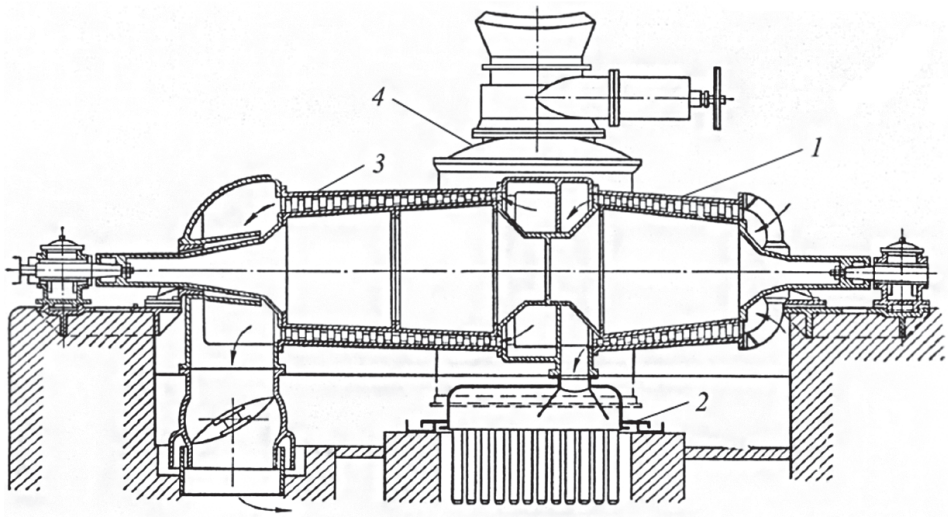


Рис. 6.2. Газотурбінний двигун Штольце:
1 – осьовий компресор; *2* – регенеративний підігрівник стиснутого повітря;
3 – газова турбіна; *4* – газогенератор

У цьому випадку надмірна (ефективна) потужність буде становити різницю між тим, що розвиває турбіна, і тим, що поглинає компресор:

$$N_e = N_т \times \eta_т - N_к/\eta_к = 800 \times 0{,}8 - 300/0{,}7 = 210 \text{ к. с.}$$

Але на жаль, на ті часи дійсні ККД турбін і компресорів, які визначали рівні досконалості процесів перетворення енергії в них, були значно нижчими, десь біля $\eta_т = 0{,}70$ та $\eta_к = 0{,}55$.

У цьому випадку

$$N_e = 800 \times 0{,}70 - 300/0{,}55 = 15 \text{ к. с.}$$

Приблизно такі результати й були отримані під час випробувань двигуна Штольце.

У 1904 р. Рене Арменго (Франція) створив газотурбінний двигун зі згорянням за постійного тиску, який працював на газі. Унаслідок недостатнього рівня температур та низьких ККД основних елементів газотурбінна установка могла працювати тільки на холостому ході.

Арменго разом з професором Рато та інженером Шарлем Лемалем побудував у 1906 р. нову, більш потужну установку. Турбінне двовінцеве осьове колесо діаметром 950 мм (так зване колесо Кертіса, або колесо швидкості) приводило в дію відцентровий компресор, який стискував повітря до 0,4 МПа. Розрахункова ефективна потужність повинна була дорівнювати 310 кВт.

Для того, щоб знизити температуру металу соплових лопаток турбіни Кертіса до 450 °С, було передбачене водяне охолодження: підігріта охолоджуюча вода впорскувалася у продукти згоряння. Це дозволило знизити середню температуру перед соплом до 550 °С. Результати випробувань показали, що корисна потужність становила біля 60 кВт, ефективний ККД агрегата – 3,5 %, що багато в чому пояснюється низькою енергетичною ефективністю компресорів і турбін (ККД відповідно склав 72 та 55 %) [124]. Незважаючи на всі ці вдосконалення, корисної потужності й цієї турбіни вистачало тільки на привід власного компресора.

Ураховуючи те, що на шляху створення ефективних газотурбінних двигунів, компресор (точніше низька його ефективність) був серйозною перешкодою. На початку XX ст. винахідники робили спробу обходитися зовсім без компресора, створюючи безкомпресорні двигуни. До безкомпресорних ГТД належать такі, згоряння палива в яких відбувається за постійного об'єму, вони також називаються *газотурбінними двигунами вибухової дії*. Камери згоряння цих двигунів мають вхідний та вихідний клапани, які закриваються перед займанням суміші палива з повітрям. Після займання (вибуху) суміші тиск у камері підвищується у декілька разів, вихідний клапан відкривається і продукти згоряння надходять на лопатки турбіни. Це дозволяє отримати порівняно високий тиск газів перед турбіною за незначного тиску повітря, яке надходить до камери згоряння. Необхідно зауважити, що деякі конструкції таких турбін не передбачають попереднього стиснення повітря у компресорі зі стороннім приводом. У Франції в 1910 р. турбіну зі згорянням за постійного об'єму створив інженер Барбеза. Потужність цієї турбіни склала 1,5 кВт.

Багато і плідно над ГТД зі згорянням за постійного тиску працював німецький інженер Хольцварт. У 1906–1933 рр. за його проєктом було розроблено й побудовано декілька газових турбін оригінальної конструкції. Так, наприклад, Хольцварт застосував попереднє стиснення повітря перед подачею до камери згоряння. Хольцварт за пропозицією інженера Шюле використав парову турбіну для приводу компресора попереднього стиснення, до того ж пара для цієї турбіни генерувалася у системі водяного охолодження газової турбіни, а також у теплообміннику, який був установлений між ступенями газової турбіни. Перша ГТУ Хольцварта розрахунковою потужністю близько 40 кВт (1906–1908 рр.) мала шість камер згоряння, оснащених запірними клапанами. Тиск продуктів згоряння на вході до соплового апарата турбіни складав 0,6 МПа [38].

Більш потужний агрегат конструкції Хольцварта (1910 р.) мав десять камер згоряння, максимальний тиск продуктів згоряння досягав 0,9 МПа. Розрахункова потужність турбіни – 740 кВт, реально досягнута на

випробуваннях – усього 15 кВт. І перша, і друга турбіни мали вертикальну вісь обертання ротора.

Турбіни, розроблені й побудовані Хольцвартом у 1914–1927 рр., мали горизонтальну вісь обертання (рис. 6.3).

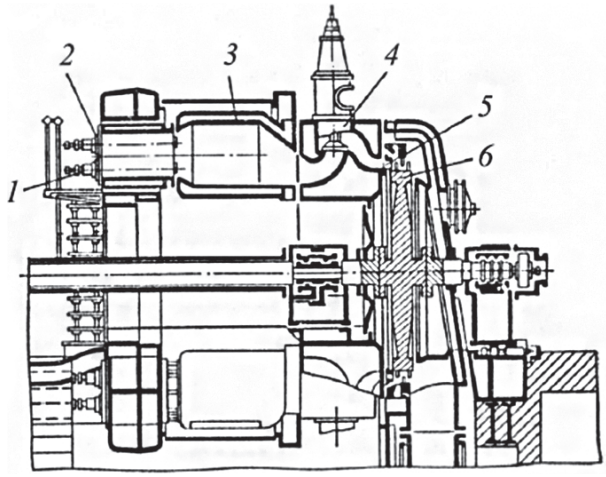


Рис. 6.3. Газотурбінна установка Хольцварта на горизонтальному валу:
1, *2*, *4* – повітряний, паливний та вихлопний клапани відповідно; *3* – камера згоряння; *5* – сопловий апарат турбіни; *6* – робоче колесо турбіни

Повітря входило до камери згоряння з тиском 0,2…0,3 МПа, тиск наприкінці процесу згоряння становив 1,2…1,4 МПа. Максимально досягнена ефективна потужність дорівнювала 200 кВт. Ефективний ККД цих газотурбінних установок становив 13 %, що на ті часи було серйозним досягненням. Найвищі показники мав газотурбінний агрегат Хольцварта потужністю 2000 кВт, який було запущено в експлуатацію у 1933 р. на доменному газі: ККД становив біля 20 %, ступінь підвищення тиску $\pi_к = 7$, температура газів перед турбіною близько 1000 К. Але у зв'язку зі складністю камер згоряння, у яких клапани повинні працювати зі значною частотою за високих температур і тиску з розтягненим періодом продувки камер згоряння та додатковою витратою повітря, установки як Хольцварта, так і інших розробників не набули поширення. Ще одним недоліком ГТУ зі згорянням за постійного об'єму є низький ККД турбіни, яка працює за пульсуючого початкового тиску, що знижує економічність усього агрегата. У зв'язку із цим у наступні роки газові турбіни зі згорянням за постійного об'єму не знайшли застосування.

Ураховуючи все викладене вище, подальше створення та вдосконалення газотурбінних двигунів проходило на основі ГТУ зі згорянням за постійного тиску, так званих прямоточних.

У 20–30 рр. XX століття важливою подією в енергетиці стали наукові праці професора Харківського політехнічного інституту В. М. Маковського, у яких він доводив, що для газотурбінного двигуна доцільна безперервна подача робочого тіла, тобто горіння за постійного тиску. Одна з перших його робіт, що була опублікована у 1925 р., сприяла координації зусиль спеціалістів у напрямку створення ГТУ з горінням за постійного тиску. Ним була організована газотурбінна лабораторія, у якій проводилися теоретичні й експериментальні дослідження, що завершилися розробкою проєкту ГТУ потужністю 736 кВт. Ця установка була виготовлена на Харківському заводі турбін у 1940 р.

Це була одна з перших конструкцій з охолоджуваною газовою турбіною. Для цього вода, яка надходила з випарної установки (для знесолення та попередження накипу), проходила послідовно через вал, диск, потрапляла у робочі лопатки, кожна з яких мала радіальні сполучені між собою канали, по яких здійснювалася циркуляція води. Відводилася охолоджуюча вода через протилежний кінець полого вала.

Газотурбінна установка була призначена для шахти підземної газифікації в м. Горлівка на Донбасі. Як паливо використовувався підземний газ, який поршневим компресором подавався до камери згоряння. Необхідне для забезпечення горіння газу повітря надходило під тиском 0,3…0,4 МПа. Як показали випробування, турбіна довгий час працювала з охолодженням за температури продуктів згоряння до 1090 К. Необхідно зауважити, що це був серйозний крок до тих температур, які характерні для сучасних ГТУ.

Багато в чому проблеми зі створення ГТУ були пов'язані з недостатнім науковим обґрунтуванням процесів, що в них відбувалися. У зв'язку із цим важко переоцінити внесок у розвиток турбобудування, зроблений словацьким ученим А. Стодолою, який у 1924 р. видав фундаментальну працю «Парові й газові турбіни».

У 1935 р. вийшла монографія видатного радянського вченого, професора В. В. Уварова «Газові турбіни», яка належить до пілотних робіт у теорії газових турбін. Суттєвим є внесок у теорію газових турбін професора Г. С. Жирицького, професора І. І. Кирилова, академіка А. М. Люльки, професора В. В. Уварова.

На шляху створення високоефективного газотурбінного двигуна були дві основні проблеми: аеродинамічна – розробка досконалого лопаткового апарата турбін і компресорів та металургійна – створення жароміцних сплавів для забезпечення можливості підвищення температури газів перед турбіною.

Досягнені наприкінці 30-х рр. успіхи в аеродинаміці лопатевих машин та створенні жароміцних сплавів надали потужний поштовх

розвитку газотурбобудування. Інтенсивніше за все проходили розробки газотурбінних двигунів для авіації. Це пояснюється тим, що саме в цій галузі малі маса й габарити відіграють найголовнішу роль, окрім цього порівняно невеликий ресурс (500…2000 год), на який на ті часи зазвичай розраховувалися двигуни літаків, дозволив примітно підвищити граничну температуру газів, що покидають камеру згоряння. Серйозною причиною інтенсивного розвитку авіаційних двигунів було зажадання їх військовими, і, значною мірою, той напружений стан у міжнародних відносинах, який склався у світі наприкінці 30-х рр. XX століття, коли багато країн готувалися до можливого воєнного конфлікту: одні з агресивними намірами, інші – з метою оборони від нападу. У цей період в Англії, Франції, Америці й нацистській Германії розпочалися серйозні дослідження у напрямку створення ГТД для літаків. У Німеччині цю проблему вивчала фірма «Heinkel». Перший дослідний зразок авіаційного газотурбінного двигуна HeS1, який працював за реактивним принципом, запрацював у 1937 р. У турбореактивному двигуні (ТРД) частина енергії газів, що виходять з камери згоряння, іде на привід компресора, залишок перетворюється у вихідному соплі на силу тяги. ТРД складався з одноступеневого відцентрового компресора, одноступеневої турбіни й випарної камери згоряння. Для цього двигуна проблема матеріалів для деталей турбіни, що працювали в умовах високих температур, була розв'язана застосуванням високовартісних спеціальних матеріалів.

Перший політ з двигуном HeS1 літак He178 здійснив у серпні 1939 р., у цьому ж році був створений ТРД англійським конструктором Ф. Уіттлом, закінчилися роботи над ТРД фірми «BMW» та «Junkers».

Після закінчення Другої світової війни з'явилися і турбогвинтові двигуни, у яких більша частина енергії продуктів згоряння використовується у турбінах приводу компресора й повітряного гвинта, а значно менша – для створення тяги. Інтенсивні дослідження і накопичений досвід експлуатації авіаційних газотурбінних двигунів багато в чому сприяли поширеному застосуванню ГТД у інших галузях, до того ж у деяких випадках суто авіаційні двигуни з мінімальними доробками застосувалися у наземних чи транспортних цілях. Так, у 1939 р. швейцарською фірмою «Brown-Bovery» була побудована стаціонарна ГТУ потужністю 4000 кВт, у 1941 р. з'явився перший локомотивний ГТД, у 1950 р. в Англії був продемонстрований перший автомобіль з газотурбінним двигуном фірми «Rover».

Отже, були створені всі передумови для практичного застосування ГТД на суднах.

Пошуки винахідників у напрямку вдосконалення газотурбінних двигунів і проблеми зі створенням жаростійких сталей та сплавів привели

у середині XX ст. до появи газотурбінної установки з вільнопоршневим генератором газу (ВПГГ), яка є поєднанням дизельного двигуна з газовою турбіною[8]. Прототипом ВПГГ став винахід Пескара, який у 1922 р. сконструював та запатентував перший у світі вільнопоршневий компресор [1].

До складу такої установки входить ВПГГ, який складається з двотактного одноциліндрового дизеля з поршнями, що рухаються протилежно, двох одноступеневих поршневих компресорів та газової турбіни (рис. 6.4). Рухомими частинами ВПГГ є поршневі групи, утворені дизельними й компресорними поршнями.

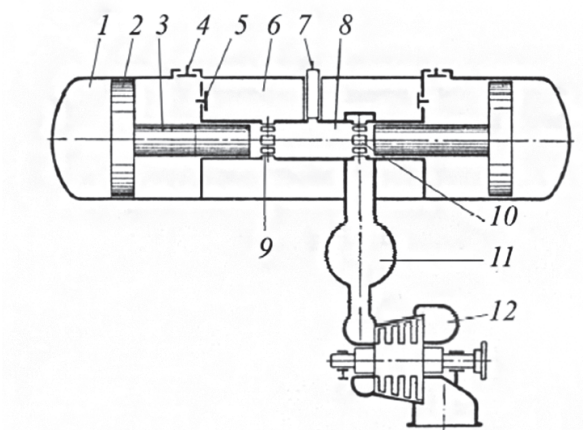


Рис. 6.4. Схема газотурбінної установки з ВПГГ:
1 – буферна порожнина; *2*, *3* – поршні компресора та двигуна; *4*, *5* – всмоктувальний і нагнітальний клапани; *6* – ресивер; *7* – форсунка; *8* – циліндр двигуна; *9*, *10* – продувальні й випускні вікна двигуна; *11* – газозбірник; *12* – газова турбіна

Поршні компресора двосторонньої дії рухаються у двох протилежно розташованих циліндрах компресора. Поршні компресора й поршні двигуна жорстко з'єднані між собою.

Важливе значення у роботі ВПГГ відіграє герметичний з усіх боків об'єм між денцями поршня та кришками циліндра – буферні порожнини: під час руху поршнів у напрямку до кришок циліндра повітря стискується, а під час зворотного руху поршня це повітря працює як повітряна пружина, яка рухає поршні назад.

Ураховуючи те, що діаметри поршнів двигуна менші від діаметрів поршнів компресора, між циліндрами компресора і двигуна утворюється кільцевий простір, з якого стиснене повітря витікає у ресивер,

[8] Зауважимо, що, незважаючи на загальнопоширений термін «газотурбінна установка з вільнопоршневим генератором газу», ця назва не є точною, оскільки зі всіх головних елементів ГТУ (компресор, камера згоряння, газова турбіна) у ній є тільки турбіна.

розташований навколо циліндра двигуна. Принцип дії розглянутої установки наступний: паливо впорскується у циліндр двигуна паливною форсункою, займається завдяки високій температурі стисненого повітря і згоряє.

У цей момент сила, що діє на поршневі групи з боку дизельного і компресорних циліндрів, перевищує протилежно спрямовану силу з боку буферних порожнин, тому поршневі групи починають рухатися назовні. Закриваються нагнітальні, потім відкриваються всмоктувальні клапани, і відбуваються наповнення компресорних порожнин свіжим повітрям і стиснення повітря у замкнених буферних порожнинах. Відкриваються випускні, а потім продувальні вікна, здійснюється вихлоп, і починається продувка дизельного циліндра. Утворені продукти згоряння через газозбірник, у якому змішуються з надмірним продувним повітрям, підводяться до турбіни, яка розвиває механічну енергію, що передається споживачу – гребному гвинту. Тиск газу на вході до турбіни становить 0,3…0,5 МПа. На одну газову турбіну може працювати декілька ВПГГ. Зворотний хід поршневих груп здійснюється внаслідок розширення повітря, стисненого у буферних порожнинах. Всмоктувальні клапани закриваються, і у компресорних циліндрах розпочинається стиснення повітря. Потім закриваються продувальні й випускні вікна, відбуваються стиснення повітря у дизельному циліндрі, відкриття нагнітальних клапанів і нагнітання стисненого повітря у ресивер. Потім паливо впорскується у дизельний циліндр і цикл повторюється.

У ГТУ з ВПГГ поєднувалися переваги дизеля, для якого характерні високі тиски й температури початку розширення робочого тіла, і газової турбіни, що дозволяє отримувати високі ступені розширення в ділянці низьких тисків і помірних температур. Унаслідок цього для них характерна порівняно висока економічність. У той же час серед недоліків ГТУ з ВПГГ виділяють наступні: більші маса й габарити, ніж у звичайних турбокомпресорних ГТУ; обмежена агрегатна потужність ВПГГ, що ускладнює створення потужних СЕУ. Разом із цим збільшення кількості ВПГГ, які обслуговують турбіну, ускладнює розташування установки на судні та її обслуговування. Але на той час, коли з'явилися та були застосовані на суднах перші ГТУ з ВПГГ, вони мали певну перевагу перед ДВЗ і ГТД, які знаходилися на рівні можливостей техніки 50-х рр. XX ст.

Газотурбінні установки з ВПГГ для суднового застосування створювалися головним чином у Франції. Перший судновий агрегат цього типу був установлений у 1951 р. на тральщику французького військово-морського флоту. Уперше транспортні цивільні судна, оснащені газотурбінними установками з ВПГГ, також з'явилися у Франції. Ними стали

невеликі вантажні судна (дедвейтом по 850 т) «Cantenac» і «Merignac», уведені в експлуатацію у 1954 р. На цих суднах дві газові турбіни, газ на які надходить від ВПГГ, передають через загальний редуктор сумарну потужність у 1320 кВт гребному гвинту [1].

Зацікавленість американських суднобудівників можливостями ГТУ з ВПГГ привела до того, що одне із суден типу «Liberty» – «William Patterson» у дослідницьких цілях було переобладнане під таку установку (рис. 6.5), замість парових машин потужністю 1760 кВт [1].

Після модернізації ГТУ потужністю 4400 кВт забезпечувала судну швидкість 16,7 вузлів (раніше було 10 вузлів) за витрати палива 30,7 т/добу, питома витрата палива на повному навантаженні складала 254 г/(кВт · год).

Відповідно до прийнятої схеми установки, від шести поруч розташованих ВПГГ газ із тиском біля 0,3 МПа і температурою біля 710…730 К підводиться до двох газових турбін загальним трубопроводом. Обидві турбіни, кожна з яких має шість ступенів переднього і два заднього ходів, працюють на гребний вал через редуктор. Частота обертання турбіни і гвинта, відповідно, 5500 та 101 об/хв.

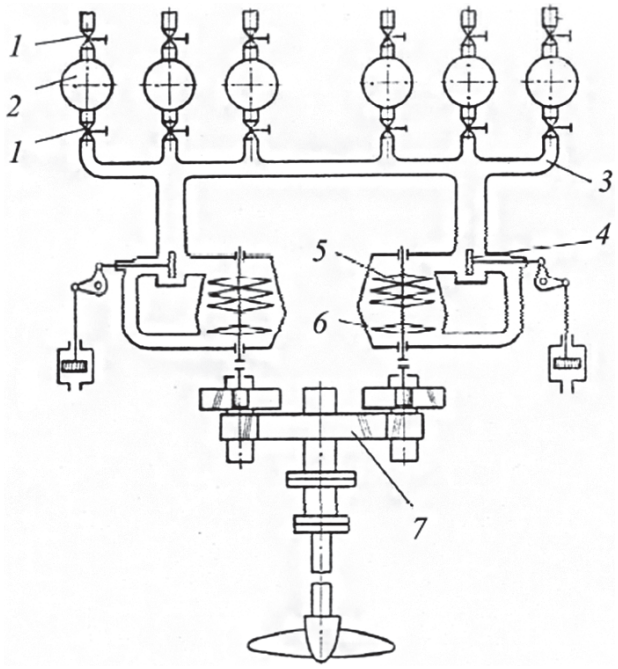


Рис. 6.5. Схема газотурбінної установки з ВПГГ на судні «William Patterson»:
1 – запірні клапани; *2* – газогенератор; *3* – трубопровід підведення газу до турбін;
4 – клапан реверсу ходу; *5*, *6* – турбіни відповідно переднього та заднього ходів;
7 – редуктор

Турбіни були встановлені фірмою «Alsthome», ВПГГ – фірмами «Sigma» (Франція) та «Clevelend Diesel» (США).

У 1957 р. у Західній Німеччині ГТУ з ВПГГ був оснащений траулер тоннажем 720 т. Енергетична установка траулера складається з двох ВПГГ (кожний потужністю 736 кВт) та газової турбіни (рис. 6.6). Установка працювала на важкому паливі з ККД біля 35 %, що відповідало питомій витраті палива 250 г/(кВт · год).

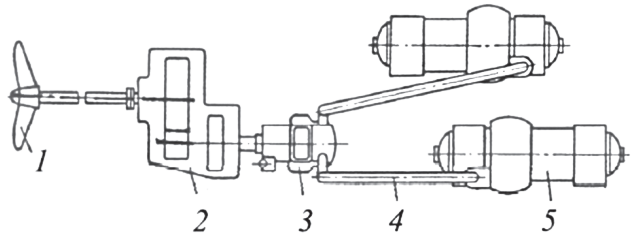


Рис. 6.6. Схема газотурбінної установки з ВПГГ траулера:
1 – судновий гвинт; *2* – редуктор; *3* – газова турбіна; *4* – трубопровід; *5* – генератор газу

На декількох лісовозах дедвейтом 5400 т у 1958 р. були встановлені ГТУ з ВПГГ французької фірми «Sigma». Установка складається із чотирьох ВПГГ, реверсивної газової турбіни із шістьома ступенями тиску переднього і двома – заднього ходів та редуктора. Загальна потужність установки дорівнює 2920 кВт, питома витрата палива складає 270 г/(кВт · год).

Не залишилися сторонніми спостерігачами і японці. У 1961 р. фірмою «Nippon Kokaj» було побудовано буксир «Hiriu Maru» з ГТУ з ВПГГ. Енергетична установка судна довжиною 32,46 м, шириною 8,5 м, осадкою 3,0 м та водотоннажністю 387 т складалася з двох ВПГГ типу GS31, виготовлених за ліцензією фірми «Sigma», двох газових турбін марки NKKL10, які через два двоступеневих редуктори обертають ГРК. Максимальна потужність турбіни – 736 кВт, температура газу перед турбіною – 723 К.

Застосування ГТУ з ВПГГ на суднах мало певні особливості. Так майже всі ВПГГ унаслідок конструктивних обмежень були розраховані на забезпечення потужності не більше 736 кВт на валу турбіни, для отримання більших потужностей паралельно підключалася необхідна кількість ВПГГ, які незалежно один від одного спрямовували свій газ у спільну турбіну або у декілька турбін. Крім того, для цих енергетичних установок характерне значне тепловиділення: у машинному відділенні «Павлина Виноградова» температура повітря не знижувалася нижче 45 °С. Усе це дуже звужувало коло суден, на яких могли використовуватися ГТУ з ВПГГ, навіть незважаючи на достатньо високий ККД (36…40 %). Із середини 60-х рр. нові ГТУ з ВПГГ на суднах не застосовувалися.

6.2. Принципові та структурні схеми суднових ГТА

Розглянемо принципові та структурні схеми суднових ГТА, які є придатними до використання на суднах.

Найпростіша схема суднового газотурбінного агрегата зі згорянням палива за постійного тиску наведена на рис. 6.7. Компресор всмоктує повітря з атмосфери, стискує його й подає до камери згоряння, відкритої як з боку входу повітря, так і з боку виходу продуктів згоряння. До камери згоряння подається паливо, яке розпилюється форсункою, воно змішується з потоком повітря і згоряє за постійного тиску. Продукти згоряння за високої температури надходять до газової турбіни, у якій розширюються від початкового тиску, що приблизно дорівнює тиску за компресором, до атмосферного. Під час розширення продуктів згоряння відбувається перетворення їх внутрішньої енергії на механічну роботу.

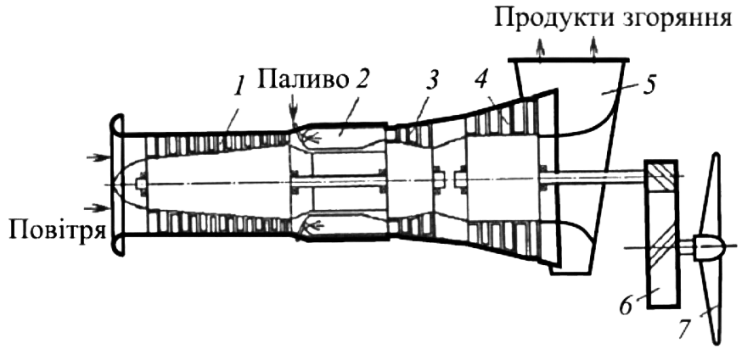


Рис. 6.7. Схема ГТА зі згорянням за постійного тиску:
1 – компресор; *2* – камера згоряння; *3* – турбіна приводу компресора; *4* – турбіна гвинта; *5* – газовідвідний пристрій; *6* – редуктор; *7* – ГГ

Відношення тисків у турбіні й компресорі майже однакове. Але робота турбіни перевищує роботу компресора, тому що вона пропорційна абсолютній температурі робочого тіла, а температура газів у турбіні значно вища від температури повітря в компресорі. Частина роботи турбіни витрачається на обертання компресора, а інша (надмірна) – передається споживачеві, тобто судновому гвинту через передачу – зубчастий редуктор.

Пуск ГТД здійснюється стартером, який обертає вал двигуна до тих пір, поки потужність, яку розвиває турбіна, не перевищить потужності, необхідної для приводу компресора. Паливоповітряна суміш у камері згоряння займається за допомогою пускових блоків, які поєднують запалювальну електричну свічку і пускову форсунку.

На рис. 6.8 наведена схема ГТА з двигуном, у якому відбувається згоряння палива за постійного об'єму. Основна відмінність від попередньої схеми полягає у конструкції камери згоряння, яка обладнана клапанами на вході повітря і на виході продуктів згоряння. Повітря, яке виходить з компресора *1*, через відкритий впускний клапан *2* надходить у камеру згоряння *4*, при цьому клапан на виході з камери згоряння закритий. Після заповнення повітрям камери згоряння до форсунки *3* надходить паливо і відбувається займання горючої суміші від електричного запального пристрою. Таким чином, згоряння палива відбувається в замкненому просторі, що призводить до підвищення тиску в процесі згоряння.

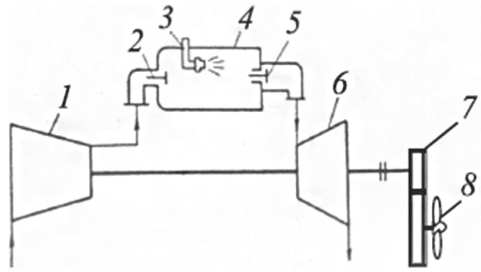


Рис. 6.8. Схема ГТА зі згорянням за постійного об'єму

Наприкінці процесу згоряння відкривається випускний клапан *5* і продукти згоряння надходять на турбіну *6*. Потужність через редуктор *7* передається на рушій *8*.

Коли тиск газів у камері стане нижчим за тиск на виході з компресора, відкривається повітряний клапан і до камери входить повітря, яке витісняє продукти згоряння. До речі, це повітря може забезпечити охолодження нагрітих елементів проточної частини. Після закриття впускного і випускного клапанів процес повторюється. Застосування для однієї турбіни декількох камер згоряння, окремі фази процесів у яких зсунуті за часом, дозволяє забезпечити неперервне підведення газів на робоче колесо.

Зважаючи на те, що під час згоряння палива у закритій камері згоряння відбувається підйом тиску, ГТУ, у принципі, могла б працювати навіть без компресора або із застосуванням низьконапірного вентилятора, але здебільшого до складу газотурбінної установки зі згорянням за постійного об'єму входить і компресор.

Усі сучасні газотурбінні двигуни працюють за схемою зі згорянням за постійного тиску. Структурні схеми газотурбінних агрегатів простого циклу (коли до складу ГТД входять тільки компресори – один чи два, одна камера згоряння та одна, дві або три турбіни) наведені на рис. 6.9.

Блокована схема (рис. 6.9,***а***) є найбільш конструктивно простою. У цій схемі передбачається одна турбіна, яка виконує дві функції: привід компресора і привід гребного гвинта. Характерною особливістю такого ГТД є залежність частоти обертання компресора від характеристики рушія. Під час запусків і роботі на часткових режимах блокована схема потребує зниження навантаження, що вимагає застосування електро-, гідропередачі або ГРК. Двигуни, виконані за такою схемою, застосовують в агрегатах, які працюють зазвичай на номінальних навантаженнях, тобто для застосування в суднових умовах вони непридатні. Поряд із цим ГТД, виконані за такою схемою, знаходили застосування на ранніх етапах розвитку суднових ГТД.

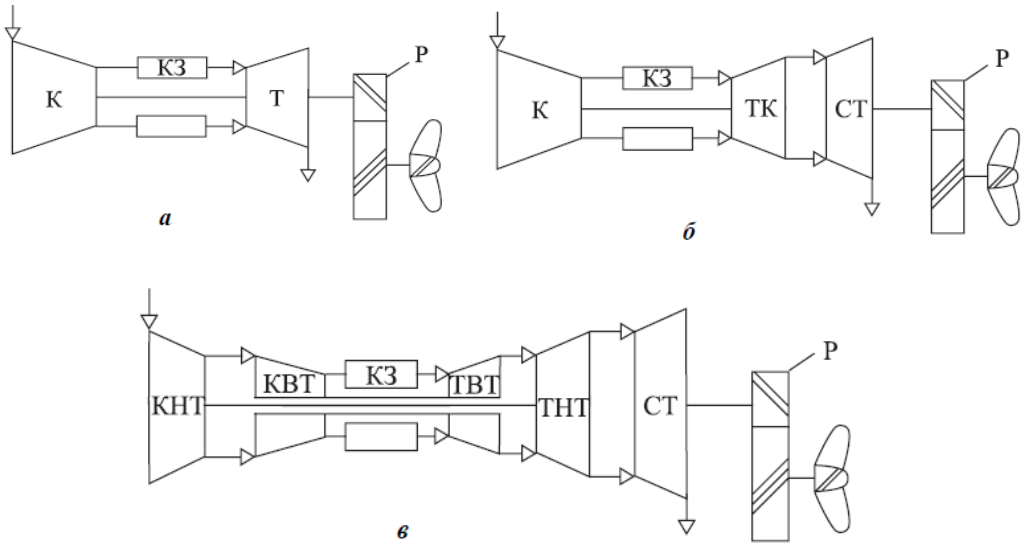


Рис. 6.9. Структурні схеми газотурбінних агрегатів простого циклу:
К – компресор; КЗ – камера згоряння; Т – турбіна; ТК – турбіна компресора;
СТ – силова турбіна; Р – редуктор

Схема з вільною силовою турбіною (рис. 6.9,***б***), яка пов'язана з робочим трактом двигуна лише газодинамічно й виконує тільки одну функцію – привід рушія, позбавлена від недоліків, характерних для ГТД, виконаних за блокованою схемою. За однокаскадною схемою (каскад – це сукупність компресора і турбіни, яка його приводить у дію) з вільною силовою турбіною виконані ГТД фірми «General Electric» LM1600, LM2500, ГТД типу MS.

Двокаскадна схема з вільною силовою турбіною (рис. 6.9,***в***) дозволяє отримати необхідну міру підвищення тиску, якої вимагає висока початкова температура газів, і забезпечити роботу кожного компресора

в оптимальних умовах. Компресор такого ГТД складається з двох компресорів: низького та високого тисків, включених послідовно. Ці компресори приводяться до обертання кожен своєю турбіною: КНТ і КВТ – відповідно турбінами низького й високого тисків, а вільна силова турбіна виробляє корисну потужність. Сукупність компресорів, турбін, які їх приводять у дію, а також камери згоряння утворює газогенератор. Розташування обох компресорів в одному корпусі, а також розміщення у загальному корпусі всіх трьох турбін (прямоточна схема) дозволяють забезпечити компактну конструкцію ГТД і знизити втрати тиску повітря і продуктів згоряння. Така схема характерна для всіх суднових і корабельних двигунів вітчизняного виробництва, ГТД фірми «Rolls-Royce», «Pratt & Whitney».

Газотурбінні агрегати простої схеми за існуючого рівня початкових температур у циклі мають відносно невисоку теплову ефективність: максимальний ККД таких агрегатів за початкових температур газу до 1525 К не перевищує 38 % [1, 34]. З метою підвищення ККД застосовують наступні способи ускладнення схем і циклів ГТА:

проміжне охолодження повітря в процесі підвищення тиску;

регенерація теплоти відхідних газів ГТД;

проміжний підігрів газу в процесі розширення;

використання теплоти відхідних газів ГТД в паротурбінному теплоутилізаційному контурі (ТУК);

утилізація теплоти відхідних газів ГТД з організацією його роботи за контактним газопаротурбінним циклом.

Забезпечення проміжного охолодження повітря в процесі підвищення тиску конструктивно досягається застосуванням проміжного повітроохолоджувача (ППО) (рис. 6.10), теплообмінного апарату поверхневого типу, що прокачується забортною водою.

Після частини ступенів компресора К1 повітря з підвищеною внаслідок стиснення температурою підводиться в ППО, де охолоджується забортною водою, і надходить на вхід другої частини компресора К2. На цьому і наступних рисунках, на яких зображені ГТА складних схем, прийняті наступні позначення: ПК – паровий конденсатор; ПГК – парогазовий конденсатор; УПТ – утилізаційна парова турбіна; ЗВ – забортна вода; РГ – регенератор.

У діапазоні початкових температур газів $T_3 = 1100…1400$ К величина ККД агрегата з проміжним охолодженням повітря становить 33…38 %.

Економічність ГТА може бути значно підвищена введенням у схему додаткового теплообмінного апарата, у якому здійснюється підігрів циклового повітря після компресора перед подачею його до камери

згоряння за рахунок теплоти відхідних газів ГТД (рис. 6.11). Такий теплообмінник має назву *регенератора* (іноді його іменують «*рекуператор*» – від теплообмінного апарата рекуперативного типу), а ГТА називається *газотурбінним агрегатом з регенерацією теплоти відхідних газів.*

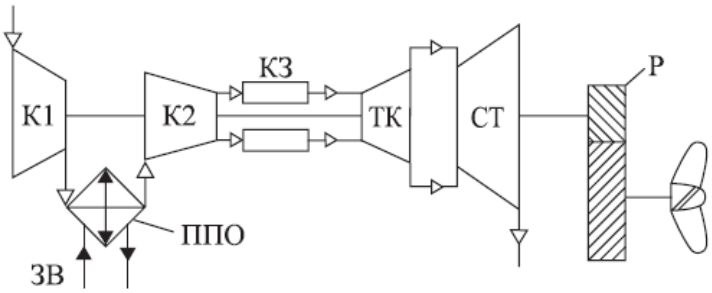


Рис. 6.10. Схема суднового ГТА з проміжним охолодженням повітря

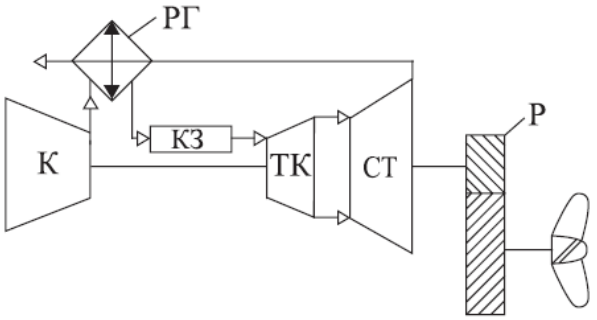


Рис. 6.11. Схема суднового ГТА з регенерацією теплоти відхідних газів

В інтервалі початкових температур газів $T_3 = 1100…1400$ К коефіцієнт корисної дії циклу ГТА може до сягати рівня 34…40 %. Таке помітне, порівняно з ГТА простої схеми, підвищення ККД пояснюється економією палива на підігрів циклового повітря за рахунок використання надмірної теплоти відхідних газів ГТД.

У судновій практиці є приклади застосування ГТА з регенерацією теплоти відхідних газів (ГТА танкерів «Auris», «Shevron Oregon», суховантажника «John Sergeant», порома «Seaway Prince»), але більш поширеним є поєднання в одному агрегаті як проміжного охолодження повітря, так і регенерації (перші експериментальні ГТА 50-х рр.: ГТУ-20 суховантажного судна, ГТА WR21 спільного виробництва фірм «Westinhouse» та «Rolls-Royce»). Доцільність такого кроку пояснюється тим, що у цьому варіанті найбільш повно проявляються переваги обох засобів підвищення ефективності суднових ГТА.

Шляхом включення у схему агрегата додаткової камери згоряння, яка має назву «*камера згоряння проміжного підігріву газів*» (КЗПП), можна досягти значного підвищення потужності й помірного підвищення ККД агрегата (рис. 6.12). У цій схемі перша за ходом повітря камера згоряння називається *основною камерою згоряння*, друга камера згоряння – КЗПП – розміщується між турбінами.

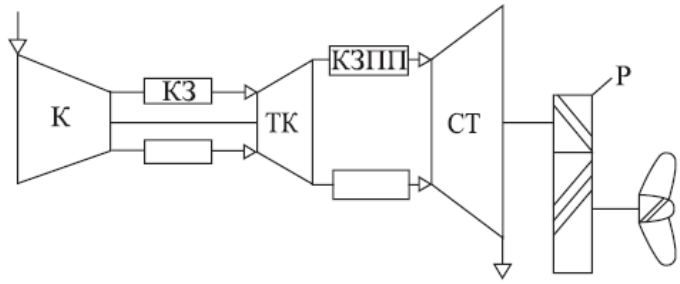


Рис. 6.12. Схема суднового ГТА з проміжним підігрівом газу

Збільшення ККД такої схеми порівняно з ГТА простої схеми складає 1,0…1,5 %, питома потужність на 15…20 % більша [34]. Застосування ГТА, виконаних за схемою з проміжним підігрівом газів, у судновій практиці поки що не набуло.

Найбільш ефективним рішенням стосовно підвищення ККД суднових ГТА є поєднання у схемі агрегата газотурбінного циклу Брайтона з паротурбінним циклом Ренкіна. Це рішення реалізується у ГТА з використанням теплоти відхідних газів у паротурбінному теплоутилізаційному контурі (рис. 6.13). Скорочена назва такої схеми – «*ГТА з паротурбінним ТУК*».

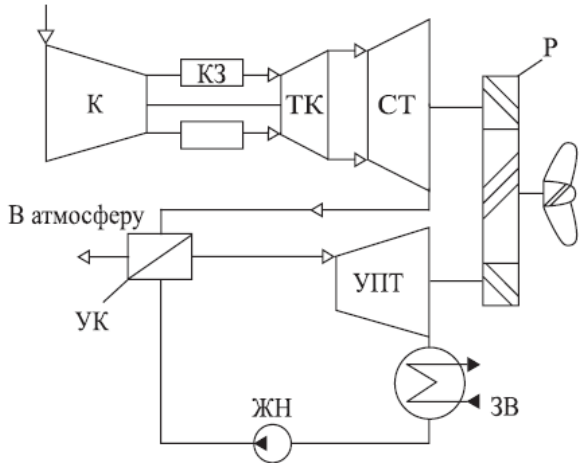


Рис. 6.13. Схема суднового ГТА з паротурбінним ТУК

До складу розглянутого агрегата входять ГТД простої схеми, відхідні гази якого спрямовуються в УК, який генерує перегріту водяну пару відносно невисоких параметрів. Отримана пара подається на утилізаційну парову турбіну, яка спільно з ГТД працює на підсумовувальний редуктор. Відпрацьована в УПТ пара скидається у вакуумний паровий конденсатор, охолоджується забортною водою, унаслідок чого пара конденсується. Отриманий конденсат живильним насосом подається в УК.

У діапазоні початкових температур газу $T_3 = 1100…1500$ К коефіцієнт корисної дії для агрегата з паротурбінним ТУК може досягати 36…45 % [34]. Така висока ефективність ГТА з ТУК порівняно з агрегатом простої схеми пояснюється тим, що без додаткових витрат палива, тільки за рахунок використання теплоти відхідних газів двигунів в УПТ може бути отримано до 25 % потужності всього комбінованого ГТА.

За такою схемою виконані ГТА газотурбінних енергетичних установок чотирьох суден з горизонтальною обробкою вантажу (ролкерів) типу «Атлантика», побудованих у Миколаєві.

Схема ГТА, яка передбачає поєднання циклів Брайтона і Ренкіна, але без конструктивного виділення ГТД і ТУК, наведена на рис. 6.14. Агрегат, виконаний за такою схемою, називається *контактним ГТА з ТУК*.

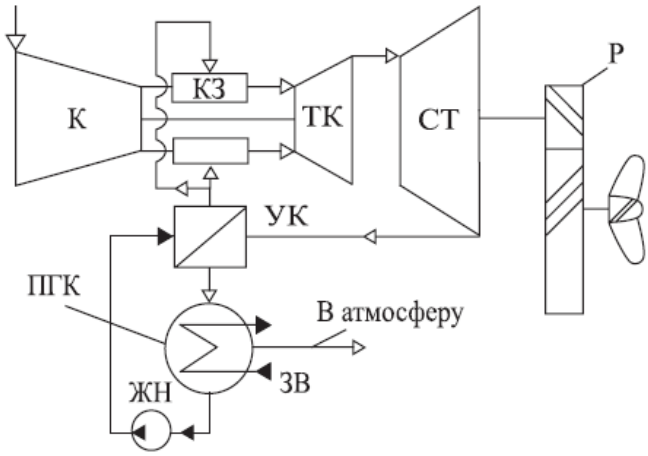


Рис. 6.14. Схема суднового контактного агрегата з ТУК

Основним елементом агрегата з ТУК є газотурбінний двигун простої схеми, відхідні гази якого забезпечують генерування пари в УК. Отримана водяна пара подається до камери згоряння. Утворена там газопарова суміш розширюється послідовно в турбіні компресора й силовій турбіні, проходить через УК, де віддає частину теплоти пароводяному робочому тілу, після чого надходить у парогазовий конденсатор.

Цей конденсатор працює за атмосферного тиску й прокачується забортною водою. У конденсаторі значна частина води, уведеної в цикл і утвореної під час згоряння палива, конденсується і живильним насосом подається в УК, а майже повністю збезводнені продукти згоряння викидаються до атмосфери.

У діапазоні початкових температур газів $T_3 = 1100…1500$ К ефективний ККД контактного газотурбінного агрегата (КГТА) з ТУК складає 35…46 %. Така висока ефективність КГТА з ТУК пояснюється глибокою утилізацією теплоти відхідних газів ГТД і високою початковою температурою пари у пароводяному циклі [34]. Розглянута схема КГТА з ТУК реалізована в агрегатах типу «Водолій», які створені й випускаються серійно на вітчизняному підприємстві НВКГ «Зоря»–«Машпроєкт».

6.3. Заснування та розвиток суднового газотурбобудування у країнах Заходу та США (50-ті роки XX ст.)

Застосування ГТД на суднах пов'язане зі специфічними вимогами: необхідністю регулювання частоти обертання для маневрування судна та здійснення реверсу ходу судна. Для забезпечення цих вимог до складу ГТУ можуть включатися турбіни чи ступені заднього ходу, реверсивні передачі й, нарешті, гвинт регульованого кроку, який за допомогою розвороту лопатей забезпечує як реверс судна, так і безступеневе регулювання швидкості його руху в діапазоні між повним вперед та повним назад.

Для певних класів суден (здебільшого це військові кораблі) доцільним може бути застосування комбінованого приводу – дизель у комбінації з газотурбінним двигуном. При цьому ГТД включається у роботу тільки для отримання максимальної швидкості. Першим судном, яке було обладнане газотурбінним двигуном, є канонерський човен англійського військово-морського флоту, енергетична установка якого попередньо складалася з трьох дизелів фірми «Packard» потужністю по 900 кВт, кожен з яких працював на свій гвинт. У 1947 р. середній з трьох дизелів був замінений конвертованим авіаційним газотурбінним двигуном.

Історична довідка. Високий рівень авіаційного газотурбобудування, досягнений у період після Другої світової війни, і стрімкий розвиток конструкційної досконалості авіаційних двигунів привели до зацікавленості проєктантів енергетичних установок у використанні авіаційних ГТД для суден та кораблів. Для забезпечення такої можливості авіаційні двигуни повинні бути прилаштовані (конвертовані, від англ. «converting» – перетворення) для роботи у суднових умовах. Майже всі перші газотурбінні двигуни зарубіжного виробництва були конвертованими, такими ж були і значна

кількість суднових двигунів, що виготовлялися як у подальшому, так і у сучасний період. Більшість зарубіжних компаній, основним спрямуванням яких є створення авіаційних двигунів, мають спеціалізовані підрозділи «Marine Division», які розробляють паралельно з проєктуванням авіаційних двигунів варіанти конвертування їх до морських умов. У процесі конвертування, зважаючи на те, що морські ГТД потребують значно більшого ресурсу, ніж авіаційні, знижується температура газів перед турбіною високого тиску; переоблаштовуються системи регулювання у зв'язку з роботою на більш в'язкому паливі; підсилюються підшипникові вузли, ураховуючи підвищені навантаження під час шторму та значному хвилюванні; застосовується система очищення повітря, яке надходить з навколишнього середовища до ГТД, від водяних аерозолів.

Перше у світі морське застосування газотурбінного двигуна пов'язане з кораблем, який брав участь у Другій світовій війні, наприкінці 1943 на початку 1944 рр. Британія відчувала значну залежність від постачань підшипників кочення фірмою «SKF» (Швеція). Блокування германськими військово-морськими силами водних комунікацій не дозволяло британським суднам дістатися Швеції, а партії підшипників, що перевозилися літаками, були занадто малими. Для прориву цієї блокади застосовували високошвидкісні кораблі (класу малих вартових кораблів), на яких було встановлено по три шістнадцятициліндрових дизеля фірми «Paxman» потужністю по 900 кВт, кожен з яких працював на свій гвинт. За невеликий період часу завдяки дії цих кораблів було доставлено до Британії більше 350 т підшипників. У 1947 р. на одному із цих кораблів під назвою «MGB 2009» для приводу центральної лінії валопроводу було застосовано ГТД, два інші вали приводилися, як і раніше, штатними дизелями [20].

Ці роботи проводилися в рамках контракту військово-морських сил Англії з фірмою «Metropolitan Vickers» на створення трьох корабельних ГТД «Gutrik» (G1) потужністю 1840 кВт кожен на базі турбореактивного двигуна F2. У процесі конвертування ТРД за турбіною базового турбокомпресорного агрегата була установлена силова турбіна, яка була пов'язана з компресорною тільки газодинамічно і обертала середній гвинт корабля. Газотурбінний двигун використовувався як прискорювальний. Випробування у морських умовах показали питому витрату палива у 646 г/(кВт · год), ККД циклу становив біля 13 %. Питома маса установки (відношення маси установки до номінальної потужності) складала 3,4 кг/кВт.

Позитивні результати випробувань сприяли отриманню у 1948 р. фірмою «Metropolitan Vickers» державного замовлення на створення чотирьох газотурбінних двигунів G2 потужністю по 3300 кВт, призначених для швидкісних патрульних кораблів серії «Bold». Конструктивною базою двигунів G2 став авіаційний ТРД «Berill», до якого була застосована програма конвертування, що передбачала поряд з іншим заміну реактивного сопла триступеневою силовою турбіною.

Енергетична установка корабля була чотиривальною: два ГТД і два дизелі працювали кожен на свій вал. Уже в 1952 р. пройшли успішні випробування ГТУ у складі корабельної енергетичної установки. Були досягнені наступні показники: питома витрата палива на номінальному

режимі 490 г/(кВт · год), що відповідає ККД біля 16 %. Такі ГТУ були встановлені на патрульних кораблях «Bold Pioneer» і «Bold Pathfinder». Газотурбінна установка виконана однокомпресорною, із силовою турбіною низького тиску. Міра підвищення тиску становила 6,3, температура газів перед ТВТ – 1073 К, питома маса – 1,32 кг/кВт, моторесурс ГТУ складав 1000 год, після чого замінювали окремі вузли.

Застосування ГТД як прискорювальних у корабельній енергетиці 50-х рр. було виправданим, це дозволяло раціонально використовувати обмежений ресурс двигунів, який на ті часи не перевищував декількох сотень годин, а також експлуатувати двигун переважно на номінальній потужності (на часткових режимах питома витрата палива ГТД «Gutrik» за навантаження 10 % від номінального становила 2,04 кг/(кВт · год).

У ці часи низка країн робить спроби створення всережимних газотурбінних установок. Так ще в 1946 р. фірма «English Electric» почала створення ГТД EL60A потужністю 4700 кВт, призначеного для використання як усережимної установки правого борту фрегата «Horthem». Двигун був виконаний за схемою з одноступеневим стисненням та розділенням витрати повітря, з регенерацією у кожній гілці. За конструкцією ГТД був багато в чому близький до конструкції корабельних парових турбін. За початкової температури продуктів згоряння 978 К питома витрата палива повинна була становити 426 г/(кВт · год). До стендових випробувань ГТД приступили у 1951 р., але в цей час були отримані перші результати випробувань двигуна RM60, які були значно кращими, унаслідок чого подальші роботи зі створення ГТД EL60A були перервані [1].

Саме в середині 1951 р. розпочалися стендові випробування газотурбінного двигуна RM60, виготовленого англійською фірмою «Rolls-Royce». Цей двигун призначався для використання як усережимний для канонерського човна «Grey Goos» водотоннажністю 250 т. У 1955 р. на кораблі було змонтовано дві ГТУ RM60 фірми «Rolls-Royce» потужністю по 4000 кВт. Ці установки працювали за циклом з трьома ступенями стиснення, двома ступенями проміжного охолодження повітря, трьома ступенями розширення і регенерацією теплоти відхідних газів (рис. 6.15). Усе це разом з високими параметрами циклу дозволило забезпечити достатньо високу, на ті часи, економічність на часткових навантаженнях. Температура газу перед турбінами дорівнювала 1100 К, міра підвищення тиску – 18,5. Під час проєктування двигуна був використаний досвід фірми «Rolls-Royce» у створенні авіаційних ГТД, що дозволило забезпечити питому масу газотурбінної установки на рівні 1,76 кг/кВт. До цього корабель був оснащений двома паротурбінними установками, які за потужності меншій на 35 % мали на 50 % більшу масу.

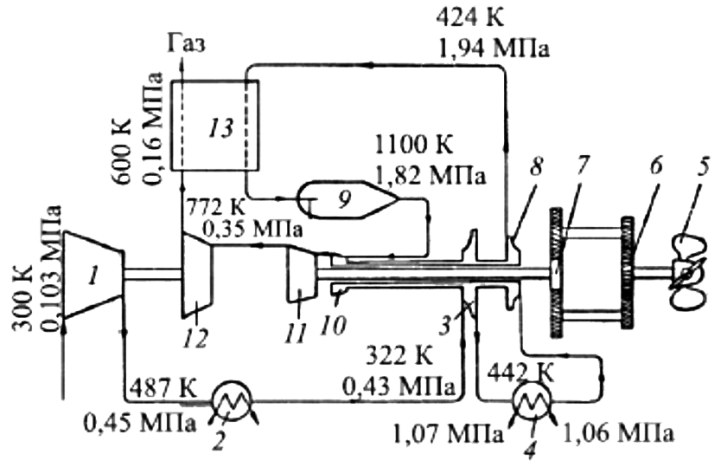


Рис. 6.15. Принципова схема газотурбінної установки RM60:
1 – КНТ; *2*, *4* – повітроохолоджувачі відповідно низького і високого тисків; *3* – компресор середнього тиску; *5* – ГРК; *6*, *7* – другий та перший ступені редуктора; *8* – КВТ; *9* – камера згоряння; *10*, *11*, *12* – ТВТ, ТСТ, ТНТ; *13* – регенератор

Питома витрата палива на номінальній потужності становила 408 г/(кВт · год), що відповідало ККД циклу близько 21 %. Пуск ГТД здійснювався електричним стартером – двигуном потужністю 30 кВт, який розкручував вал ТВТ через зубчасту передачу. Термін пуску з холодного стану до режиму повного ходу становив 30 с. Реверс забезпечувався ГРК. Установка була експериментальною і мала ресурс 1000 год.

Якщо розглянуті вище газотурбінні двигуни мали експериментальний характер і виготовлялися одиничними екземплярами, то першим великого поширення у 50-х рр. набув ГТД «Protey 1260», створений шляхом конвертування авіаційного турбогвинтового двигуна «Protey» фірми «Bristol Syddly», призначений для використання як головного двигуна на торпедних і ракетних катерах країн НАТО. Торпедні катери класу «Breive» у довжину мали 30 м і були облаштовані трьома гвинтами, кожен з яких приводився газотурбінним двигуном «Protey 1260» потужністю по 2800 кВт. Розташовані у кормовій частині судна три ГТД забезпечували катеру швидкість понад 50 вузлів (рис. 6.16).

Питома маса двигуна «Protey 1260» без редуктора становила 0,46 кг/кВт, експлуатаційний ресурс перевищував 2000 год. Питома витрата палива за повного навантаження складала близько 370 г/(кВт · год), що відповідає ККД циклу 20,3 %.

Газотурбінний двигун «Protey 1260» має 12-ступеневий осьовий компресор, останнім ступенем якого є відцентровий компресор. Вісім трубчастих камер згоряння розташовані рівномірно по колу навкруги осі

двигуна, повітря до них надходить з останнього ступеня компресора після повороту на 90°. Турбіни компресора і силова турбіна виконані двоступеневими. Потужність ТНТ через пустотілий вал каскаду високого тиску і планетарний редуктор передається гребному гвинту.

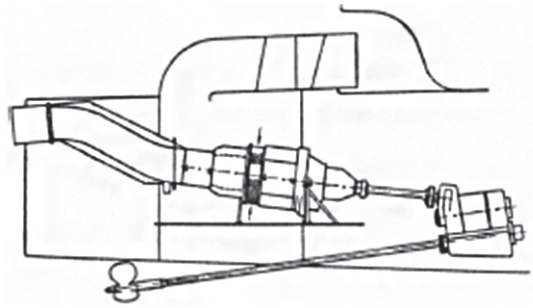


Рис. 6.16. Компонування газотурбінної установки «Protey 1260» на торпедному катері

Запас палива, розташованого в паливних цистернах ємністю 25,4 т, забезпечує радіус дії газотурбінного торпедного катера за крейсерського ходу близько 750 км. Цікавим було конструктивне рішення газовідвідної системи, згідно з яким відпрацьовані гази кожного двигуна відводилися в окремий випускний трубопровід, розташований на кормі катера [64]. Завдяки реакції цих газів утворюється додаткова потужність, яка на швидкості 93 км/год підвищує загальну потужність на 125 кВт, що забезпечує зниження питомої витрати палива майже на 4 %.

Позитивні результати випробувань суднових ГТД «Gutrik», «G2», «Protey 1260» привели до створення більш потужного двигуна, який повинен був стати частиною комбінованої суднової парогазотурбінної установки. І парова турбіна, і газотурбінний двигун передавали потужність на вал ГГ через спільний редуктор, запускалися і зупинялися незалежно один від одного. Цей двигун був виготовлений для використання у складі комбінованих парогазотурбінних установок типу COSAG есмінців та фрегатів. Установки фрегатів виконувалися одновальними, а есмінців – двовальними.

Корисна інформація! Комбінована суднова енергетична установка – це така установка, що складається з двигунів різних типів або однотипних, але різного призначення. Власне поява та поширення комбінованих установок відбулися зі створенням працездатних конструкцій ГТУ, характерними властивостями яких були дуже високі масогабаритні характеристики, але, на жаль, недостатня паливна ефективність. Якщо поєднати в судновій енергетичній установці військового корабля чи швидкісного цивільного судна газотурбінну установку і, наприклад, дизельну (значно меншої

потужності, ніж газотурбінна), то дизель буде забезпечувати основні режими руху судна з помірною швидкістю і з помірною, характерною для дизелів, питомою витратою палива. Газотурбінний двигун, менш економічний, буде забезпечувати рух судна з високими швидкостями. Поруч з наведеним вище, зважаючи на недостатню паливну ефективність і дизелів, і газових турбін на часткових навантаженнях, іноді є доцільним застосування багатомашинних установок, у яких збільшення потужності досягається за рахунок підключення до гребного вала окремих двигунів, кожний з яких експлуатується на номінальному режимі. Існує міжнародна класифікація комбінованих енергетичних установок. У позначеннях застосовуються наступні скорочення: CO – combine – комбінована; G – gas – газотурбінний двигун; S – steam – паротурбінний агрегат; D – diesel – дизель. Літера O – (or) – чи – ставиться між позначеннями двигунів у випадку, коли на режимі максимальної потужності працює тільки прискорювальний (такий, що має більшу потужність) двигун, літера A – (and) – та – застосовується, коли на режимі максимальної потужності працюють як маршовий, так і прискорювальний двигуни. Отже, COSAG, або COSOG, – комбінована парогазотурбінна енергетична установка; CODOG, або CODAG, – комбінована дизель-газотурбінна установка; COGOG, або COGAG, – комбінована газотурбінна енергетична установка.

Двигун потужністю 5500 кВт виконаний за двовальною схемою з вільною силовою турбіною. Тринадцятиступеневий компресор приводився двоступеневою ТВТ, вільна силова турбіна також двоступенева. Температура газів перед ТВТ становила 1066 К. Питома витрата палива складала близько 420 г/(кВт · год), у перерахунку на ККД – це близько 19 %. Запуск ГТД здійснювався стисненим повітрям тиском біля 5 МПа із загальносуднової системи. Розширюючись майже до атмосферного тиску, повітря приводить до руху стартові поршневі двигуни, які через стартовий планетарний редуктор обертають вал турбокомпресора.

Паралельно зі створенням ГТД для військово-морського флоту проводилися експериментальні роботи з питань застосування таких двигунів для суден торговельного флоту.

Одним з перших таких суден став англійський танкер «Auris» компанії «Shell», побудований у 1949 р. Танкер дедвейтом 12 250 т був обладнаний чотирма дизелями фірми «Sulzer», кожен потужністю 810 кВт, які були поєднані муфтами із чотирма електрогенераторами, а генератори – з електричним двигуном потужністю 2750 кВт, що обертав гребний гвинт.

У 1951 р. один з дизелів правого борту цього танкера було замінено всережимною ГТУ фірми «British Tompson Hauston» потужністю 890 кВт з регенерацією теплоти відхідних газів.

Конструктивна схема такої ГТУ показана на рис. 6.17. Осьовий двадцятичотириступеневий компресор стискує атмосферне повітря і подає його до верхнього колектора регенератора. Звідти повітря по трубках проходить, нагріваючись, до двох нижніх колекторів, у яких розміщені камери згоряння. У зоні первинного горіння жарові труби мали керамічне

облицювання. У кожній камері згоряння розташовувалися одна головна й одна пускова форсунки зі свічкою запалювання. З камер згоряння газ надходить спочатку в компресорну ТВТ, потім у ТНТ, яка забезпечує привід генератора постійного струму. Відпрацьовані гази з ТНТ через регенератор виходять з ГТД.

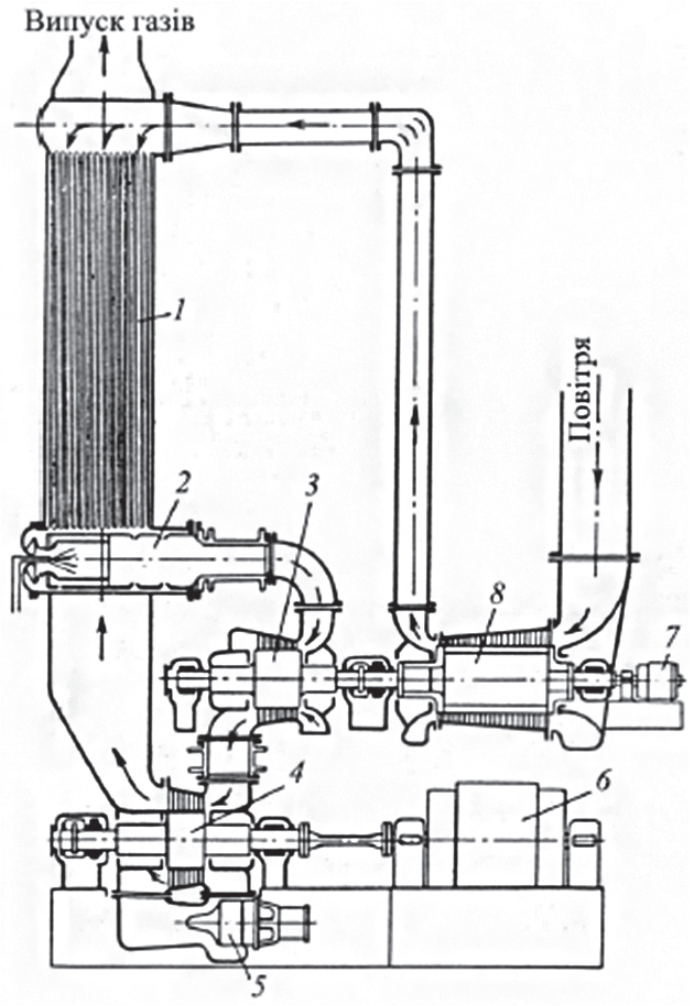


Рис. 6.17. Перша газотурбінна установка танкера «Auris»:
1 – регенератор; *2* – камера згоряння; *3*, *4* – турбіни високого й низького тисків; *5* – байпасний клапан; *6* – електрогенератор; *7* – пусковий двигун; *8* – компресор

Характерною особливістю установки є запозичена з практики паротурбобудування «важка» конструкція багатоступеневих компресорів і турбін з барабанною конструкцією ротора. Це, поряд з наявністю трубчастого регенератора та застосуванням електропередачі, визначило

значну масу ГТУ. Розглянута установка експлуатувалася на танкері «Auris» протягом п'яти років близько 20 500 год, з них 6650 на важкому паливі, за цей час судно пройшло відстань близько 330 000 км. У 1956 р. три дизель-генератори та дослідний ГТД було замінено на нову, більш сучасну ГТУ виробництва тієї ж фірми потужністю 4050 кВт (рис. 6.18) [1].

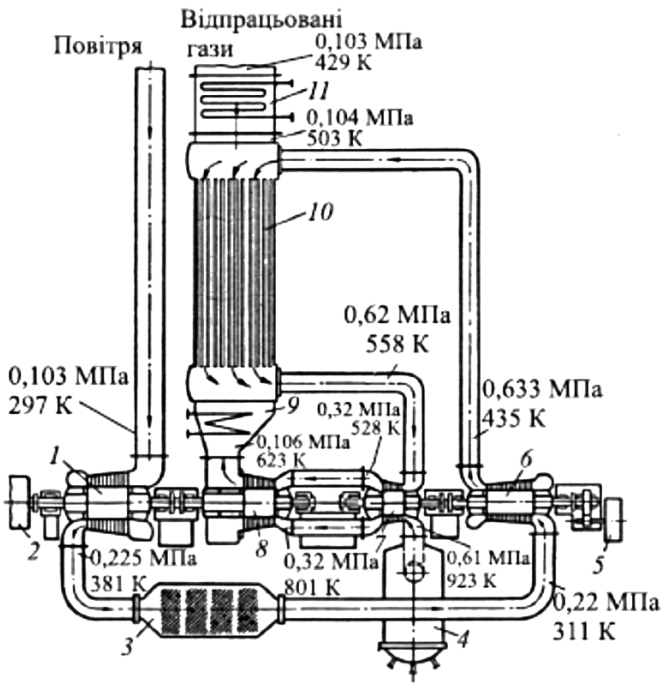


Рис. 6.18. Друга газотурбінна установка танкера «Auris»:
1, *6* – КНТ і КВТ; *2* – редуктор; *3* – проміжний холодильник; *4* – камера згоряння; *5* – пускова турбіна; *7*, *8* – ТВТ і ТНТ; *9* – допоміжний випарник; *10* – регенератор; *11* – УК

Установка працює по відкритому циклу з двоступеневим стисненням, проміжним охолодженням повітря і регенерацією. Турбіна високого тиску приводить КВТ, турбіна низького тиску – КНТ і гребний гвинт. Потужність на гвинт передавалась, на відміну від по переднього проєкту, через двоступеневий зубчастий редуктор з гідро-реверсивною передачею системи Паметрада, яка забезпечувала реверс судна.

На виході з регенератора відхідні гази надходять до утилізаційного парового котла продуктивністю 2,25 т/год за тиску 0,35 МПа, у якому температура газів зменшується з 503 до 429 К. Отримана в котлі пара використовувалася у турбогенераторі (ТГ) потужністю 200 кВт.

Нижче наведені порівняльні характеристики старого та нового агрегатів танкера «Auris»:

	Старий ГТА	Новий ГТА
Максимальна потужність, кВт	890	4050
Загальна міра підвищення тиску повітря	4,0	6,1
Температура газів на вході в ТВТ, К	871	923
Частота обертання, хв$^{-1}$		
ТВТ	6000	5800
ТНТ	2870	3840
Питома витрата палива, г/(кВт · год)	385	307
ККД циклу, %	22	28
Загальна маса (без редуктора), т	46,2	155,0
Питома маса, кг/кВт	52,3	38,4

У складі СЕУ передбачався запасний двигун – парова турбіна потужністю 330 кВт, яка живиться парою тиском 1,26 МПа від допоміжного котла. Судно забезпечується електроенергією паротурбогенератором, на який подається пара з утилізаційного або допоміжного котла. Поряд із цим, в установці передбачений ще один паротурбогенератор на 125 кВт.

Газотурбінний двигун напрацював на танкері 5240 год, випробування та експлуатація продемонстрували його відповідність вимогам, що висуваються до СЕУ. Такий двигун припускав можливість використання важкого палива (за характеристиками воно відповідало мазуту флотському Ф20) [1].

Танкер був в експлуатації до липня 1960 р., коли він був зданий на злам через економічну недоцільність експлуатації.

Середина 50-х рр. XX ст. відзначається запровадженням Морською адміністрацією США програми, метою якої було визначення найбільш досконалого типу енергетичної установки для суден американського торговельного флоту. У межах цієї програми у 1956 р. на транспортному судні «John Sergeant» (типу «Liberty») водотоннажністю 13 825 т була розміщена ГТУ фірми «General Electric» потужністю 4400 кВт.

Це корисно знати! «Liberty» – це найбільш масовий тип вантажних суден часів Другої світової війни. Вони складали основу транспортного флоту союзників антигітлерівської коаліції (Англія, Франція, США) і призначені були здебільшого для перевезення військової техніки, устаткування, продовольства по Ленд-Лізу до колишнього Радянського Союзу. Ленд-Ліз – це система передачі США у позику техніки, товарів, інформації і послуг державам-союзникам по антигітлерівській коаліції. Американські поставки (до 42 країн) на 31 грудня 1945 р. склали біля 46 млрд дол. Поставки до Радянського Союзу складали 9,8 млрд дол. – 14 450 літаків, 7537 танків, 9600 гармат, 89 386 автомобілів.

Термін дії Ленд-Лізу був завершений 25 серпня 1945 р. Зауважимо, що ці поставки не були безоплатними: під час війни і після неї Радянський Союз розраховувався із США за здійснені поставки золотом, цінними породами риб, хутром, дорогоцінним камінням тощо. Такі судна, що будувалися у 1941–1945 рр. на верфях США, назву отримали від англійського пароплава «Empire Liberty», проєкт якого був узятий за прототип. Це були прості за конструкцією і низькі за вартістю судна, у яких вперше була застосована велика кількість стандартизованих елементів конструкцій корпусу, енергетичної установки, комплектуючого устаткування, технологія побудови яких також уперше передбачала широке застосування зварювання. Перше судно «Patrick Henry» було спущено на воду в Балтиморі 27 вересня 1941 р. Термін побудови одного судна був доведений до 40 діб. Рекорд був поставлений на верфі у Річмонді, коли судно було спущено на воду для добудови через 4,5 доби після закладання.

За роки війни було побудовано 2770 суден типу «Liberty» різних модифікацій, з яких у воєнні часи загинуло 200 суден. Характеристика суден типу «Liberty»: дедвейт складав 10 869 т, водотоннажність – 14 360 т, довжина – 134,6 м, ширина – 17,4 м, осадка – 8,5 м, автономність – 13 000 миль, швидкість – 11,5 вузлів, екіпаж – 45 чол. Енергетична установка – парова поршнева машина потужністю 2000 кВт з водотрубними котлами на рідкому паливі.

Агрегат являє собою модифікацію установки, яка використовувалася для газоперекачувальних станцій і електростанцій. Швидкість судна на повному ходу становила 15,9 вузлів.

Газотурбінний двигун виконано за циклом з регенерацією теплоти відхідних газів у протиточному трубчастому регенераторі. Поряд із цим теплота відхідних газів використовується і в УК, причому сам котел розташовується у газоході за регенератором, а пароперегрівник – перед ним. Паропродуктивність котла складала 2,4 т/год за тиску пари 1,6 МПа. Із цієї кількості 0,9 т/год пара надходить на загальносуднові потреби, а 1,5 т/год витрачається на живлення ТГ потужністю 170 кВт. У складі суднової електростанції передбачається допоміжний ДГ такої ж потужності. Запуск установки здійснюється паровою турбіною потужністю 215 кВт, реверс відбувається за допомогою ГРК.

Чотирнадцятиступеневий осьовий компресор приводиться одноступеневою ТВТ. Силова турбіна низького тиску, яка обладнана поворотними соплами, розташована в одному корпусі з ТВТ, через двоступеневий зубчастий редуктор приводить ГРК. Наявність поворотних сопел ТНТ забезпечує регулювання параметрів циклу на часткових навантаженнях і підтримання постійної температури газу для збереження достатньо високого ККД. Регулювання прохідного перерізу сопел дозволяє також поліпшити показники роботи установки в разі зміни температури навколишнього середовища: зменшити обмеження потужності в літній час і уникнути можливого перегріву турбін. Двигун мав температуру газів перед ТВТ 1063 К, міру підвищення тиску повітря в компресорі

$\pi_к = 4{,}9$. За температури повітря 32,3 °С питома витрата палива становила 322 г/(кВт · год) (це відповідає ККД 25 %). Газотурбінна установка напрацювала 9700 год, з них 7000 год – на важкому паливі.

6.4. Заснування та становлення суднового й корабельного газотурбобудування на Україні

Припустимо, що сьогодні, на початку XXI ст. ми звернулися до фахівців у галузі суднової енергетики з трьома питаннями:

– Чи можуть українські підприємства випускати сучасні суднові ДВЗ на рівні світових стандартів?

– Чи можуть українські підприємства випускати сучасні парові турбоагрегати на рівні світових стандартів?

– Чи можуть українські підприємства випускати сучасні суднові газотурбінні двигуни на рівні світових стандартів?

Безумовно, на перші два питання фахівці одноголосно відповідатимуть «Ні, і ніколи не зможуть». Їхня відповідь буде достатньо обґрунтованою, тому що суднові дизелі та суднові ПТ за ліцензією відомих світових виробників виготовляли в Україні востаннє ще до початку Другої світової війни (у Миколаєві), а за цей час промисловість інших країн-виробників згаданих теплових двигунів просунулася в цих питаннях дуже суттєво, і якщо навіть започаткувати таке виробництво в Україні, то шанси наздогнати й випередити розвинені країни – негативні.

У той же час останнє питання заслуговує на позитивну відповідь і запорукою цього є більш ніж 55-річний досвід виробництва суднової і стаціонарної газотурбінної техніки і те положення, яке займає у світовому рейтингу українське суднове газотурбобудування.

А починалось це так … Дослідно-конструкторські бюро в перші післявоєнні роки (40-ві та початок 50-х рр. XX ст.) широко розгорнули роботи зі створення авіаційних ТРД. Однією з ефективних розробок був проєкт головного конструктора С. Д. Колосова турбогвинтового двигуна потужністю 3800 кВт у вигляді однокаскадного турбокомпресора з вільною турбіною повітряного гвинта. Цей двигун привернув увагу проєктантів кораблів військово-морського флоту. У цей час почали створюватися протичовнові кораблі й катери з новими видами озброєння, для яких виникла потреба у легких механічних установках з метою зниження об'єму та маси енергетичного устаткування. Такими установками могли стати тільки агрегати з ГТД авіаційного типу. Саме прямоточна конструкція двигуна С. Д. Колосова і наявність вільної силової турбіни

забезпечували можливість його застосування для приводу ГГ швидкісних катерів і кораблів.

У зв'язку з наведеним вище, уже у 1950 р. було розроблене технічне завдання на створення корабельного ГТД шляхом конвертування двигуна авіаційного типу. До речі, це був перший і останній приклад створення в Україні суднового чи корабельного двигуна шляхом конвертації відповідного авіаційного турбореактивного або турбогвинтового двигуна.

Технічним завданням передбачалося наступне:

пристосування двигуна до роботи в морських умовах;

переведення двигуна на дизельне паливо;

розробка редуктора;

забезпечення приводу редуктора з боку турбіни гвинта;

обладнання ГТД газовідводом, теплоізолюючим кожухом;

модернізування систем змащення та автоматики.

Газотурбінний двигун призначався як прискорювальний для руху катера на максимальній швидкості. На катері були встановлені чотири дизелі, які працювали на бортові гвинти, а посередині ГТД – на середній гвинт.

Потужність газотурбінної установки М-1 (морська, першої модифікації) повинна була становити 2940 кВт (4000 к. с.), питома витрата палива не більше 544 г/(кВт · год), питома маса – 0,68 кг/кВт, ресурс – 100 год.

У 1951 р. відбулися заводські випробування, а потім – 100-годинні здавальні випробування і двигун був допущений до експлуатації на дослідному торпедному катері проєкту 183 ТК. Ходові випробування катера з ГТД почалися у 1951 р. і тривали біля двох років. Була досягнута запланована швидкість катера у 50 вузлів. На підставі проведених випробувань у 1953 р. Державна комісія відмітила, що двигун конструкції С. Д. Колосова є першим газотурбінним двигуном у СРСР і рекомендувала газотурбінну установку М-1 до серійного виробництва та встановлення її на торпедних катерах.

У той же час випробування на торпедних катерах установки М-1 виявили, що експлуатація ГТД у морських умовах суттєво відрізняються від його роботи на літаку. З'ясувалося, що енергетичні установки для кораблів потребують спеціального проєктування і виробництва, які суттєво відрізняються від виробництва авіаційних ГТД. До речі, підприємства Міністерства авіаційної промисловості категорично відмовлялися від виготовлення морського газотурбінного двигуна, посилаючись на велику завантаженість.

7 травня 1954 р. була прийнята Постанова про створення у Миколаєві бази корабельного газотурбобудування. Цією Постановою передбачалася

організація на Південному турбінному заводі (призначенням якого був випуск парових турбін і який знаходився у стадії будівництва) серійного випуску корабельних ГТУ і створення спеціального конструкторського бюро газотурбінних установок (СКБ ГУ). Начальником СКБ ГУ і головним конструктором призначено С. Д. Колосова.

Історична довідка. Сергій Дмитрович Колосов народився 1 квітня 1904 р. у селянській сім'ї. У 1922 р. закінчив Ржевський педагогічний технікум, після чого переїхав до Москви. У 1926 р. призивається в ряди Червоної Армії, після демобілізації у 1927 р. вступає до Московського технічного училища ім. Баумана на аеродинамічний факультет. Після закінчення училища починає працювати помічником начальника складального цеху автодвигунобудівного заводу в Запоріжжі, конструктором, директором Запорізького авіаційного технікуму, в апараті управління Міністерства авіаційної промисловості. У 1935 р. Колосов С. Д. переїздить до Воронежа, де працює інженером-конструктором на заводі авіаційних двигунів. У 1937 р. направляється у відрядження до Франції на авіазавод фірми «Reno», у якої була придбана ліцензія на виготовлення двигуна «Ispano Sjuisa» потужністю 800 к. с., для вивчення досвіду виробництва двигунів. Цього ж року призначений головним конструктором заводу. Під час війни завод з Воронежа евакуюється до Казані. Колосов С. Д. працює начальником серійно-конструкторського заводу.

Після війни організується дослідно-конструкторське бюро (ДКБ) з розробки турбореактивного двигуна РД20, начальником і головним конструктором якого призначається Колосов С. Д. За завданням уряду ДКБ під керівництвом Колосова С. Д. розроблено проєкт турбогвинтового авіаційного двигуна. На жаль, цей двигун не був прийнятий до виробництва, і Колосов С. Д. звертається до Мінсудпрому з пропозицією переобладнати його для кораблів ВМФ. Звернення було успішним, перший зразок морського варіанта ГТД М1 було виготовлено на заводі № 16 Мінавіапрому. Завдяки цьому було прийняте рішення уряду про утворення підприємства з виробництва ГТД і конструкторської організації СКБ ГУ, начальником і головним конструктором якої призначається Колосов С. Д. 14 серпня 1954 р. він з групою конструкторів і досвідчених виробників направляється до Миколаєва на Південний турбінний завод, що будується.

З 1954 р. по 1963 р. під керівництвом Колосова С. Д. було створено п'ять видів ГТУ для надводних кораблів. Одна з них – ГТУ М3 – перша у світі всережимна енергетична газотурбінна установка корабля. Мрії Колосова С. Д. про застосування радянських ГТУ на морському флоті здійснювалися. За визначний внесок у створення і впровадження ГТУ на кораблях ВМФ, йому у 1965 р. спільно з колективом конструкторів присуджена Ленінська премія. У 1963 р. Колосов С. Д. змушений залишити роботу через хворобу. Він пішов з життя у 1975 р. у м. Казань. Колосов С. Д. заслужено вважається батьком радянського морського газотурбобудування.

У жовтні 1955 р. на Південному турбінному заводі (ПТЗ) було здійснено складання першого двигуна М-1 власного виробництва, а у 1956 р. були закінчені міжвідомчі випробування та проведені державні випробування головного торпедного катера 183 ТК із серійним ГТД. За період з 1956 по 1958 рр. заводом були виготовлені 34 серійні газотурбінні установки М-1, у 1958 році їх випуск припинений.

У ці роки визначилися два напрямки розвитку корабельних та суднових ГТУ. Перший з них – створення установок «важкого типу» за складною тепловою схемою з проміжним охолодженням повітря та регенерацією теплоти відхідних газів, з помірною температурою газу перед ТВТ.

Другий напрямок передбачав створення «легких» ГТД простої теплової схеми зі значно вищими параметрами циклу як на базі конвертованих авіаційних двигунів, так і спеціально розроблених для морських умов.

Керівництво СКБ ГУ зробило правильний вибір, воно дотримувалося другого напрямку, пов'язаного зі створенням ГТД для суто морського застосування, тому що тільки він дозволяв використовувати основні переваги нової техніки для кораблів – у масі та габаритах.

Так було визначено шлях розвитку корабельного та суднового газотурбобудування і час підтвердив доцільність такого вибору. Основними вимогами, які висувалися до корабельних (переважна кількість ГТД, які випускалися в Україні, призначалися для використання на кораблях військово-морських сил) та суднових ГТД були наступні:

усережимність, тобто здатність працювати на всіх режимах;

економічність у всьому діапазоні режимів; значний ресурс;

здатність працювати на дизельному паливі;

маневреність;

пристосованість до тривалої роботи в умовах морського середовища;

забезпечення реверсу гвинта корабля.

Ці вимоги суттєво відрізнялися від тих, що висувалися до авіаційних двигунів, які працювали у вузькому діапазоні режимів 0,5…1,0 повної потужності, мали невеликий ресурс, працювали на гасі.

Якщо газотурбінний агрегат М1 був як би перехідною моделлю від авіаційного до морського газотурбобудування, то наступна модель – газотурбінний агрегат М2 розроблявся як базовий для різних класів кораблів з максимальним урахуванням вимог до корабельної енергетики.

Агрегат М2 (рис. 6.19) призначався для установки на протичовновий корабель, працював як прискорювальний у складі дизель-газотурбінної установки. На кораблі розміщувалися один дизель посередині, а по бортах – два ГТА М2 правого й лівого обертання турбін гвинта. Потужність від вільної турбіни гвинта, яка за допомогою ресори й муфт з'єднувалася з редуктором, передавалася на гвинт корабля.

У червні 1957 р. був виготовлений перший зразок ГТА М2, у 1959 р. він був поставлений з ресурсом 750 год на корабель. У 1960 р. перший корабель пр. 159 з ГТА М2 був прийнятий до експлуатації, а у 1962 р. проведені міжвідомчі випробування, які підтвердили ресурс М2 1000 год.

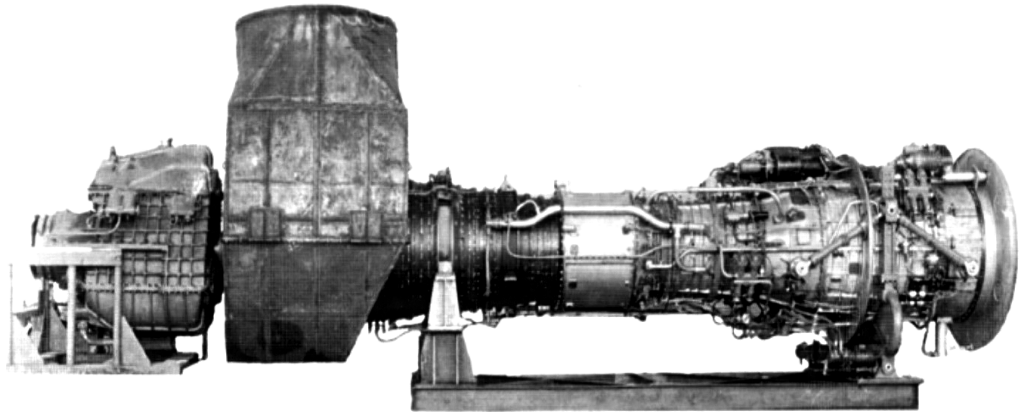


Рис. 6.19. Загальний вигляд газотурбінного агрегата М2

У 1958 р. СКБ ГУ почало роботу з розробки нового газотурбінного агрегата для протичовнових кораблів проєктів 35 та 204. Аналога такого ГТА у світовій практиці й досі немає.

На цих кораблях агрегат виконував функції джерела стисненого повітря, яке спрямовувалося у гідромоторний пристрій, ГГ якого приводився від дизеля. Рух кораблів здійснювався за рахунок тяги від суміші повітря і води, що викидається гідромотором. Новий агрегат отримав індекс ГТК Д2 (газотурбокомпресор), до його складу входили ГТД і окремо розташований компресор як джерело стисненого повітря, який приводився до руху двигуном. Окремо розташований компресор розміщується перед двигуном і приводиться у дію від контуру низького тиску. Виконаний ГТД за блокованою схемою, потужність приводу 11 000 кВт. По бортах корабля встановлювалися два ГТК Д2 з вихлопом відхідних газів ГТД з реактивного сопла безпосередньо через транцеву корму. За деякими оцінками це додавало кораблю за рахунок реактивної дії газів біля двох вузлів швидкості [34].

З 1964 р. розпочався випуск ГТК Д3 потужністю 13 240 кВт. Безумовно, рішення застосувати газотурбінну установку для великого протичовнового корабля проєкту 61 як головну енергетичну установку було принциповим рішенням на користь морського газотурбобудування.

За технічним завданням на кораблі необхідно було встановити два ГТА, кожен потужністю по 27 500 кВт, ресурс двигунів 3000 год з наступним доведенням до 5000, питома витрата палива 0,350 кг/(кВт · год).

З метою підвищення надійності та зниження витрати палива було прийнято рішення на кожен борт установлювати на загальній рамі по два ГТД потужністю по 13 250 кВт, які працюють на спільний підсумовувальний редуктор. На проміжних і малих ходах на кожному борту працює

тільки один двигун. Такий метод регулювання потужності СЕУ отримав назву «*кількісне регулювання*».

Можливість використання ГТД у складі головної енергетичної установки корабля значною мірою визначалася можливістю створення системи реверса гребного гвинта. Ця проблема була розв'язана розробкою та виготовленням реверсивного редуктора на потужність 27 500 кВт. В агрегаті М3 (рис. 6.20, 6.21) задача реверса була розв'язана шляхом включення до кінематичної схеми редуктора спеціальних кулачково-фрикційних і гідравлічних муфт, які забезпечували зміну напряму обертання ГГ і можливість відключення та підключення одного з двигунів на ходу корабля. Передній хід забезпечувався системою фрикційних і кулачкових муфт, задній хід – гідравлічною муфтою.

Перші два агрегати, виготовлені ПТЗ, були змонтовані на великому протичовновому кораблі, який у 1963 р. був зданий до експлуатації.

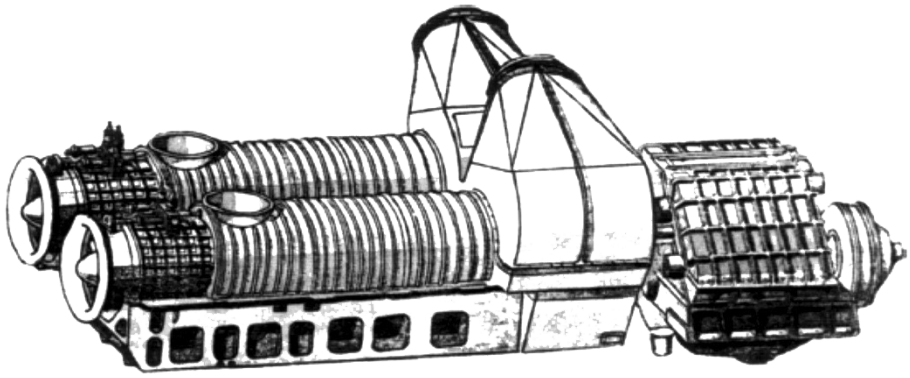


Рис. 6.20. Загальний вигляд усережимного головного ГТА М3

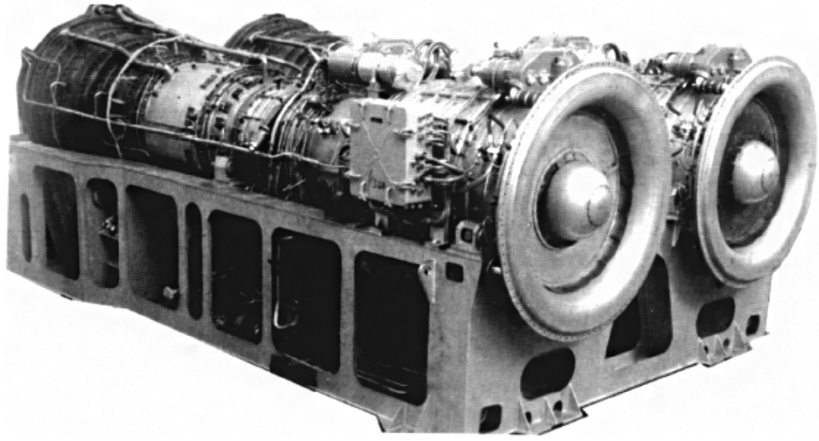


Рис. 6.21. Газотурбінні двигуни агрегата М3 на рамі

Створення першого у світі головного всережимного агрегата М3 значної потужності, успішна експлуатація його на великому протичовновому кораблі остаточно переконали проєктантів кораблів у перевагах газотурбінної енергетики. Це привело до швидкого наростання кількості нових проєктів кораблів з ГТА. Станом на 1965 р. в експлуатації знаходилося більше 130 ГТД.

У 1961 р. Постановою Ради Міністрів зі складу Південного турбінного заводу було виділено в самостійну організацію Союзне проєктне бюро (СПБ) «Машпроєкт». Начальником організації СПБ «Машпроєкт» з листопада 1963 р. призначено Я. Х. Сороку.

Історична довідка. Яків Хананович Сорока народився 3 грудня 1909 р. у м. Олександрівськ Катеринославської губернії. У 1930 р. переїхав із Запоріжжя до Москви, працював слюсарем, навчався у повітроплавальній школі. З 1931 по 1935 рр. служив у Червоній армії повітроплавцем. У 1935 р. демобілізувався і вступив у Московський університет, по закінченні якого у 1940 р. отримав кваліфікацію наукового співробітника у галузі механіки й викладача вищого навчального закладу. Після цього працював інженером-дослідником НДІ-10 Міністерства авіаційної промисловості (м. Москва), потім його переводять у 1941 р. начальником центральної лабораторії заводу № 27 авіапрому. У 1942 р. добровольцем пішов на фронт. Після демобілізації у 1945 р. працював начальником розрахункової групи, провідним конструктором ДКБ моторобудівного заводу № 16 м. Казань. Яків Сорока брав участь у роботах зі створення прискорювальної корабельної газотурбінної установки. Переводиться 7 травня 1954 р. у м. Миколаїв на ПТЗ заступником головного конструктора СКБ. Він очолив проведення газодинамічних і міцнісних розрахунків двигунів М2, Д2, М3, доведення параметрів компресорів і турбін до проєктних значень. Сорока Я. Х. запропонував застосувати для корабельного ГТД двокаскадну схему турбокомпресора. У 1961–1962 рр. під його керівництвом проведені ходові випробування головної ГТУ на великому протичовновому кораблі «Комсомолець України». З листопада 1963 р. – керівник організації СПБ «Машпроєкт» і головний конструктор. У його здобутках: створення унікальних агрегатів ДТ4 і М10 для кораблів з динамічними принципами підтримання, проведення комплексних робіт з утилізації теплоти відхідних газів ГТД. За створення корабельних ГТУ і впровадження їх у серійне виробництво у 1965 р. йому присвоєне почесне звання лауреата Ленінської премії. З 1955 р. працює за сумісництвом на кафедрі суднових силових установок, парових і газових турбін Миколаївського кораблебудівного інституту (МКІ). У червні 1967 р. присвоєне вчене звання професора, а з 1967 по 1971 рр. професор Сорока Я. Х. – завідувач кафедри суднових парових і газових турбін. З лютого 1968 р. повністю зосереджується на роботі у МКІ, з 1971 по 1979 рр. працює на посаді професора кафедри. 8 липня 1979 р. Я. Х. Сорока пішов з життя.

З 1966 року СПБ «Машпроєкт» приступило до створення *ГТД другого покоління* і ГТУ на їх основі. Передбачалося суттєве підвищення ККД ГТД (на 15…20 %), особливо на малих ходах і режимах економічного ходу, підвищення ресурсу роботи у 4–5 разів, суттєве підвищення надійності.

Ці заходи були здійснені під час створення корабельних ГТД М62 потужністю 6,6 МВт та ДТ59 потужністю 16,5 МВт, що входили до складу головних ГТА М7 та М5, ресурс яких становив біля 20 000 год. Питома витрата палива на номінальному режимі становила 285 г/(кВт · год). Уперше у світі ГТД виконані реверсивними. Українські ГТД були і є єдиними у світі, ні одна фірма інших країн не випускає реверсивних двигунів.

У середині 60-х рр. XX ст. була спроєктована і виготовлена ГТУ-20 потужністю 8,7 МВт. Конструктивно і за схемним рішенням ГТУ-20 являла собою альтернативний варіант у судновому газотурбобудуванні порівняно з напрямком розвитку ГТД, характерним для двигунів, спроєктованих СПБ «Машпроєкт». Цей шлях розвитку суднових ГТД виявився тупиковим і ГТУ-20 стала першою та останньою на цьому шляху, незважаючи на серйозну підтримку в урядових колах того часу.

Складалася ГТУ-20 з двох аналогічних агрегатів ГТУ-10 потужністю 4350 кВт кожний (рис. 6.22).

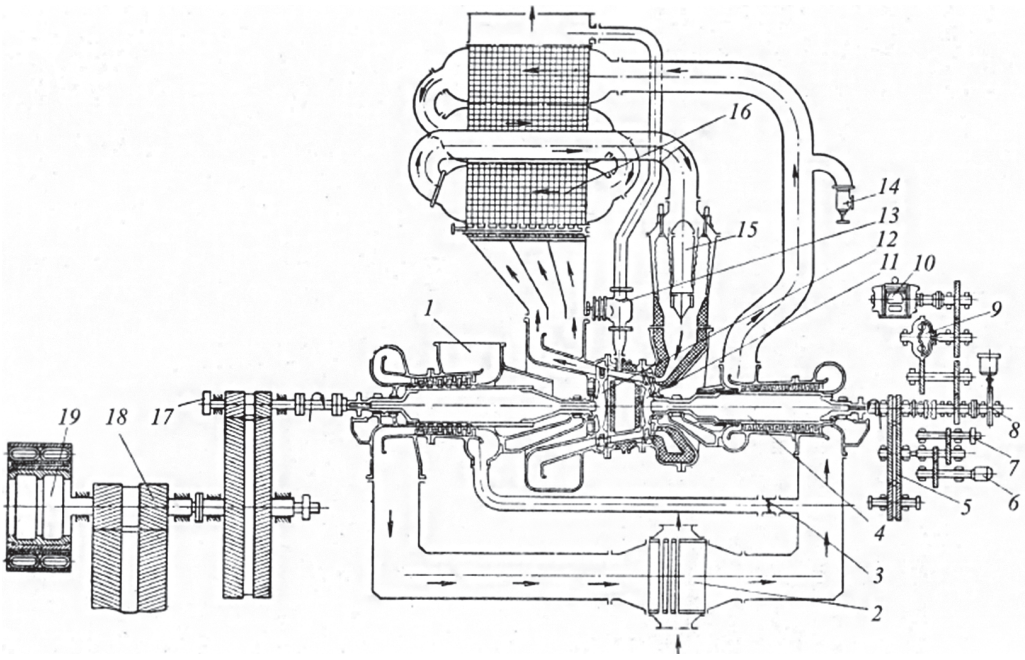


Рис. 6.22. Конструктивна схема ГТУ-10:
1, *4* – КНТ і КВТ; *2* – повітроохолоджувач; *3* – заслінка протипожежного пристрою; *5* – зубчаста передача коробки приводів; *6* – тахометр; *7*, *17* – імпелери; *8* – валоповоротний пристрій; *9* – гідротрансформатор; *10* – пусковий електродвигун; *11*, *12* – ТВТ і ТНТ відповідно; *13*, *14* – клапани перепуску газу та повітря відповідно; *15* – камера згоряння; *16* – регенератор; *18* – редуктор; *19* – шинно-пневматична муфта

Ці агрегати працювали на підсумовувальний редуктор з передаточним числом 57,5. Конструктивно ГТУ-20 є типовим агрегатом промислового типу з помірними параметрами робочого тіла (початкова температура газів складала 1023 °С, міра підвищення тиску – 9). Двигуни виконані двокаскадними з блокованою силовою турбіною, відбором потужності від каскаду низького тиску. Вибір такої конструктивної схеми для двигуна, призначеного для використання як головного на судні, був, на жаль, помилковим.

Установка ГТУ-20 була встановлена на першому радянському газотурбовозі – суховантажному судні «Паризька комуна» дедвейтом 16 000 т. Реверс установки здійснювався за допомогою ГРК. Судно знаходилося в експлуатації у складі Чорноморського морського пароплавства до середини 80-х рр. XX ст.

Період 1960–1970 рр. характерний зростанням інтересу до кораблів з динамічними принципами підтримання: кораблів на підводних крилах (КПК) і кораблів на повітряній подушці (КПП). Головним конструктором і начальником СПБ «Машпроєкт» у лютому 1968 р. призначено Романова В. І.

Історична довідка. Віктор Іванович Романов – генеральний конструктор морської газотурбінної техніки, доктор технічних наук, народився в 1928 р. У 1948 р. закінчив Горьківський авіаційний технікум, а у 1954 р. – Уфімський авіаційний інститут. Працював інженером-конструктором на авіамоторному заводі в м. Уфа. У 1954 р. був переведений до Миколаєва на Південний турбінний завод. Працював конструктором, провідним конструктором, начальником відділу турбін, заступником головного конструктора. З 1968 р. – головний конструктор і начальник СПБ «Машпроєкт». У 1986 р. за його ініціативою створено Науково-виробниче об’єднання «Машпроєкт» з філією – КБ «Енергія» у Кривому Розі. Романов В. І. стає генеральним директором і головним конструктором об’єднання. Віктор Іванович брав активну участь у створенні ГТД першого та другого поколінь, упровадженні їх у серійне виробництво. Під його керівництвом і за активною участю вперше у світі створена реверсивна силова газова турбіна, ГТД для високошвидкісних суден з динамічними принципами підтримання, ГТУ з теплоутилізаційним контуром для унікальних суден, яким немає аналогів (ролкерів типу «Атлантика»). У складних економічних умовах, пов’язаних з розпадом Радянського Союзу і конверсією, Романов В. І. ініціював розгортання робіт зі створення газотурбогенераторів і автономних блочно-комплектних електростанцій, модернізації компресорних станцій магістральних газопроводів на базі уніфікованих ГТД третього покоління. Значним досягненням вітчизняного газотурбобудування стало створення ГТД потужністю 110 МВт для великої енергетики. Романов В. І. є двічі лауреатом Державної премії СРСР за створення і впровадження в серійне виробництво ГТА з великим ресурсом й високою економічністю та створення нових матеріалів для ГТД.

Протягом 1969–1977 рр. на НВП «Машпроєкт» (на яке перетворилося СПБ «Машпроєкт») були створені ГТА ДТ4 і М10 потужністю, відповідно, 13 і 15 МВт для кораблів і суден з динамічними принципами підтримання. Такі ГТА мали складну структуру – унікальний агрегат ДТ4 КПП «Джейран» складався з двох легких двигунів потужністю по 13 230 кВт і механічної передачі, яка мала 18 планетарних та кутових редукторів восьми типів, що забезпечували передачу потужності одночасно на чотири вентилятори й чотири повітряні ГРК. За потреби, в аварійних ситуаціях, передача дозволяла всі зазначені агрегати приводити в обертання від одного ГТД і продовжувати рух корабля.

На початку 70-х рр. XX ст. у віддалених північно-східних районах колишнього Радянського Союзу у зв'язку з інтенсивним освоєнням нафтогазових родовищ виникла гостра потреба в електроенергії. Для розв'язання цієї задачі було прийнято рішення побудувати декілька плавучих електростанцій і водним шляхом доставити їх до місць призначення.

Науково-виробниче підприємство «Машпроєкт» і ПТЗ створили на основі суднових ГТД газотурбогенератори для плавучих електростанцій типу «Сєвєрноє сіяніє». На станціях установили по два газотурбогенератора з ГТД потужністю по 10 МВт, а з 1974 р. – більш економічні двигуни потужністю по 12 МВт.

Усього було побудовано шість плавучих електростанцій, які були встановлені на Чукотці біля мису Шмідта, у м. Анадир, у Тюменській області в м. Надим та в інших місцях.

Для *ГТД третього покоління* характерними є високі параметри циклу (початкова температура газів 1100…1150 °С з мірою підвищення тиску 15…21); високі колові швидкості облопачування і, як наслідок, зменшення кількості ступенів компресорів, турбін; застосування протитечійної камери згоряння, розташованої навкруги КВТ, що дозволяло зменшити осьові габарити й масу двигуна.

У межах програми розробки ГТД третього покоління було створено уніфікований потужносний ряд двигунів – 3,7, 8,0 та 15 МВт з базовим ресурсом 20 000 год, які мали більш високу (на 10…15 %) економічність (ККД біля 35 %), у 2…4 рази меншу масу та в 1,5 рази менші габарити у порівнянні з двигунами другого покоління.

Видатним досягненням вітчизняного газотурбобудування стало створення комбінованої газопаротурбінної установки з агрегатом М25 потужністю 18 МВт для транспортних суден з горизонтальним способом обробки вантажу. Для цих агрегатів характерним є використання теплоти відхідних газів в утилізаційному паровому котлі. Котел забезпечує роботу

утилізаційної парової турбіни з метою отримання додаткової потужності для приводу ГГ і роботу допоміжного паротурбогенератора.

До складу кожного ГТА М25 входили реверсивний агрегат, редуктор, утилізаційний котел, парова турбіна з конденсатором. Головна енергетична установка включає до себе два ГТА М25.

Головне судно під назвою «Капітан Смірнов» було побудовано Чорноморським суднобудівним заводом (м. Миколаїв) у 1978 р. Крім головного судна, побудовано ще три судна цієї ж серії «Капітан Мєзєнцев» (1980 р.), «Інженер Єрмошкін» (1981 р.), «Володимир Васляєв» (1987 р.). Досвід експлуатації цих суден продемонстрував високу надійність, ремонтопридатність та економічність вітчизняних ГТУ з паротурбінним ТУК.

На жаль, програма подальшого вдосконалення головного ГТА типу М25 не була реалізована. Газотурбоходи, як і багато інших суден торгового флоту були продані, зокрема «Володимир Васляєв» був придбаний військовим департаментом США для використання у складі сил швидкого реагування. Судно було модернізовано шляхом подовження за рахунок центральної вставки довжиною 40 м, що підвищило його водотоннажність. Газопаротурбінна установка (ГПТУ) збережена, але ГТД замінені на більш ефективні, виробництва «Зоря» – «Машпроєкт».

Цікавий факт! Високий потенціал суднобудування міста Миколаєва був переконливо продемонстрований під час будівництва цієї серії суден. Проєкт судна виконано проєктним бюро «Чорноморсуднопроєкт» (м. Миколаїв), судно побудовано на Чорноморському суднобудівному заводі (м. Миколаїв). На цьому ж заводі виготовлені палубні пристрої, валопровід, утилізаційний котел, більшість теплообмінних апаратів СЕУ. Газотурбінні агрегати, спроєктовані НВП «Машпроєкт», виготовлені ПТЗ (м. Миколаїв).

На базі агрегатів третього покоління, що серійно випускаються, був створений газотурбінний агрегат М37 потужністю 5200 кВт для використання у складі ЕУ на морському пасажирському газотурбоході «Циклон» на підводних крилах. Судно призначено для перевезення 250 пасажирів зі швидкістю 42 вузли, дальність плавання 300 миль. Міжвідомчі випробування агрегата були завершені у 1985 р., і у цьому ж році він був установлений на судно. Ходові та швартовні випробування судна завершені у грудні 1986 р.

На рис. 6.23, 6.24 наведені загальний вигляд та конструктивна схема ГТД третього покоління вітчизняного виробництва.

З 1985 р. НВП «Машпроєкт» приступило до реалізації програми створення *газотурбінних двигунів четвертого покоління*. Однак з розпадом колишнього Радянського Союзу фінансування цієї програми було припинено.

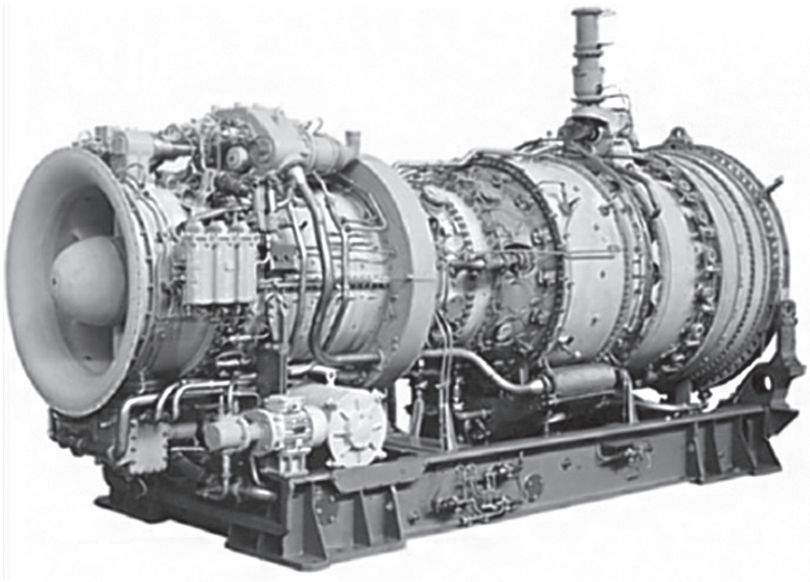


Рис. 6.23. Загальний вигляд газотурбінного двигуна UGT15 000

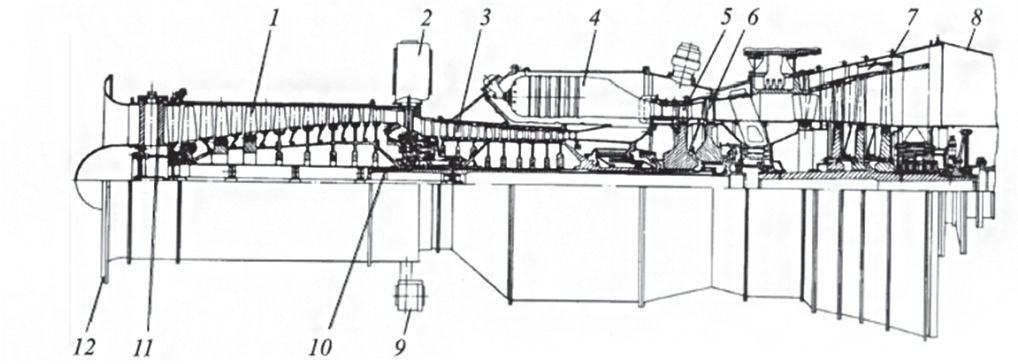


Рис. 6.24. Конструктивна схема реверсивного двигуна ДО77 (ДС77):
1, *3* – КНТ і КВТ; *2*, *9* – коробки приводів (основна та нижня); *4* – камера згоряння;
5, *6* – ТВТ і ТНТ; *7* – силова турбіна; *8* – газовідвід; *10* – перехідник;
11 – корпус передній; *12* – пристрій вхідний

Створено було тільки двигун ГТД 25 000 потужністю 25 000 кВт із ККД 36,8 %. Двигун має найвищу з існуючих до цього часу морських ГТД міру підвищення тиску повітря в компресорі – 23,6. Початкова температура газів становить 1245 °С.

Чотири двигуни ГТД 25 000 поставлені до Китаю для використання на військових кораблях. Більше 90 таких двигунів використовуються для приводу нагнітачів газоперекачувальних агрегатів компресорних станцій лінійних газопроводів.

На сьогодні у стадії дослідно-промислової експлуатації знаходиться двигун потужністю 10 000 кВт з температурою перед ТВТ 1270 °С, мірою підвищення тиску 22 та ККД 36 % (рис. 6.25).

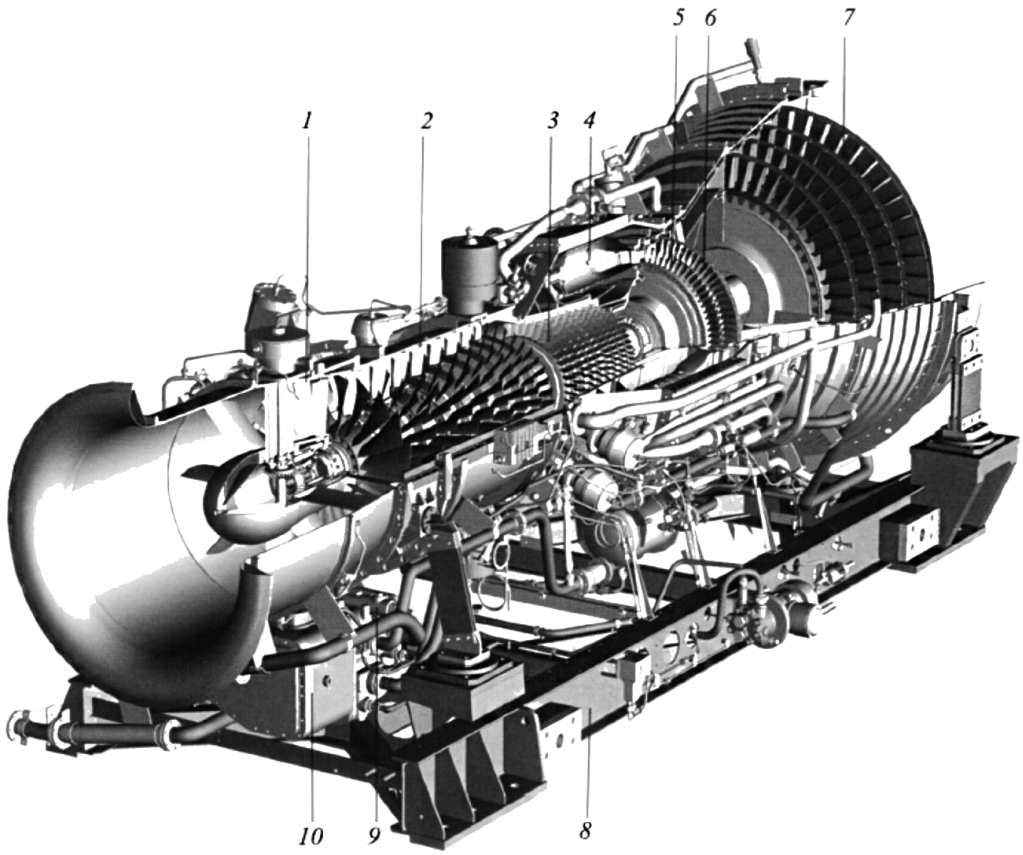


Рис. 6.25. Загальна будова двигуна UGT 10 000 (DH70):
1 – поворотний вхідний напрямний апарат; *2*, *3* – компресори низького та високого тисків; *4* – камера згоряння; *5*, *6* – ТВТ і ТНТ; *7* – силова турбіна; *8* – рама; *9* – електростартер; *10* – коробка приводів

Газотурбінний двигун UGT 25 000 (ДГ80) виробництва «Зоря» – «Машпроєкт» має універсальне призначення: він може використовуватися для роботи на гвинт із застосуванням як механічної, так і електричної передач або для приводу електрогенератора у стаціонарних умовах [45]. *Основні технічні характеристики*

Номінальна потужність на клемах електрогенератора за стандартних умов ISO (атмосферний тиск складає $0{,}9948 \cdot 10^5$ Па, температура повітря на вході у двигун 288 К, відносна вологість повітря 60 %, опір повітрозабірної системи на вході в компресор ГТД не більше 981 Па, опір

вихлопних пристроїв не більше 2451 Па, ККД електрогенератора 98 %) становить 25 000 кВт. Коефіцієнт корисної дії ГТД 36,8 %; міра підвищення тиску в компресорах становить 21,2; початкова температура газів (на вході у ТВТ) – 1227 °С, витрата газу – 87,7 кг/с; температура газу на виході з ГТД – 493 °С. Загальний вигляд ГТД UGT 25 000, розташованого на рамі, наведено на рис. 6.26. У такому вигляді ГТД поставляється на об'єкти – суднові та стаціонарні. Двигун є двокаскадним, з вільною силовою турбіною. Компресори низького *1* і високого *2* тисків приводяться двома турбінами відповідно низького (ТНТ) *5* і високого (ТВТ) *4* тисків. Сукупність компресорів і турбін, що їх приводять, а також трубчасто-кільцевої камери згоряння *3* утворює газогенератор. Компресори й пов'язані з ними турбіни складають два каскади: каскад низького тиску і каскад високого тиску, які мають різні частоти обертання. Силова турбіна *6* через муфту *7* передає обертальний момент споживачеві – редуктору або генератору електричного струму. Двигун розташовується на рамі *8*. Запуск двигуна здійснюється шляхом розкручування ротора КНТ через коробку приводів *10* електростартерами змінного струму *9*, розташованими на рамі двигуна.

Рух повітря та утворених продуктів згоряння у ГТД наступний: повітря до ГТД надходить через вхідний пристрій КНТ *1*. Перед подачею до двигуна повітря піддається обов'язковому очищенню від сторонніх часток та аерозолів.

У даному двигуні застосована триступенева система очищення: ступінь відділення вологи, фільтр попереднього очищення, фільтр тонкого очищення. Фільтр тонкого очищення уловлює частки розміром біля 1 мікрона. Далі очищене повітря послідовно стискується у КНТ *1* та КВТ *2* і надходить до камери згоряння *3*, у якій відбувається спалення палива (наведена конструкція ГТД призначена для роботи на природному газі).

Первинне запалювання паливного газу відбувається за допомогою запальників, а подальше горіння у камері забезпечується безперервною подачею палива та повітря. Повітря, яке подається до камери згоряння, розподіляється наступним чином: одна частина безпосередньо бере участь у спалюванні палива, унаслідок чого утворюються продукти згоряння; друга – охолоджує стінки жарових труб і, змішуючись з продуктами згоряння, утворює газоподібне робоче тіло, енергія якого використовується в турбінах; третя – забезпечує охолодження елементів турбін. Продукти згоряння, змішані з охолоджувальним повітрям, надходять на турбіни високого *4* і низького *5* тисків, які розвивають потужність, необхідну для приводу КВТ і КНТ, тобто потужності ТВТ і ТНТ повністю

поглинаються відповідними компресорами. Єдиним елементом ГТД, що розвиває потужність, яка передається зовнішньому споживачеві, є силова турбіна *6*, на яку подаються продукти згоряння, що виходять з ТНТ *5*. Відпрацьовані гази через газовідвід ГТД надходять до вихлопного тракту.

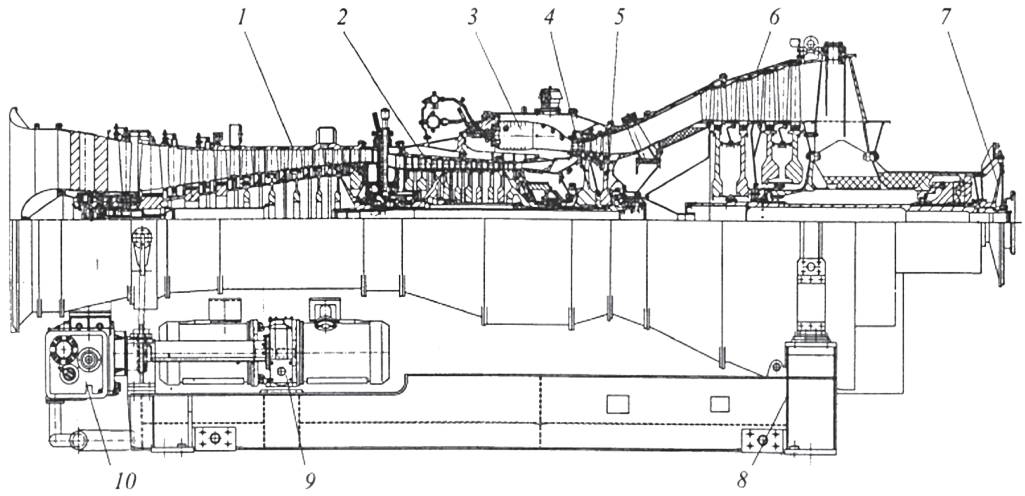


Рис. 6.26. Газотурбінний двигун UGT 25 000 (ДГ80) на рамі

6.5. Зарубіжне суднове газотурбобудування із 60-х рр. XX ст. до сьогодні

У 60-ті рр. XX ст. найбільш інтенсивні роботи зі створення суднових ГТД проводилися американськими фірмами «General Electric» та «Pratt & Whitney», англійською фірмою «Rolls-Royce».

Перший ГТД для морського застосування був виготовлений фірмою «General Electric» у 1959 р. Це був двигун LM100, створений на базі вертолітного ГТД і призначений для приводу аварійного генератора електричного струму на СПК, КПК, КПП.

Наступним типом двигуна був ГТД LM1500 також конвертований із серійного авіаційного двигуна. Перший зразок такого двигуна був установлений на КПК «Denison» військово-морських сил США, усього на початок 1996 р. їх було виготовлено 182 од. На початку 90-х рр. XX ст. виробництво цих двигунів було припинено.

З 1961 р. американська фірма «Pratt & Whitney» розпочала роботи зі створення морського двигуна FT4A на базі широко застосованого авіаційного турбореактивного двигуна J-75. Компресор ГТД FT4A виконаний двокаскадним з мірою підвищення тиску 12, він складається

з восьмиступеневого КНТ і семиступеневого КВТ. Камера згоряння трубчасто-кільцева з вісьмома жаровими трубами, ТВТ – одноступенева, ТНТ – двоступенева, силова турбіна – також двоступенева. У 60-х рр. ГТД FT4A став одним з основних морських ГТД, які встановлювалися на кораблях і суднах за кордоном.

У 1967 р. у Федеративній Республіці Німеччини (ФРН) було побудовано транспортне судно «Admiral V. Callaghan» дедвейтом 7 тис. т, яке було обладнано двовальною енергетичною установкою з двигунами FT4A потужністю 18,7 МВт. Більш пізня модифікація цього двигуна, FT4A-12 була використана під час побудови у ФРН серії із чотирьох контейнерних суден типу «Euroliner». Це двогвинтові судна дедвейтом 28 000 т з проєктною швидкістю 26,4 вузлів, яку забезпечували два ГТД FT4A-12 потужністю по 22,2 МВт. Перше судно цієї серії прийнято до експлуатації у 1971 р.

Аналогічна енергетична установка застосована на двовальному фінському поромі «Finnjet», уведеному в експлуатацію у 1977 р. На ньому були встановлені два ГТД FT4C-2 сумарною потужністю 55,2 МВт, які, кожен через свій редуктор, працювали на свій ГРК.

Найбільшого поширення у світі набув ГТД LM2500, уперше виготовлений фірмою «General Electric» у 1969 р. Загальна кількість таких двигунів у різних модифікаціях перевищує 2000. Газотурбінний двигун є конвертованим, він створений на базі авіаційного двигуна TF39, який мав високий ККД і значний ресурс. Судновий двигун створювався одночасно з його авіаційним прототипом, у конструкції конвертованого двигуна використано більше 90 % конструктивних вузлів прототипу. Двигун LM2500 простого циклу, однокаскадний, з вільною силовою турбіною (рис. 6.27).

Газогенератор ГТД складається із 16-ступеневого компресора з мірою підвищення тиску 18.

Повітря надходить до двигуна через вхідний пристрій *1*. Вхідний напрямний апарат і напрямні апарати перших шести ступенів компресора *2* є регульованими, кутове положення лопаток у них визначається температурою повітря на вході в компресор і частотою обертання ротора компресора. Низькоемісійна камера згоряння *3* прямоточна, кільцева. Двоступенева ТВТ *4* працює в інтервалі частот обертання 4900…9800 хв$^{-1}$. Вільна силова турбіна *5* виконана шестиступеневою із частотою обертання 1000…3000 хв$^{-1}$.

У перших модифікаціях LM2500 початкова температура газів була прийнята 1373 К (у авіаційного прототипу – 1553 К).

Уперше газотурбінні двигуни LM2500 були встановлені у 1969 р. на судні «Admiral V. Callaghan», на якому вони замінили ГТД FT4A, потім їх почали застосовувати у військово-морському флоті США та інших країнах.

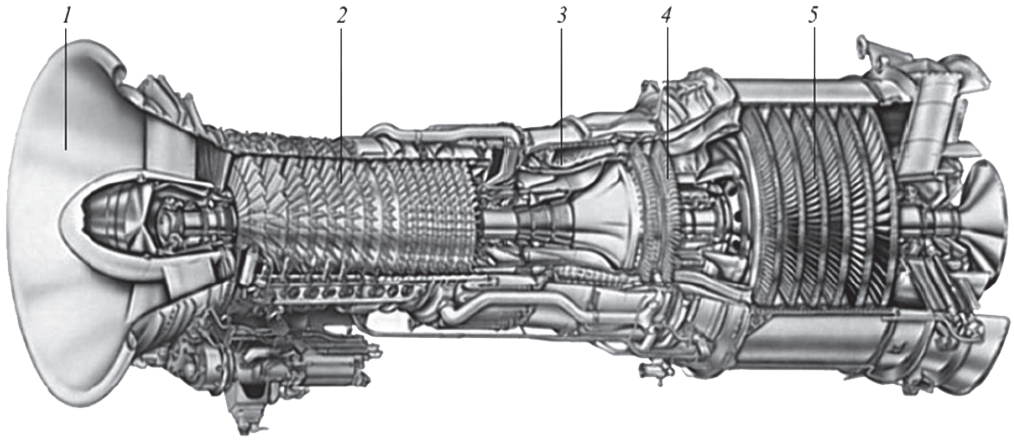


Рис. 6.27. Конструктивна схема газотурбінного двигуна LM 2500

Двигуни LM 2500 постачаються на водотоннажні судна й кораблі у вигляді модулів, що суттєво спрощує їх монтаж, ізолює двигун від ударних впливів, сприяє зменшенню розповсюдження шуму і вібрації (рис. 6.28).

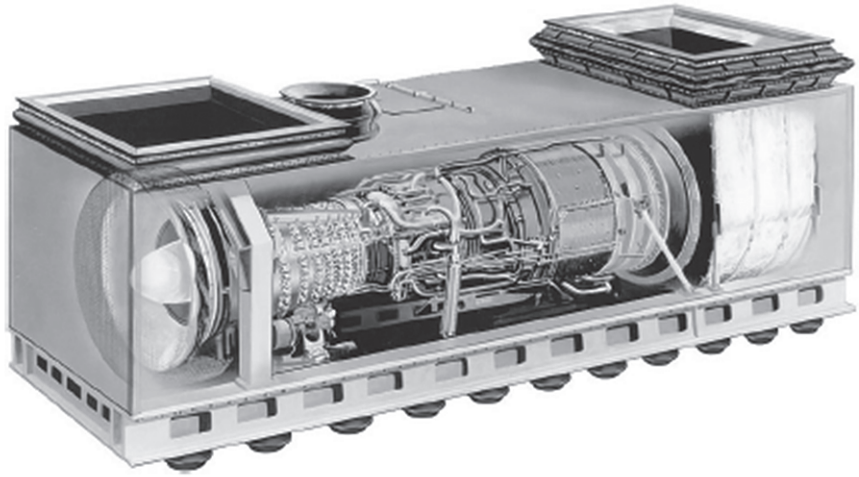


Рис. 6.28. Загальний вигляд ГТД LM 2500 у контейнері

Функціонально конструкція модуля забезпечує підведення повітря до компресора і на охолодження двигуна, відведення відпрацьованих газів, протипожежний захист, попередження обледеніння вхідного пристрою, підігрів палива. Усі електронні та контрольні системи модулів легко адаптуються із судновими системами.

У 1973–1977 рр. за кордоном була побудована серія суден, оснащених двигунами промислового типу серії MS фірми «General Electric». Це судна

з горизонтальним способом проведення вантажних операцій «Iron Monarch», «Iron Duk», «Union Rotoiti», «Seaway Prince», «Seaway Princess», танкери «Shevron Oregon», «Shevron Colorado», «Shevron Luisiana» тощо. Потужність ГТУ складала 9…18 МВт. Танкери дедвейтом 35 тис. т були оснащені ГТУ з електричною передачею. Головний газотурбогенератор розташовувався на головній палубі, а гребний електродвигун – безпосередньо під ним, у трюмі. Таке компонування енергетичної установки суттєво підвищувало вантажомісткість.

Особливістю газотурбінної установки MS 5212R фірми «General Electric», установленої на газовозі «Lucaine», є здатність працювати як на нафтовому паливі (дистилятному чи мазутному), так і на метані, який випаровується з вантажних танків протягом рейсу.

Газотурбінний двигун LM 500 розроблений фірмою «General Electric» спільно з італійською фірмою «Fiat» у 1979 р. Його конструкція аналогічна конструкції двигуна LM 2500. Це однокаскадний ГТД з 14-ступеневим компресором, кільцевою камерою згоряння, двоступеневою турбіною компресора й чотириступеневою силовою турбіною. За потужності 3,65 МВт ККД двигуна складає 31 %.

Двигун LM 500 застосовується як головний на СДПП і як маршовий – у комбінованих установках значної потужності, а також для приводу електрогенераторів на великих суднах і кораблях.

У 1978 р. фірмою «General Electric» був створений найпотужніший на ті часи корабельний ГТД LM 5000. Його потужність становить 37 МВт.

Газотурбінний двигун виконаний за двокаскадною схемою з вільною силовою турбіною. Міра підвищення тиску складає 26,1. Камера згоряння – кільцева. Турбіни високого та низького тисків виконані одноступеневими, силова турбіна – триступенева (рис. 6.29).

ГТД LM 5000 знайшов широке застосування на великих швидкісних кораблях і суднах, а також у стаціонарній енергетиці.

Суттєвий внесок у розвиток суднового газотурбобудування зробила фірма «Rolls-Royce». Так, за період з 1973 по 2000 рр. було випущено більше 1000 двигунів сумарною потужністю біля 10 млн кВт для військово-морських сил різних країн.

Найбільш розповсюдженим двигуном цієї фірми є Olimpus TM3B, розроблений на основі турбореактивного двигуна Olimpus 201. Виконаний Olimpus TM3B за прямоточною схемою, двокаскадним з вільною силовою турбіною.

Фірми «Rolls-Royce» та «Allison» у 1983 році спільно розробили корабельний варіант ГТД Spey SM1A на базі авіаційного ГТД TF41. Газогенератор ГТД Spey SM1A двокаскадний, КНТ п’ятиступеневий,

КВТ одинадцятиступеневий, ТВТ та ТНТ двоступеневі, камера згоряння трубчасто-кільцева з десятьма жаровими трубами, силова турбіна двоступенева.

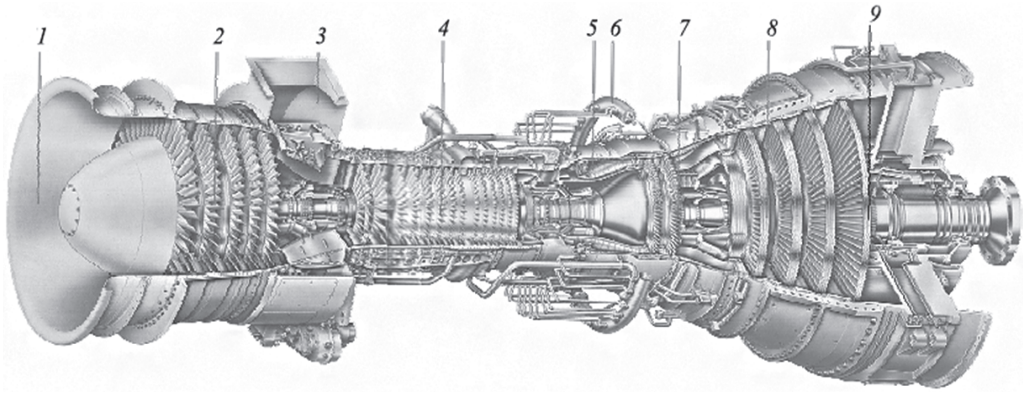


Рис. 6.29. Конструктивна схема газотурбінного двигуна GE LM 5000:
1 – вхідний пристрій; *2* – п'ятиступеневий КНТ; *3* – відбір повітря низького тиску; *4* – чотирнадцятиступеневий КВТ; *5* – камера згоряння; *6* – паливний колектор; *7* – двоступенева ТВТ; *8* – одноступенева ТНТ; *9* – триступенева силова турбіна

Конструктивно ГТД випускається у вигляді блока газогенератора і блока силової турбіни, змонтованих на спільній фундаментній рамі та розташованих у звукоізолюючому контейнері.

Наступною розробкою фірми стала модифікація SMIC більшої потужності – 19 500 кВт і більшої ефективності – ККД 37,4 %.

Двигун LM 1600 – третього покоління (перше покоління – LM 100, LM 1500, друге – LM 2500, LM 500). Уперше він був випробуваний в експлуатації у 1987 р. На відміну від ГТД LM 2500, LM 500 та LM 1500 цей двигун спроєктований за двокаскадною схемою з вільною силовою турбіною. Двоступеневий КНТ та семиступеневий КВТ забезпечують міру підвищення тиску 22, ТВТ і ТНТ – одноступеневі, силова турбіна – двоступенева.

До складу кільцевої камери згоряння входять 18 форсунок і два пускових блоки. Паливна система може використовувати два види палива, причому можливе переключення з одного палива на інше на повній потужності. Ефективність ГТД LM1600 складає 37 %.

У 1990 р. фірма «Pratt&Whitney Power Systems» створила ГТД FT8. Це прямоточний, двокаскадний ГТД з восьмиступеневим КНТ, семиступеневим КВТ, камера згоряння трубчасто-кільцева з дев'ятьма жаровими трубами, силова турбіна – триступенева. За потужності 25 МВт двигун має високу ефективність – 38,5 %.

1997 рік був ознаменований створенням фірмою «General Electric Marine Engines» ГТД LM 6000 (рис. 6.30).

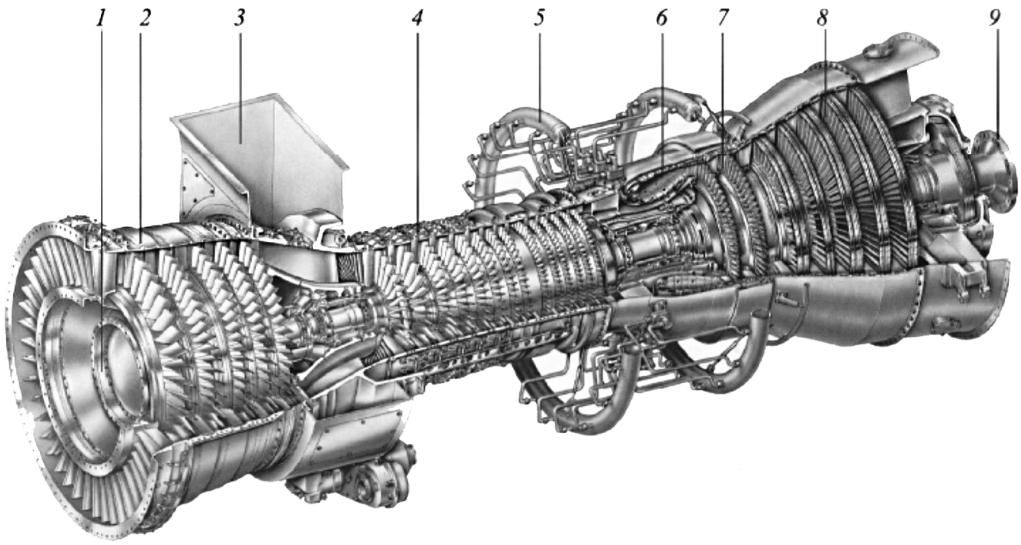


Рис. 6.30. Конструктивна схема газотурбінного двигуна LM 6000:
1, *9* – відбір потужності з холодного і гарячого кінців ГТД; *2* – п'ятиступеневий КНТ; *3* – відбір повітря низького тиску; *4* – чотирнадцятиступеневий КВТ; *5* – паливний колектор; *6* – камера згоряння; *7* – двоступенева ТВТ; *8* – п'ятиступенева ТНТ

Цей двигун виконаний за двокаскадною схемою з блокованою силовою турбіною. Залежно від компонування агрегата відбір потужності може здійснюватися з боку входу повітря у двигун або з боку виходу газів з ГТД. У морських умовах ГТД LM 6000 потужністю 42,8 МВт забезпечує електричною енергією нафтогазодобувні платформи і може застосовуватися у складі енергетичних установок суден або кораблів з електрорухом.

Спільна розробка таких відомих фірм, як «Rolls-Royce» та «Westinghouse» ГТУ WR-21, яка з'явилася у 1997 р., стала першою після 50–60-х рр. XX ст. судновою установкою з проміжним охолодженням та регенерацією. Конструктивною схемою ГТУ передбачено, що повітря, яке виходить з КНТ, охолоджується у теплообмінному апараті – проміжному охолоджувачі, через який прокачується прісна вода з додаванням гліколю. Повітроохолоджувач, вписаний у конструкцію двигуна, забезпечує мінімальні втрати тиску повітря під час проходу його через теплообмінні поверхні. Прісна вода охолоджується забортною водою. Повітря, яке виходить з КВТ, підігрівається в регенераторі, а потім надходить у камеру згоряння, продукти згоряння спрямовуються послідовно в ТВТ, ТНТ і вільну силову турбіну через першу ступень з поворотними соплами.

Оригінальною, порівняно з іншими ГТД, є конструкція камери згоряння. Вона складається з дев'яти радіально розташованих жарових труб, кожна з яких оснащена своєю паливною форсункою і двома запальниками. Радіальне компонування камери вибране з аеродинамічних міркувань, зважаючи на те, що повітря в камеру згоряння подається з регенератора, у той же час воно забезпечує організацію процесу згоряння зі зниженим рівнем емісії оксидів азоту [1].

Регенератор, проміжний охолоджувач і поворотні сопла забезпечують зниження питомої витрати палива для ГТУ WR-21 (питома витрата палива складає 0,200 г/(кВт · год), ККД – 42,4 %).

Проміжний охолоджувач пластинчастого типу складається з п'яти теплообмінних пластинчастих матриць, виготовлених з мідно-нікелевого сплаву. Регенератор також пластинчастий, він складається з двох модулів, до складу кожного з яких входять теплообмінник, колектори входу та виходу, привід клапанів і корпус (рис. 6.31).

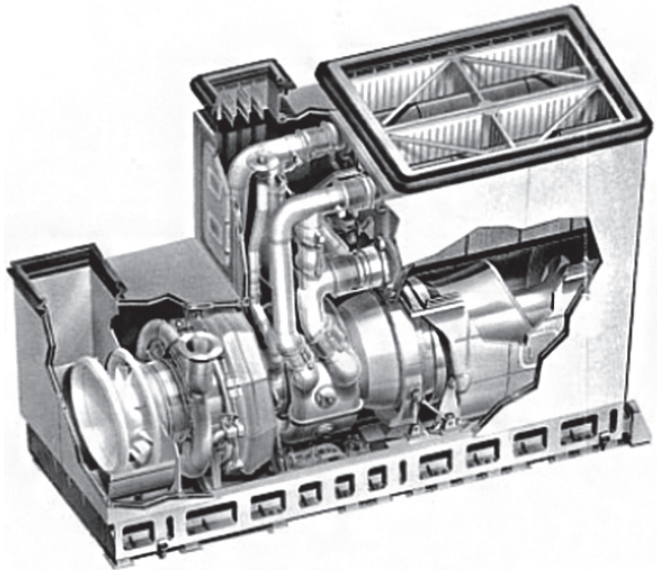


Рис. 6.31. Загальний вигляд газотурбінної установки WR-21

Газотурбінна установка WR-21 з повітроохолоджувачем і регенератором розташована у контейнері, й у такому вигляді поставляється на судно. Конструкція контейнера повністю пристосована для поточного ремонту, обслуговування в суднових умовах і для заміни окремих вузлів.

Установка WR-21 призначена для фрегатів, кораблів-амфібій і великих суден допоміжного флоту ВМС, а також для спеціальних високошвидкісних комерційних суден.

Створений у 1998 р. двигун LM 2500+ фірми «General Electric» є більш досконалим ГТД свого класу. Принципова відмінність його від базової моделі LM 2500 полягає у використанні додаткового «нульового» ступеня компресора, що дозволило підвищити витрату повітря приблизно на 20 %. Міра підвищення тиску в компресорі зросла до 22 порівняно з 19,3 для LM 2500, що підвищило ефективність ГТД до 37,3 %. Широке застосування в останні роки ГТД LM 2500+ одержав на великих круїзних суднах.

Наприкінці XX ст. фірма «Rolls-Royce» запропонувала морській галузі новий ГТД MT30, призначений для використання як привод гребного гвинта або електрогенератора, конвертований з авіаційного двигуна Trent 800, який був використаний на літаку «Boeing 777». Двигун MT30 виконаний двокаскадним, з вільною силовою турбіною (рис. 6.32). Камера згоряння – трубчасто-кільцева КНТ – восьмиступеневий, КВТ – шестиступеневий, ТВТ та ТНТ – одноступеневі, силова турбіна – чотириступенева.

Частота обертання силової турбіни 3300 хв$^{-1}$ (під час використання як механічного приводу) або 3600 (у разі приводу електрогенератора). Двигун MT30 є одним з найбільш легких за масою ГТД: суха маса його становить 6200 кг, маса ГТД з контейнером 22 000 кг (рис. 6.34). Потужність MT30 становить 36 МВт, паливна ефективність – 210 г/(кВт · год), що відповідає ККД більше 40 %.

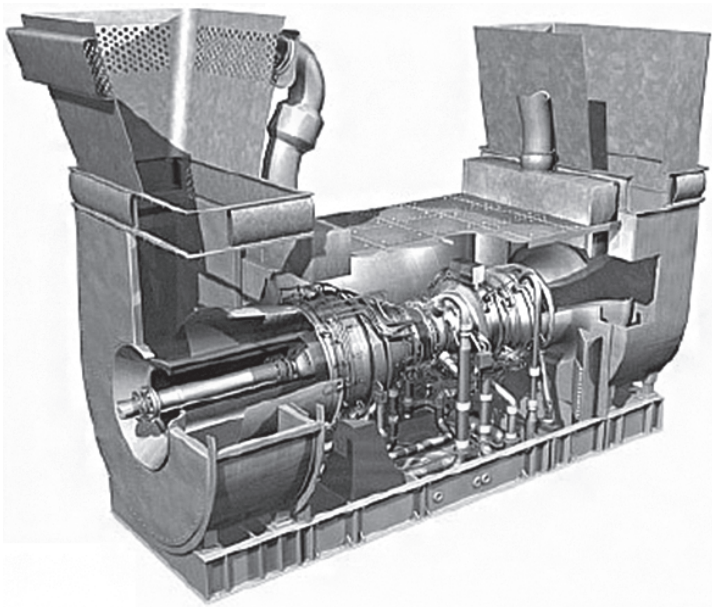


Рис. 6.32. Загальний вигляд двигуна MT30 у контейнері

6.6. Сучасний стан застосування ГТУ на морському транспорті

6.6.1. Енергетичні установки круїзних суден і швидкісних поромів

Більшість серед ГТД, застосованих на морському транспорті, складають привідні газотурбінні двигуни головних електрогенераторів пропульсивних установок круїзних лайнерів. Це пояснюється тим, що більшість сучасних круїзних лайнерів оснащені головними рушійно-рульовими комплексами типу «Azipod», які являють собою ГЕД з гребним гвинтом, розташований у герметичній гондолі, що має можливість розвертатися на 360° навколо вертикальної осі. Таке рішення пов'язане з необхідністю надання круїзним суднам підвищених маневрених властивостей. З міркувань безпеки судноплавства на круїзних суднах передбачається не менше двох основних рушіїв, на окремих суднах поширення набули і три головні рушійно-рульові комплекси, два з яких є поворотними, а середній – нерухомий [1].

Застосування ГТД на великих круїзних лайнерах дозволяє суттєво зменшити об'єм приміщень, які відводяться під МВ унаслідок високих масогабаритних показників ГТД, що дає можливість збільшити кількість кают на 20…100 од. Завдяки таким властивостям ГТД, як висока готовність до пуску і прийому навантаження, можливість агрегатної заміни двигуна, їх застосування дозволяє забезпечити надійність і живучість суднової ЕУ круїзного лайнера.

Поряд із цим використання ГТД як головних двигунів на таких суднах дозволяє забезпечити вимоги Додатка VI Конвенції МАРПОЛ 73/78, які є особливо жорсткими для зон прибережного судноплавства, внутрішніх морів та інших основних районів експлуатації круїзних лайнерів і високошвидкісних поромних суден. Так для пасажирського судна «Millennium» з комбінованою газотурбінною установкою з електричною передачею, викиди NO_x порівняно з ДВЗ аналогічної потужності знижені з 12 до 4 г/(кВт · год), SOx – з 13,6 до 0,9 г/(кВт · год), інших домішок – з 5 до 0,13 г/(кВт · год). Це стало підставою класифікаційному товариству присвоїти судну клас «Clean Design».

Зниження витрат на паливо у пропульсивних установках з головними газотурбогенераторами досягається застосуванням теплоутилізаційних контурів. Зважаючи на підвищені потреби круїзних лайнерів у тепловій енергії (більша частина якої споживається водоопріснювальними установками з добовою сумарною продуктивністю до 2 тис. т), доцільними є два способи утилізації теплоти відпрацьованих газів ГТД. Це отримання насиченої пари для покриття загальносуднових потреб у тепловій енергії та вироблення перегрітої пари для використання в утилізаційному паротурбогенераторі.

За першим способом працює комбінована газотурбоелектрична і дизель-електрична установка CODLAG круїзного лайнера «Coral Princess»

серії «Baby Grand class» пасажиромісткістю 2,5 тис. чол. Абревіатура CODLAG (Combined Diesel-electric And Gas) позначає тип установки зі спільною роботою на рушій через гребний електродвигун генераторів електричного струму, які приводяться від ДВЗ і ГТД. До складу цієї установки входять газотурбогенератор потужністю 25 МВт, розміщений на 15-й палубі у димовій трубі, та два головні дизель-генератори потужністю по 16,6 МВт, розташовані у трюмі в основному машинному відділенні. Рух та маневри судна забезпечують два ГРК потужністю по 20 МВт і шість тунельних підрулюючих пристроїв (по три в носу і кормі) потужністю по 1720 кВт.

Джерелом енергії утилізаційного котла паропродуктивністю 30 т/год є відхідні гази ГТД. Основний споживач теплоти – три опріснювальні установки продуктивністю по 600 т/добу. Аналогічна схема характерна для енергетичних установок CODLAG круїзних лайнерів серії «Vista class» (5 од.), більш великих суден серії «Grand class» (2 од.) і «Queen Mary II» (табл. 6.1).

Таблиця 6.1. **Характеристики круїзних суден з комбінованими енергетичними установками**

Найменування судна	Vista class	Baby Grand class	Grand class	Queen Mary II	Millennium	Radiance of the Seas
Швидкість, вузлів	22	24	24	28,5	24	24
Водотоннажність, т	84 000	88 000	113 000	15 000	90 230	90 090
Тип ЕУ	CODLAG				COGES	
Склад ГЕУ	ДГ 2×Sulzer 12ZA40C 3×Sulzer 16ZA40C ГТГ 1×LM2500	ДГ 2×Wartsila 16V46C ГТГ 1×LM2500	ДГ 2×Wartsila 8L46C 2×Wartsila 9L46C 1×LM2500+	ДГ 4×Wartsila 16V46C ГТГ 1×LM2500+	ГТГ 1×LM2500+ 1×ПТГ	ГТГ 1×LM2500+ 1×ПТГ
Потужність ЕУ, кВт	65 340	58 600	60 700	117 200	57 000	59 000

На круїзних суднах типу «Millennium» (4 од.) та «Radiance of the Seas» для приводу головних електрогенераторів застосована комбінована газопаротурбінна установка COGES (Combined Gas Turbine and steam turbine integrated Electric drive System). До складу цієї установки входять дві ГТУ з теплоутилізаційним контурами та утилізаційний паротурбогенератор.

На цих круїзних лайнерах застосовані газотурбінні двигуни виробництва компанії «GE Marine». На 17 круїзних суднах установлено

26 двигунів цієї фірми – 16 LM2500+ у складі COGES та шість LM2500+ і чотири LM2500 у складі CODLAG.

Останнім часом поширення на світовому ринку морських перевезень набуло високошвидкісне каботажне перевезення вантажів на пасажирсько-автомобільних поромах «Ro-pax» (Roll on/ Roll of passenger – судно для перевезення накатної техніки типу SWATH (Small Waterplane Area Twin Hull – катамарани з малою площею ватерлінії).

Аналіз виконаних проєктів свідчить про те, що для таких суден зі швидкістю вище 35 вузлів зазвичай застосовуються газотурбінні або комбіновані дизель-газотурбінні установки CODAG (табл. 6.2).

Енергонасиченість таких суден досягає до 68 кВт на 1 т водотоннажності, що відповідає енергонасиченості суден з динамічними принципами підтримання. Типовим представником монокорпусного високошвидкісного судна є 134-метровий пором типу «Corsaire 1300» дедвейтом 870 т, призначений для перевезення зі швидкістю 40 вузлів 1116 пасажирів і 250 автомобілів. Головна енергетична установка, виконана за схемою CODAG, розміщена у трьох суміжних відсіках: у кормовому – агрегати, що обслуговують водометні рушії, у двох інших – по одному ГТД потужністю 25 МВт і ДВЗ потужністю 6,5 МВт. Інше судно такого типу «Corsaire 14 000» дедвейтом 1300 т оснащено двома ГТД (GE LM2500) і двома дизелями сумарною потужністю 66 МВт, які працюють на чотири ВР.

Широкого застосування як високошвидкісні судна набули катамарани. Для таких суден також характерним є застосування газотурбінних установок (табл. 6.3) [1]. Так на судні «Fast Ferry 110M», призначеному для перевезення зі швидкістю 60 вузлів 700 пасажирів і 100 легкових автомобілів, застосовані чотири ГТД LM2500 сумарною потужністю 84 МВт.

Енергетична установка з ГТД як головний двигун добре компонується у вузьких корпусах катамаранів «Ro-Pax». Зниженню витрат енергії під час руху судна з високими швидкостями сприяє концепція катамарана із заглибленими корпусами типу SWATH (з малою площею ватерлінії). Великі катамарани із частковим застосуванням даної концепції – semi-SWATH – побудовані в Норвегії, Данії, Італії, Австралії. Катамарани серії HSS (Норвегія) дедвейтом 1500 т розвивають експлуатаційну швидкість близько 40 вузлів, яка забезпечується газотурбінною установкою із чотирьох ГТД сумарною потужністю 68 МВт, а на судні дедвейтом 450 т – двома ГТД потужністю по 17 МВт кожен. Концепція semi-SWATH успішно реалізована на датських катамаранах «Mai Mols», «Mie Mols» типу «Seajet 250». Пороми «Ro-Pax» дедвейтом 250 т перевозять 450 пасажирів і 120 авто. Двомашинна ГТУ сумарною потужністю 24,8 МВт здійснює привід чотирьох водометів, що забезпечує максимальну швидкість 46,4 вузли [1]. Останнім часом усе більшої популярності набувають швидкісні яхти значних (більше 35 м) розмірів.

Таблиця 6.2. **Основні характеристики високошвидкісних однопалубних суден з газотурбінними й комбінованими установками енергетичними установками**

Найменування судна	Setfoil	FoilCat	Neptune	FNSLV	NGV Liamone	Corsaire 14 000	MDV 3000	ITLV
Довжина, м	27,4	35	128	177	134	140	145	121
Ширина, м	8,5	12,0	19,4	24,0	19,6	21,8	22,0	18.0
Осадка, м	5,40	4,70	–	4,15	–	3,62	3,90	3,15
Дедвейт, т	100	193	600	4000	900	1300	1200	1100
Тип енергетичної установки	Газотурбінна				Комбінована CODAG			
Склад ГЕУ	2×RR Allison 501–KF	2×GE LM2500	2×GE LM2500	3×RR MT30	ГТД 2×GE LM2500+ ДВЗ 2×MTU 20V1163	ГТД 2×GE LM2500+ ДВЗ 2×Pielstick 20PA68	ГТД 2×GE LM2500+ ДВЗ 2×MTU 20V1163	ГТД 1×RR MT30 ДВЗ 2×Pielstick 20PA68
Потужність енергетичної установки, кВт	6800	8000	42 600	108 000	59 200	66 200	70 000	52 000
Швидкість максимальна. вуз	45	50	42	40	–	–	40	–
Швидкість експлуатаційна, вуз	–	–	–	36	43	42	–	40

Таблиця 6.3. **Основні характеристики високошвидкісних поромів з газотурбінними й комбінованими енергетичними установками установками**

Найменування судна	Villjum Clausen	HSS 900	Auto Express 125	Marinteknik 55	HSS 1500	SSCE	HSCE
Тип корпусу	Катамаран					Тримаран	
Довжина, м	86,6	89,8	125,0	55,0	126,6	155,0	214,0
Ширина, м	24,0	30,5	31,7	15,0	40,0	32,2	48,0
Осадка, м	3,2	3,9	4,9	4,5	4,8	4,5	4,9
Дедвейт, т	485	450	1200	105	1500	1500	2500
Потужність енергетичної установки, кВт	36 000	33 500	44 000	9700	68 000	54 000	104 000
Тип енергетичної установки	Газотурбінна			CODAG	COGAG	CODAG	Газотурбінна
Склад ГЕУ	2×GE LM2500	2×ЛВВ STAL GT35	2×GE LM2500	ГТД 2×TF40 ДВЗ 2×MTU 16V396	ГТД 2×GE LM2500+ ГГД 2×GE LM1600	ГТД 2×GE LM2500 ДВЗ 2×MTU I6V1163	ГТД 4×GE LM2500+
Швидкість максимальна, вуз	41	38	40,5	38	40	42	45

Станом на 2007 р. в експлуатації знаходилися декілька десятків суден довжиною від 80 до 160 м, у стадії побудови – декілька сотень яхт, з них 13 мегаяхт довжиною близько 90 м. Частина таких суден оснащена газотурбінними двигунами (табл. 6.4). Однією з найбільш швидкісних є 42-метрова мегаяхта проєкту «Millennium 140», енергетична установка якої виконана за схемою CODAG: два двигуни Paxman 18VP185 (потужністю по 4 МВт) працюють кожний на свій ВР, а установка TF80 (два ГТД Lycoming TF40 сумарною потужністю 6,8 МВт) приводить середній бустерний водомет. Максимальна швидкість ходу становить 68 вузлів. Найбільш поширеними на мегаяхтах є двигуни TF40 і TF50 (біля 20 од.).

6.6.2. Енергетичні установки суден з динамічними принципами підтримання

Енергетичні установки суден та кораблів на підводних крилах. Енергетичні установки неводотоннажних СПК та СПП повинні мати мінімальні масу й габарити, високу прийомистість, розвивати необхідну потужність. Цим вимогам достатньо повно відповідають ГТД легкого авіаційного типу.

Помірні маси ГТД дозволяють створювати енергетичні установки СПК і СПП, маса яких не перевищує 20 % водотоннажності здатних забезпечувати судну швидкість до 60 вузлів. За таких же співвідношеннях маси енергетичної установки й водотоннажності дизельні судна можуть мати швидкість не вище 40 вузлів.

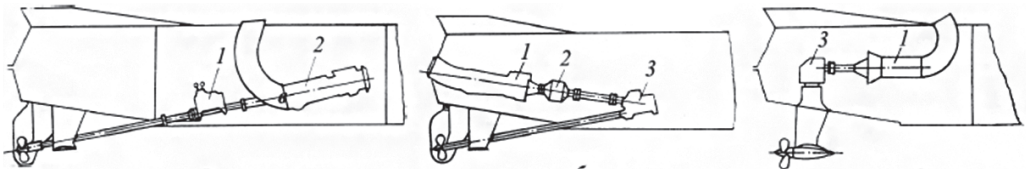
Важливими питаннями під час проєктуванні СПК є вибір компонування СЕУ та способу передачі потужності на рушій. Це пов'язано з тим, що під час виходу такого судна на крила (криловий режим) його корпус піднімається над рівнем водної поверхні на висоту до 4–5 м. У зв'язку із цим на водотоннажному режимі ГГ повинні бути розташовані зі значним заглибленням, щоб за повного ходу на крилах вісь гвинтів була занурена у воду на глибину, не меншу за діаметр гвинта.

При прямолінійній передачі потужності на гвинт необхідний кут нахилу лінії вала може бути забезпечений лише в разі розташування ГД у носовій частині судна (рис. 6.35,***а***), що суттєво подовжує лінію вала, ускладнюючи розміщення пасажирських салонів.

Передача з ламаною (V-подібною) лінією вала (рис. 6.35,***б***) дозволяє віднести ГТД у корму і вивільнити носову частину судна для пасажирського салону. Така передача вимагає застосування кутового редуктора, що ускладнює установку. Зважаючи на те, що нахил валопроводу зменшує упор гвинта і пропульсивний ККД, компонування, наведені на рис. 6.33,***а***,***б***, переважно застосовуються для СПК з відносно невеликою висотою підйому корпусу над водою. На сучасних СПК і КПК з високими мореплавними якостями передача потужності на гвинт переважно здійснюється за допомогою механічних кутових передач (рис. 6.33,***в***).

Таблиця 6.4. **Основні характеристики мегаяхт з газотурбінними й комбінованими енергетичними установками**

Найменування судна	Fortuna	Moonraker	Pershing 115	Millennium 140	Enigma Eco	Ecta Sea	Mangusta 108	Walley Power 118	Diestriero
Довжина, м	41,5	35,4	36,1	42,0	74,1	86,0	33,5	36,0	67,7
Водотоннажність. т	140	90	114	120	860	1000	94	95	1000
Швидкість максимальна, вуз	68,9	67,7	42	68	38	33	51	60	63
Тип установки	GODOG	GODAG					Газотурбінна		
Склад ГЕУ	ГТД 1×TF40 ДВЗ 2×MTU 16V396	ГТД 1×TF40 ДВЗ 2×MTU 16V396	ГТД 1×TF40 ДВЗ 2×MTU 16V4000	ГТД 2×TF40 ДВЗ 2×Paxman 18VP185	ГТД 1×LM1600 ДВЗ 2×Deutz MWM	ГТД 1×LM2500 ДВЗ 4×MTU 16V4000	2×TF50	3×TF50	3×LM1600
Потужність енергетичної установки, кВт	15 000	11 000	9600	21 600	28 000	31 000	6800	12 400	38 500



а *б* *в*

Рис. 6.33. Конструктивні схеми пропульсивних комплексів суден на підводних крилах:
а, ***в*** – з прямолінійною і кутовою передачами; ***б*** – з ламаною лінією вала;
1 – ГТД; *2* – редуктор; *3* – кутовий редуктор

Розглянемо складові компонування енергетичної установки морського пасажирського газотурбовоза на підводних крилах «Циклон-1», призначеного для швидкісних перевезень пасажирів на морських лініях з тривалістю рейсу в одному напрямку до 8 год. Довжина судна складає 44 м, водотоннажність – 137 т, кількість пасажирів на борту – 250 осіб, швидкість на крилах – 42 вузли, дальність плавання – 300 миль.

Основним елементом ЕУ судна «Циклон» (рис. 6.34) є головний ГТА М37, до складу якого входять:

реверсивний газотурбінний двигун ДО37 з газовідводом і захисними кожухами гарячих частин двигуна та газовідводу;

кутовий двоступеневий редуктор РО37 із вбудованим ГУП, який сприймає осьові зусилля від гвинта;

станції автоматичного керування, захисту, сигналізації.

Основні характеристики агрегата М37 наведені нижче:

Максимальна потужність на передньому ходу, кВт	5880
Частота обертання ГГ, хв$^{-1}$	800
Потужність на задньому ходу, кВт	600
Питома витрата палива на максимальному режимі, кг/(кВт · год)	0,295
Габарити агрегата, мм:	
довжина	6350
ширина	1900
висота	2200
Маса, т	7
Ресурс до заводського ремонту, год	8000
Термін служби, років	12

Головний двигун розташований з нахилом 4° у ніс по відношенню до основної площини. Кутовий редуктор розміщений на окремому фундаменті, газотурбогенератор ТГ16М суднової електростанції призначений для живлення електростартера постійного струму, який забезпечує запуск

ГТД розкручуванням КВТ. У середній частині судна у спеціальному приміщенні розташовані два допоміжні дизель-генератори ДГА 50М2-9, електрокомпресор і батарея балонів стисненого повітря.

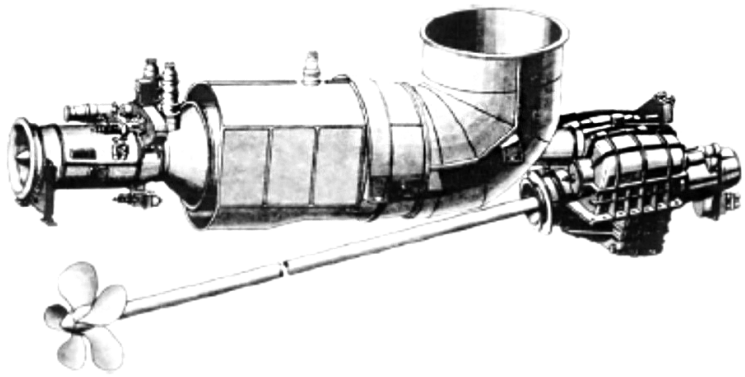


Рис. 6.34. Загальний вигляд головного ГТА М37

У редукторі передбачено стопоріння гребного вала з блокуванням, що виключає можливість запуску двигуна за включеного стопорного пристрою.

Головний ГТА обладнаний аварійними захистами: від падіння тиску масла в системах двигуна й редуктора; від перевищення частоти обертання силової реверсивної турбіни; від перевищення температури газу за ТНТ; від загасання камери згоряння (зрив факела); від зниження тиску палива в першому каналі форсунок нижче 0,6 МПа.

Реверс і режим «стоп-гвинт» забезпечує головний ГТА М37. Перекладання реверсивних пристроїв відбувається на режимі не вище 0,5 від номінальної потужності.

Цей агрегат виготовлений СПБ «Машпроєкт» у кооперації з ВО «Зоря» і поставлений у 1985 р. на феодосійське ВО «Море». Швартовні й ходові випробування закінчені у грудні 1986 р. Після експериментальної експлуатації і комерційних рейсів у Чорноморському регіоні судно «Циклон-1» здійснило перехід навкруги Європи у порт Таллінн. З талліннського порту «Циклон-1» здійснював регулярні щоденні рейси через Балтійське море до Гельсінкі. Надалі судно було продано грецькій компанії, де активно використовувалося для регулярних рейсів між островами Греції.

За результатами випробувань та робочої експлуатації першого пасажирського газотурбохода «Циклон-1» було прийнято рішення, з метою підвищення надійності подальших суден, застосовувати не один, а два газотурбінних агрегати, тобто зробити судно двовальним.

На СПБ «Машпроєкт» для проєкту «Циклон-2» було розроблено й виготовлено агрегат М39 з нереверсивним ГТД ДЕ76 потужністю 2940 кВт.

З метою підвищення економічності агрегата було передбачено реверсування редуктором.

Основні параметри головного ГТА М39 подані нижче:

Номінальна потужність переднього ходу	2940 кВт
Потужність заднього ходу	2094 кВт
Питома витрата палива	0,290 кг/(кВт · год)
Ресурс до заводського ремонту	8000 год

Особливістю головного ГТА М39 є двоступеневий двоперебірний реверсивний редуктор. Підключення двигуна до редуктора, робота агрегата на передньому ходу та маневрування з переднього на задній хід і навпаки забезпечуються фрикційно-кулачковою муфтою переднього ходу і фрикційною муфтою заднього ходу.

Мінімальний час переходу з режиму повного переднього ходу на режим повного заднього ходу – 90 с.

Судно «Циклон-2», за розмірами і водотоннажністю таке ж, як «Циклон-1», було побудоване Феодосійським ВО «Море», але головний ГТА на судні не був установлений.

Пропульсивній установці з ГТД віддається перевага і під час проєктування швидкісних поромів з динамічними принципами підтримання. На двокорпусних СПК, виготовлених у Південній Кореї і призначених для поромних перевезень зі швидкістю 45 вузлів 630 пасажирів та 160 автомобілів, знайшли застосування установки із чотирма ГТД.

Висока швидкість і маневреність СПК, високі масогабаритні характеристики, забезпечені застосуванням на них ГТД, привернули увагу фахівців з проєктування кораблів для військово-морського флоту.

У світі було створено декілька десятків типів кораблів на підводних крилах (КПК), особливо інтенсивно цей процес відбувався у 70–80-х р. XX ст.

Під час створення газотурбінних рушійних комплексів морських суден і кораблів на підводних крилах, особливо з енергетичними установками великої потужності, виникла проблема передачі потужності на ГГ. Традиційні способи передачі потужності з використанням похилого вала були непридатні, тому що при значній висоті підйому корпусу над поверхнею води збільшується кут нахилу вала й різко знижується ККД гребного гвинта, який працює у косому потоці. Поряд із цим при нахилі ГГ більше 14° відносно водної поверхні настає кавітація гвинта. У зв'язку із цим такі передачі застосовуються виключно на невеликих СПП.

На морських суднах зі значними пропульсивними потужностями використовуються виключно кутові колонки. Вони здатні передавати потужність до 15 000 кВт, можуть виконуватися підйомними для гарантування безпеки при підході судна до берега і зручності їх огляду й ремонту. Розглянемо два найбільш характерних, на наш погляд, варіанти енергетичних установок з ГТД вітчизняного виробництва, призначені для застосування на КПК. Для корабля на підводних крилах «Ураган» СПБ «Машпроєкт» був створений головний газотурбінний агрегат М10 (рис. 6.35). На корабель встановлювалися два агрегати.

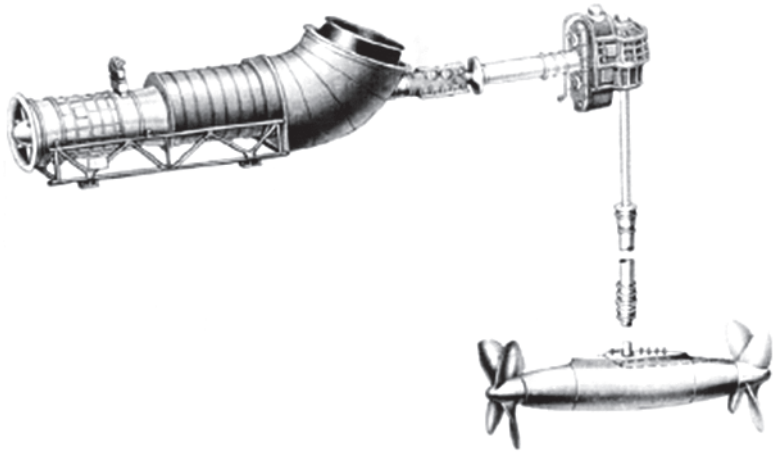


Рис. 6.35. Компонування агрегата М10

Кожен головний ГТА М10 складається з наступних елементів:

усережимного нереверсивного ГТД ДО50 з вільною силовою турбіною;

вертикальної трансмісії протяжністю 8 м, що з'єднує верхній та нижній редуктори;

нижнього редуктора, розташованого у рознімній обтічній гондолі, корпус якої виготовлений з листових типових конструкцій.

Протяжність вертикальної трансмісії вибрана таким чином, щоб при підйомі корабля над водою на 5 м гвинти переднього редуктора не виходили з води. У верхньому редукторі передбачена швидкорознімна муфта, яка дозволяє здійснювати підйом заднього кормового комплексу корабля на кут 120°.

Основні характеристики агрегата М10 наведені нижче:

Повна потужність	13 200 кВт
Питома витрата палива	0,285 кг/(кВт · год)
Ресурс	2000 год
Питома маса	0,68 кг/кВт

Швартовні випробування корабля були закінчені у 1977 р.

У 1986 р. Феодосійському заводу «Море» СПБ «Машпроєкт» був поставлений головний газотурбінний агрегат М16, призначений для використання в енергетичній установці КПК проєкту «Сокіл».

До складу енергетичної установки корабля входять розташовані по бортах два головні ГТА М10 і один агрегат М16, розміщений посередині (рис. 6.36).

Агрегат М16 складається із всережимного реверсивного ГТД ДС71 і кутової редукторної передачі, до складу якої входять редуктор двошвидкісний, верхній кутовий редуктор, нижній редуктор, вертикальна та горизонтальна трансмісії.

Кожен з трьох головних ГТА працює на два співвісних гребних гвинти фіксованого кроку, установлені на валах нижнього редуктора.

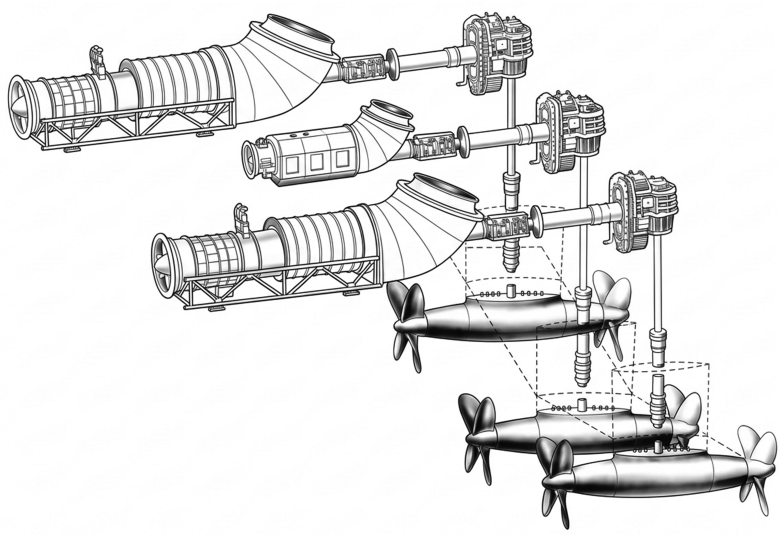


Рис. 6.36. Компонування агрегатів М10 і М16 енергетичної установки корабля «Сокіл»

Основні дані М16 зазначені нижче:

Максимальна потужність	7400 кВт
Питома витрата палива	0,285 кг/(кВт · год)
Потужність заднього ходу	740 кВт
Ресурс	10 000 год

Сумарна потужність трьох головних ГТА складає 33 800 кВт. Хід корабля у водотоннажному режимі забезпечується агрегатом М16, хід у режимі на крилах – спільною роботою всіх головних ГТА.

Енергетичні установки суден та кораблів на повітряній подушці складаються з двох комплексів: підйомного, що створює повітряну подушку, і рушійного.

Високі швидкості сучасних СПП обумовлюють велику питому потужність енергетичних установок (50…100 кВт/т). Забезпечити таку високу енергонасиченість можуть тільки ГТД легкого авіаційного типу.

До складу СЕУ входить, залежно від маси і швидкості судна, від одного до чотирьох ГТД, що можуть розміщуватися як у корпусі судна, так і у надбудові. Схеми розміщення ГТД на СПП наведені на рис. 6.37.

Двигуни можуть використовуватися як для одночасного приводу вентилятора і повітряного гвинта, так і для роздільного приводу вентилятора або гвинта.

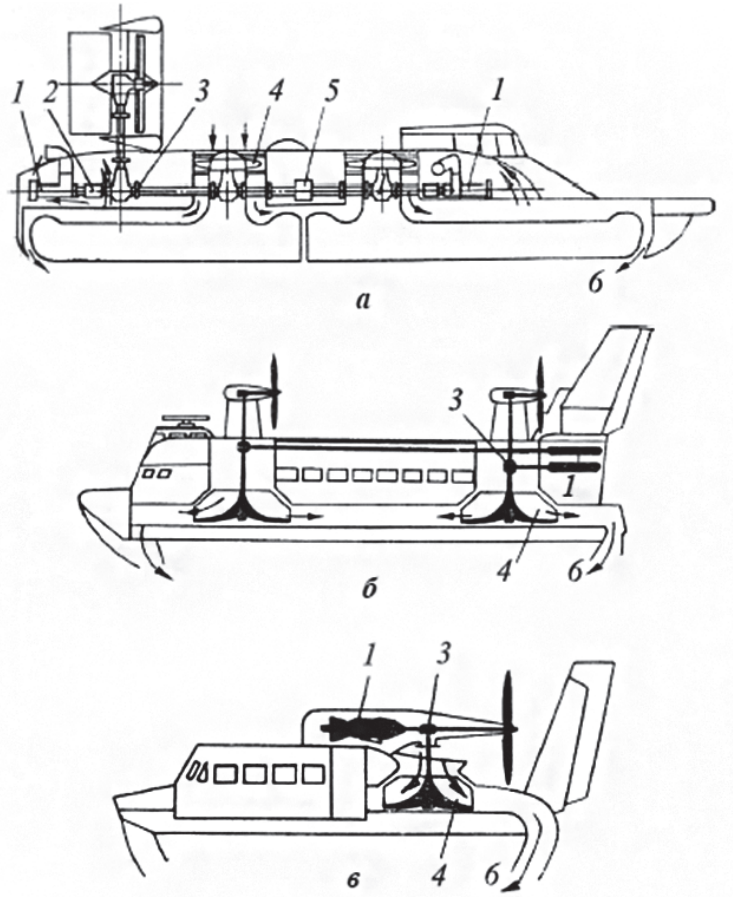


Рис. 6.37. Варіанти компонування ГТД у корпусі СПП:
а, ***б*** **–** розміщення ГТД у корпусі судна; ***в*** **–** розміщення ГТД у надбудові;
1 – ГТД; *2* – муфта; *3* – редуктор; *4* – відцентровий вентилятор;
5 – опорний підшипник; *6* – гнучке сопло

Суміщений привід вентилятора і рушія дозволяє скоротити кількість двигунів, збільшити їх одиничну потужність і, тим самим, підвищити економічність. Поряд із цим відкриваються можливості перерозподілу потужності між підйомним і рушійним комплексами залежно від умов плавання.

СПБ «Машпроєкт» – ВО «Зоря» досягли значних успіхів у створенні КПП з газотурбінними рушійними комплексами виробництва. У 70–80 рр. XX ст. було побудовано декілька десятків КПП різних розмірів, з різною енергонасиченістю, різного призначення.

Розглянемо схеми компонування та основні характеристики газотурбінних агрегатів КПП вітчизняного виробництва. Необхідно зауважити, що відпрацьованість конструкції та високі швидкісні показники ефективності КПП дають також можливості застосування їх як цивільних швидкісних суден [1].

Корабель на повітряній подушці «Джейран», став першим кораблем такого типу. Водотоннажність корабля становила 400 т, швидкість – 50 вузлів. Для цього корабля СПБ «Машпроєкт» спроєктувало, а ВО «Зоря» виготовило газотурбінний агрегат ДГ-4 сумарною потужністю 26 500 кВт, до складу якого входило два газотурбінних двигуни ДО75 (UGT16 000) та 18 редукторів різного типу (рис. 6.38).

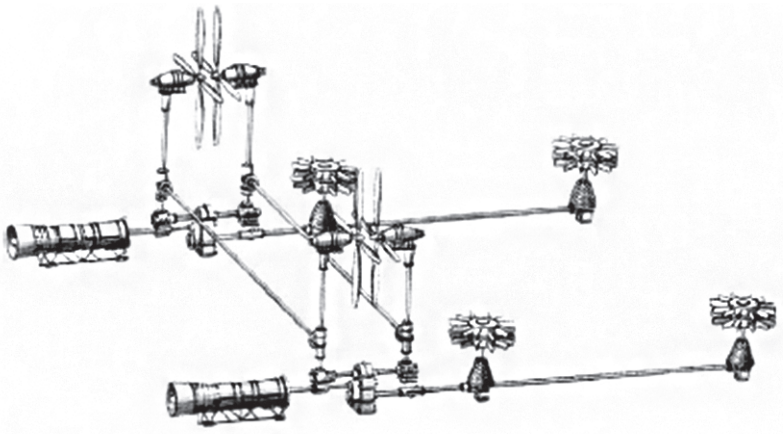


Рис. 6.38. Газотурбінний агрегат ДГ-4

Передача обертального моменту до редукторів здійснюється через гнучкі дискові муфти і торсіонні вали. Потужність відбирається з передньої частини двигуна від КНТ.

Газотурбінний двигун виконаний за схемою з блокованою силовою турбіною. Силова турбіна й турбіна низького тиску об’єднані в одну

триступеневу турбіну. Кожен ГТД приводить два вентилятори повітряної подушки і два повітряних тягових гвинти. Конструкцією пропульсивного комплексу передбачено, що у разі відмови одного з двигунів потужність іншого передається на всі гвинти й вентилятори через два торсіонних перекидних вали.

Основні параметри двигуна ДО75 наведені нижче:

Потужність	13 250 кВт
Питома витрата палива	0,285 кг/(кВт · год)
Температура газу перед ТВТ	850 °С
Маса	6150 кг
Ресурс	2000 год

Для зниження маси двигуна багато вузлів були полегшені. Передній корпус, корпус КНТ виготовлені з алюмінієвих сплавів. Двигун кріпиться на легку трубчасту раму.

Виготовлення елементів головних ГТА було завершено в 1969 р., КПП був прийнятий у 1976 р. до складу ВМФ.

Головний газотурбінний агрегат МТ70К, створений у 1975 р. СПБ «Машпроєкт» та ПТЗ «Зоря», призначався для корабля на повітряній подушці «Кальмар» водотоннажністю 130 т, швидкістю 60 вузлів, побудованого на ВО «Море» у Феодосії.

До складу агрегата МТ70К (рис. 6.39) входять: газотурбінний двигун М70 (UGT6000); редуктор роздавальний; редуктор повітряного гвинта; редуктор вентилятора; редуктор корабельних агрегатів; з'єднувальні вали з гнучкими муфтами вертикальної і горизонтальної трансмісій.

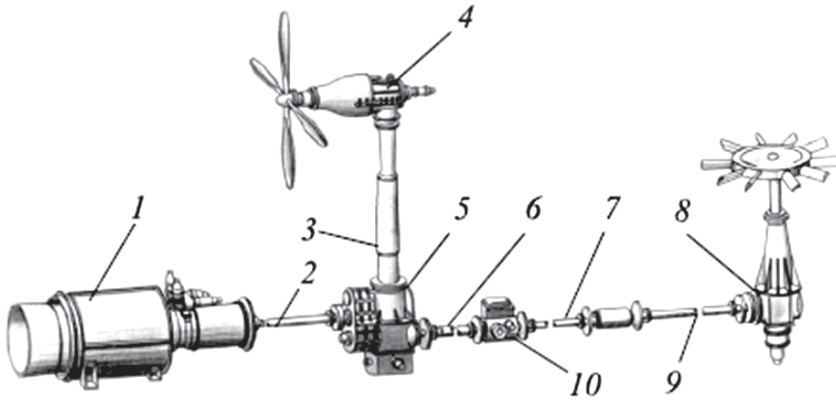


Рис. 6.39. Головний газотурбінний агрегат МТ70К корабля «Кальмар»:
1 – ГТД М70; *2*, *6*, *7*, *9* – з'єднувальні вали горизонтальної трансмісії; *3* – з'єднувальний вал вертикальної трансмісії; *4* – редуктор повітряного гвинта; *5* – редуктор роздавальний; *8* – редуктор вентилятора; *10* – редуктор корабельних агрегатів

На кожний корабель установлюються два агрегати. Потужність на вихідному фланці ГТД 7400 кВт. Питома витрата палива 0,258 кг/(кВт · год). Ресурс двигуна 500 год, механічної передачі 1000 год.

Частота обертання вихідного фланця ГТД 9500 хв$^{-1}$, редуктора вентилятора 1560 хв$^{-1}$, повітряного гвинта 1490 хв$^{-1}$. Термін роботи двигуна до середнього ремонту становить 3 роки, передачі – 5 років. Наступним етапом удосконалення ГТД для кораблів типу «Кальмар» було підвищення ресурсу двигунів до 1000 год. Такий двигун був створений і пройшов випробування в 1977 р., йому наданий індекс ДМ71. Строк служби установлений у 6 років, трансмісії – 12 років [1].

Для корабля на повітряній подушці «Омар» водотоннажністю 50 т і швидкістю ходу 60 вузлів у СПБ «Машпроєкт» був розроблений головний ГТА М34 (рис. 6.40).

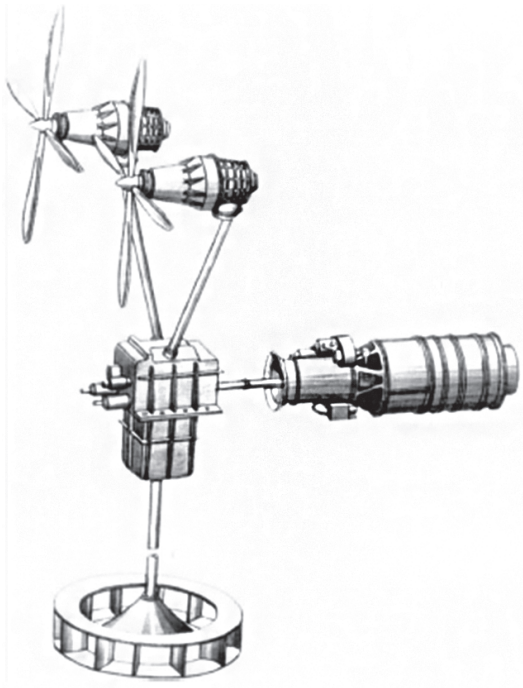


Рис. 6.40. Головний газотурбінний агрегат М34

До складу цього агрегата входять: газотурбінний двигун ДМ71 (UGT6000); редуктор роздавальний; два редуктори повітряних гвинтів правого і лівого бортів.

Потужність від ГТД передається через еластичні муфти і ресори до роздавального редуктора, від нього – до редукторів повітряних гвинтів і до редукторів нагнітачів. Конструкції роздавального редуктора,

редукторів гвинтів, редуктора нагнітача аналогічні конструкції відповідних агрегатів М70. Головний корабель був переданий флоту в 1980 р.

Основні характеристики головного ГТА М34 подані нижче:

Потужність	4400 кВт
Питома витрата палива	0,295 кг/(кВт · год)
Частота обертання силової турбіни	8500 $хв^{-1}$
Ресурс	1000 год

Найбільш досконалим витвором кораблебудування став КПП «Зубр», державні випробування якого були закінчені у серпні 1988 р.

Енергетична установка М35 корабля «Зубр» поділена на незалежні газотурбінні агрегати: три тягові агрегати М35-1 і два нагнітальні М35-2 (рис. 6.41).

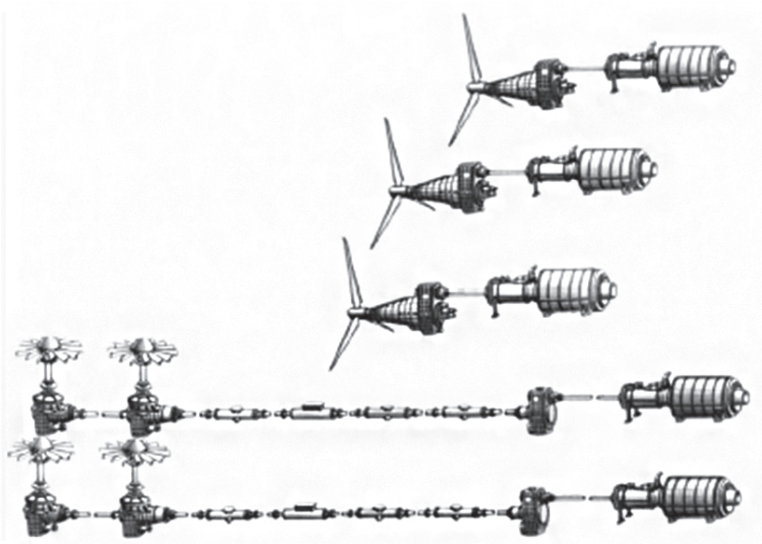


Рис. 6.41. Енергетична установка М35 корабля «Зубр»

Для енергетичної установки характерний роздільний привід нагнітачів та повітряних гвинтів, що суттєво спрощує її, зменшує кількість редукторів. До складу агрегата М35-1 входять двигун ДП71 (UGT6000) і редуктор повітряного гвинта. У складі агрегата М35-2: двигун ДП71; редуктори приводу нагнітачів, носовий і кормовий; вали трансмісії.

Основні характеристики енергетичної установки М35 подані нижче:

Сумарна потужність (5×ДП71)	36 800 (5×7360) кВт
Питома витрата палива	0,258 кг/(кВт · год)
Маса ГТД	2500 кг
Питома маса	0,680 кг/кВт

Корабель на повітряній подушці «Зубр» є перспективним для створення на його основі швидкісного вантажопасажирського судна. Існують розроблені проєкти багатоваріантної модернізації «Зубра».

6.6.3. ГТУ транспортних водотоннажних суден

Застосування газотурбінних установок у період 60–70-х рр. XX ст. на транспортних суднах дозволяло відпрацьовувати конструктивні рішення елементів суднових енергетичних установок, пов'язаних з особливостями ГТД як теплових двигунів, накопичувати досвід їх експлуатації.

Після стрімкого підвищення цін на паливо водотоннажні судна з головними ГТД, ККД яких не перевищував 30 %, стали нерентабельними. Наприкінці 70-х рр. була прийнята низка рішень стосовно заміни ГТУ багатьох суден (це контейнеровози типу «Euroliner», пором «Finnjet», серія балкерів, танкерів, поромів, ролкерів з регенеративними ГТД типу MS-3002R фірми «General Electric») на більш економічні установки з ДВЗ.

Одним з ефективних способів підвищення економічності СЕУ з ГТД є утилізація теплоти випускних газів у пароводяному контурі. Цей спосіб може бути реалізований у комбінованих ГПТУ. Використання теплоти відхідних газів двигунів простого циклу в ТУК дозволяє суттєво підвищити ККД установки за відносно невеликого зростання втрат тиску в газоповітряному тракті з утилізаційним котлом.

Відхідні гази ГТД простого циклу мають температуру 400…520 °С, яка близька до початкової температури пари в судновій паротурбінній установці, що дозволяє отримати в УК пару високих параметрів.

Необхідно зауважити, що утилізація теплоти випускних газів в утилізаційному котлі більш ефективна у ГТУ, порівняно з дизельною установкою. Це пов'язано з тим, що за однакової потужності установок температура відхідних газів та їх кількість у ГТД значно більші, ніж у ДВЗ (коефіцієнт надлишку повітря для ДВЗ становить 2,0…3,5, а для ГТД 3…5).

Кількості пари, що отримується в ТУК двигуна зазвичай достатньо для приводу утилізаційної силової парової турбіни, яка працює на гвинт через спільний з ГТД редуктор, приводу допоміжного паротурбінного електрогенератора і на загальносуднові потреби. Суднові енергетичні установки, у яких на рушій працюють газотурбінний двигун та утилізаційна парова турбіна, називають *газопаротурбінними установками* (ГПТУ).

Потужність утилізаційної силової турбіни може становити до 25 % від потужності ГТД без додаткової витрати палива.

Газотурбінна установка ролкерів типу «Атлантика». Судна водотоннажністю 35 000 т і швидкістю ходу 25 вузлів (головне судно «Капітан Смирнов») оснащені ГПТУ, у якій ГТД і парова турбіна передають потужність на гвинт через підсумовувальний редуктор. Наявність двовальної установки з двома однаковими ГПТА дає можливість їх автономного або спільного застосування, що дозволяє підвищити живучість СЕУ та її економічність. Так, наприклад, можливий режим, за якого працюють тільки ГТД і УК одного борту, а пара підводиться до УПТ другого борту, яка обертає свій гвинт. На цьому режимі витрата палива знижується на 35…40 %, а швидкість судна – лише на 20…25 % [27].

В енергетичній установці ролкерів типу «Атлантика» на кожен з двох гребних валів з ГРК працює головний газопаротурбінний агрегат М-25 (рис. 6.42).

До складу цього агрегата входить ГТД ДІ59, утилізаційний котел КУП-3100, парова турбіна ПТУ-2 з конденсатором, ежектором та головний редуктор.

Пара, яка генерується в утилізаційному котлі, використовується у пропульсивній УПТ (6 т/год перегрітої пари з тиском 1,2 МПа і температурою 310 °С), утилізаційному паротурбогенераторі УТГ-1000 (2,25 т/год насиченої пари з тиском 1,2 МПа), ще й спрямовується на загальносуднові потреби (ЗСП).

Газотурбінний двигун ДІ59 прямоточного типу, двокаскадний, з вільною силовою турбіною. Він складається з двох послідовно розташованих осьових компресорів: семиступеневого низького тиску й дев'ятиступеневого високого тиску; трубчасто-кільцевої камери згоряння з 10 жаровими трубами; турбін – двоступеневих високого і низького тисків – і реверсивної триступеневої силової турбіни.

Турбіна високого тиску приводить у дію КВТ, турбіна низького тиску – КНТ, силова турбіна передає обертальний момент на редуктор.

Потужність, яка підводиться від ГТД та ПТУ-2, підсумовується головним судновим триступеневим редуктором. Гілка потужності ГТД роздвоюється на першому ступені редуктора й розділяється на чотири потоки у другому ступені. Гілка потужності парової турбіни роздвоюється на другому ступені. Двигун з'єднується з редуктором через пружну з'єднувально-роз'єднувальну муфту, парова турбіна з'єднується з редуктором за допомогою фрикційно-кулачкової муфти, яка автоматично відключається під час виведення ПТ з дії.

Із судновим валопроводом з'єднується ведене колесо редуктора, на яке по двох гілках через шість ведучих шестерень передається обертальний момент від ГТД і УПТ.

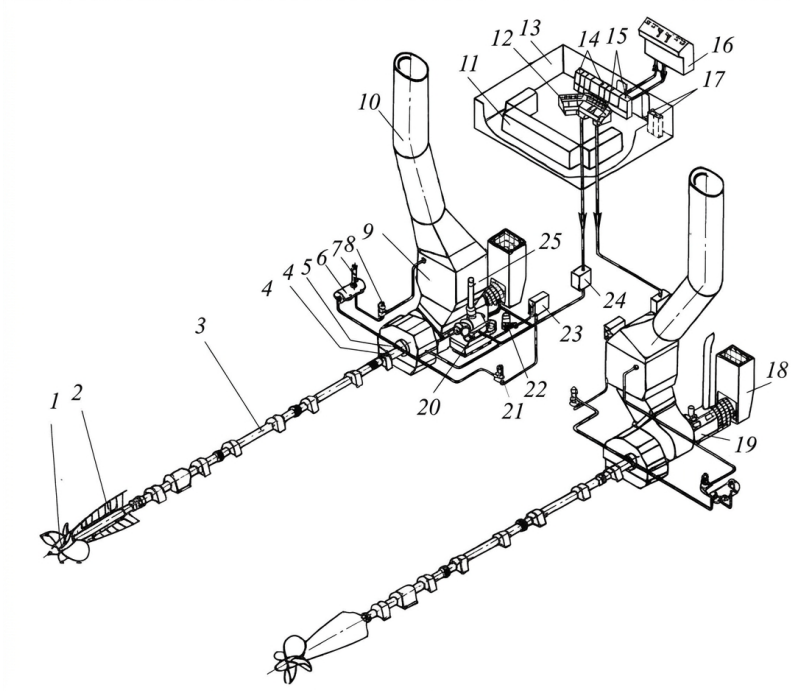


Рис. 6.42. Компонування пропульсивної газотурбінної установки газотурбоходів типу «Атлантика»:
1 – ГГ; *2* – дейдвудний пристрій; *3* – ВП; *4* – упорний підшипник; *5* – редуктор; *6* – сепаратор пари; *7*, *25* – трубопроводи подачі пари в УК та до ПГ; *8*, *21*, *22* – циркуляційний, живильний, конденсатний насоси; *9* – утилізаційний котел КУП-3100; *10* – газовипускний трубопровід; *11* – головний щит; *12*, *16* – пульти керування в ЦПК та в рульовій рубці; *13* – ЦПК; *14*, *15* – щити системи автоматизованого керування і контролю; *17* – комплекс керування загальносудновими системами; *18* – шахта прийому повітря; *19* – ГТД ДІ59; *20* – утилізаційна парова турбіна ПТУ-2; *23* – теплий ящик; *24* – станція керування ГТД

Над газовипускним патрубком ГТД розміщено водотрубний утилізаційний котел, з багаторазовою примусовою циркуляцією, прямокутної форми в поперечному перерізі.

До складу котла входять економайзер, випарний «пучок» труб, пароперегрівник. Усі «пучки» труб УК виконані з оребренням. Для відсмоктування повітря, яке надходить під теплоізоляційний кожух ГТД, охолоджує його і проходить через міжкожуховий простір котла, застосовується газоповітряний ежектор, розташований за котлом. Конструкцією утилізаційного котла передбачений сепаратор горизонтального типу, який одночасно виконує функції водяної ємності ТУК.

Паротурбінна установка ПТУ-2 (рис. 6.43) скомпонована в єдиному агрегаті. Корпус парової турбіни встановлено на двоходовому

конденсаторі, що виконує функції рами, і на якому розміщено допоміжне устаткування ПТУ. Ротор парової турбіни виконано з двома ступенями швидкості та сімома ступенями тиску.

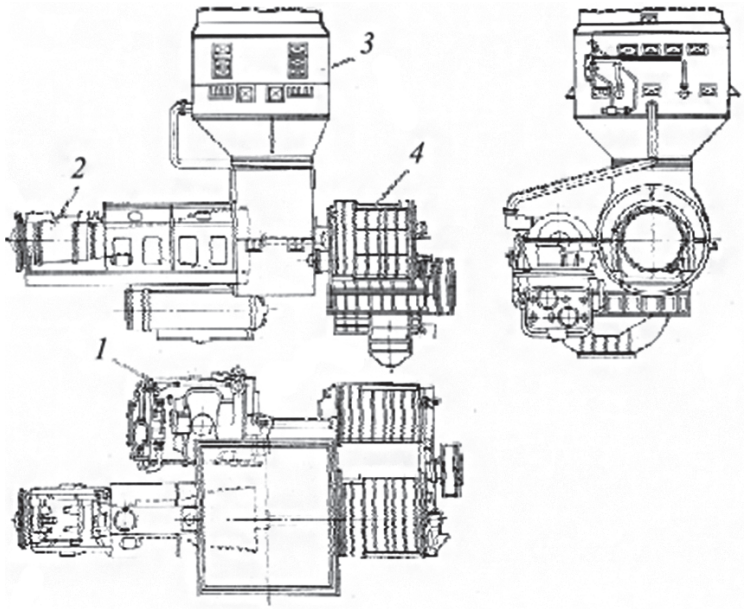


Рис. 6.43. Компонування газопаротурбінного агрегата М-25:
1 – ПТУ з конденсатором; *2* – ГТД ДІ59; *3* – утилізаційний котел КУП-3100;
4 – головний редуктор

До складу допоміжної електроенергетичної установки (рис. 6.44) включено два УТГ потужністю по 1000 кВт кожен, які працюють на перегрітій парі утилізаційних котлів, три автоматизовані дизель-генератори ДГР1000/750 потужністю по 1000 кВт при 750 хв$^{-1}$, що використовують як привід чотиритактні дизелі марки 6ЧН30/38.

Системою керування судновою електростанцією передбачено забезпечення паралельної роботи дизель- та турбогенераторів за будь-якого складу агрегатів.

Аварійним джерелом електроенергії на судні є аварійний дизель-генератор ДГРА-200/1500Р потужністю 200 кВт за 1500 хв$^{-1}$.

На ходових режимах судна забезпечення парою здійснює УК, на стоянках – допоміжний котел паропродуктивністю 6 т/год, який генерує насичену пару тиском 0,5 МПа.

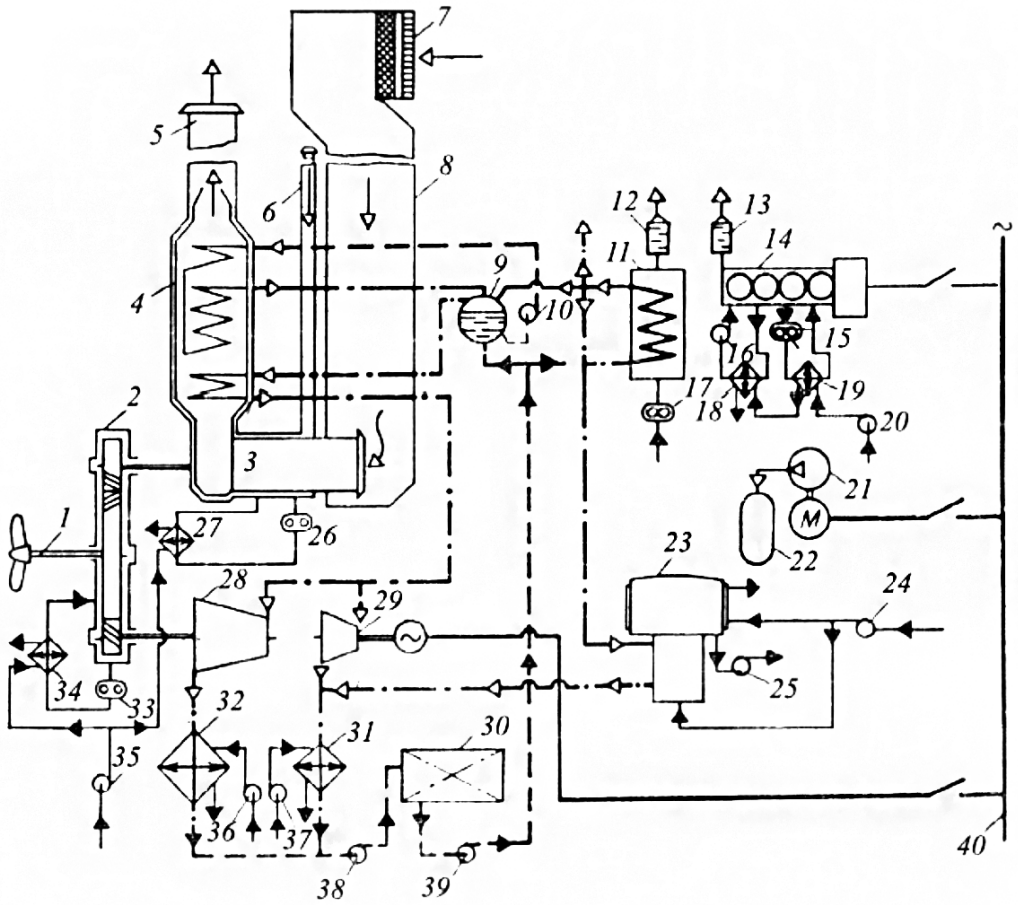


Рис. 6.44. Принципова теплова схема суднової газопаротурбінної установки:
1 – судновий ВП; *2* – головний редуктор; *3* – ГТД; *4* – УК; *5* – газовипуск; *6* – підведення повітря на охолодження кожухів ГТД та УК; *7*, *8* – повітроприймальні фільтруючий пристрій та шахта; *9* – сепаратор пари; *10* – циркуляційний насос котлової води; *11* – ДК; *12* – іскрогасник ДК; *13* – глушник шуму ДГ; *14* – ДГ; *15*, *26*, *33* – масляні насоси ДГ, ГТД і редуктора; *16* – насос охолоджувальної прісної води ДГ; *17* – паливний насос ДК; *18*, *19* – охолоджувачі прісної води та масла; *20*, *35* – насоси охолоджувальної забортної води; *21* – компресор; *22* – балон стисненого повітря; *23* – водоопріснювальна установка; *24* – насос забортної води; *25* – конденсатний насос водоопріснювальної установки; *27* – охолоджувач масла ГТД; *28* – ПТУ; *29* – ТГ; *30* – теплий ящик; *31*, *32* –конденсатори ТГ та ПТУ; *34* – охолоджувач масла редуктора; *36*, *37* – циркуляційні насоси конденсаторів ПТУ та ТГ; *38* – конденсатний насос; *39* – ЖН; *40* – електроживлення

Характеристики агрегата М25

Характеристики	Режим	
	максимальний (без відбору пари)	Номінальний (з відбором пари на ТГ і ЗСП)
Потужність переднього ходу, МВт, у т. ч.:	18,39	17,28
ГТД	14,12	
УТГ	4,27	3,16
Питома витрата палива на ГТД, г/(кВт · год)	238	256
Частота обертання вихідного вала редуктора, хв$^{-1}$	130	128
Максимальна потужність заднього ходу, МВт	–	5,74
Паропродуктивність УК, т/год, у т. ч.:	26,2	
перегрітої пари	24,0	
насиченої пари	2,2	
Тиск пари в УК, МПа	1,5	
Температура, °С:		
пари в УК	310	
випускних газів перед УК	390	
газів за УК	179	
Витрата газів в УК, кг/с	91,8	
Маса агрегата в робочому стані, т, у т. ч.:	149	
ГТД з рамою, газовипускним патрубком, маслобаком	19	
редуктор з муфтою	55	
УК	45	
Довжина загальна (від вхідного пристрою ГТД до вихідного фланця редуктора), мм	12 245	
Ширина, мм	5155	
Висота, мм, у т. ч.:	–	
з УК	10 875	
з випускним пристроєм	12 525	

Водоопріснювальна установка М3 адіабатного типу, продуктивністю 60 т/добу, працює на парі від утилізаційних або допоміжного котлів.

До складу компресорної станції стиснутого повітря входять два автоматизовані компресори високого тиску ЕКСА-7,5-4 з подачею 13 л/хв стисненого повітря тиском 2,0 МПа, два електрокомпресори середнього тиску ЕПК 70/25 з подачею 70 м^3/год повітря тиском 2,5 МПа, необхідна кількість балонів стисненого повітря високого та середнього тисків, апарати для очищення та осушування повітря високого тиску.

Енергетична установка укомплектована необхідними механізмами та устаткуванням, що забезпечує нормальне функціонування ГПТА, дизель- і турбогенераторів, допоміжного котла, систем охолодження та очищення масла і палива [1].

Комбіновані морські ЕУ з форсажною частиною

Широкого застосування серед комбінованих СЕУ на суднах і кораблях набули дизель-газотурбінні установки. Це пояснюється тим, що найбільшою економічністю за витратою палива у широкому діапазоні навантажень володіють дизелі, і використання їх як маршових дозволяє забезпечити значну дальність плавання.

Енергетична установка криголамів типу «Polar Star». Типовими представниками таких установок є енергетичні установки криголамів берегової охорони США типу «Polar Star», довжина яких складає 126,6 м, водотоннажність – 10,8 тис. т (рис. 6.45).

Тривальна СЕУ криголама складається із шести маршових дизель-генераторів загальною потужністю 14 700 кВт і трьох форсажних ГТД типу FT4A-2 сумарною потужністю 44 000 кВт. На кожен гвинт можуть працювати два дизель-генератори базової установки, що виробляють змінний струм, який через тиристорний випрямляч надходить до гребного електродвигуна, або один форсажний ГТД через зубчасту передачу.

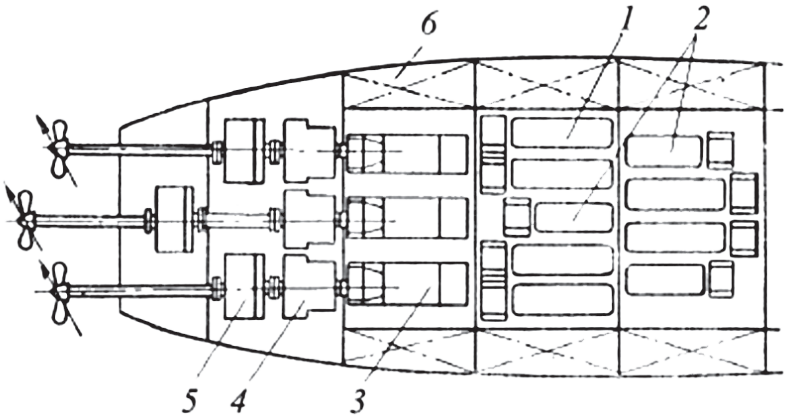


Рис. 6.45. Схема компонування енергетичної установки криголамів типу «Polar Star»:

1 – головні дизель-генератори маршової установки; *2* – допоміжні ДГ; *3* – форсажні ГТД; *4* – редуктори форсажних ГТД; *5* – гребні електродвигуни маршової установки; *6* – паливні цистерни

Під час електроруху (працюють лише дизелі) забезпечується прохід криголаму в льодовому полі товщиною до 1,2 м. Під час подолання льодових полів більшої товщини вмикаються ГТД, а дизель-генератори зупиняються. У цьому випадку за безперервного руху зі швидкістю 3 вузли криголам долає кригу товщиною 1,8 м, а під час роботи послідовними рухами (набігами) до 6,4 м.

Більш широкого застосування комбіновані установки з форсажною частиною знайшли на кораблях військово-морського типу.

Далі розглядаються схеми комбінованих установок військових кораблів різного призначення з газотурбінними агрегатами виробництва СПБ «Машпроєкт» – ПТЗ «Зоря».

Головний газотурбінний агрегат М7 (рис. 6.46) розроблений для великого протичовнового корабля водотоннажністю 3200 т і швидкістю 32,5 вузлів.

Агрегат складається з таких вузлів [1]: двох реверсивних маршових газотурбінних двигунів типу М60 потужністю по 4400 кВт; двох маршових двошвидкісних редукторів; маршової редукторної приставки, що з'єднує між собою маршові редуктори; двох реверсивних ГТД повного ходу ДО54Р потужністю по 14 700 кВт кожен; двох редукторів повного ходу зі швидкодійними шинно-пневматичними муфтами.

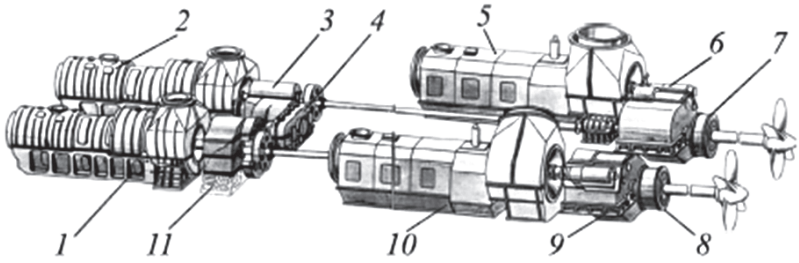


Рис. 6.46. Головний газотурбінний агрегат М7:
1, *2* – маршові ГТД М60; *3*, *11* – маршові редуктори; *4* – міжредукторна приставка; *5*, *10* – ГТД повного ходу ДО54Р; *6*, *9* – редуктори повного ходу; *7*, *8* – звукоізолюючі муфти

Цікаве рішення стосовно передачі потужності застосовано в цьому агрегаті. З'єднання вихідного вала форсажного редуктора з ВП від маршового редуктора, який проходить у середині нього, здійснюється за допомогою шинно-пневматичної муфти. На валопроводі розташовується ГУП. З'єднання валопроводів обох бортів здійснюється маршовою міжредукторною приставкою, яка дозволяє здійснити режим роботи одного маршового двигуна на два ГГ.

Максимальна потужність агрегата становить 34 200 кВт.

Головний газотурбінний агрегат М5 був розроблений СПБ «Машпроєкт» для великого протичовнового корабля проєкту більшої водотоннажності – 8500 т.

На корабель установлені два агрегати. Кожен агрегат (рис. 6.47) складається з маршової установки та установки повного ходу, які працюють

на загальний гребний вал. До складу маршової установки входять реверсивний двигун М60 потужністю 4400 кВт і двошвидкісний маршовий редуктор.

Установка повного ходу призначена для забезпечення високих швидкостей. До її складу входять два основні двигуни ДО54 (М3А) потужністю кожного по 14 700 кВт, розміщені на одній рамі, та підсумовувального основного реверсивного редуктора.

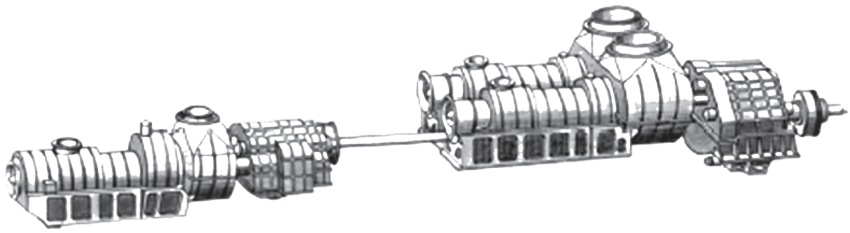


Рис. 6.47. Газотурбінний агрегат М5

Загальна потужність енергетичної установки корабля за потужності кожного головного ГТА 33 800 кВт складає 67 600 кВт. Це найпотужніша корабельна енергетична ГТУ.

Головний газотурбінний агрегат М15 створений для ракетного катера водотоннажністю 500 т, швидкістю 43 вузли.

Агрегат М15 складається з установок маршового ходу (два маршові реверсивні двигуни ДО76 правого й лівого бортів, два маршові планетарні двошвидкісні редуктори) та повного ходу, до складу якої входять два реверсивні ГТД ДО77 правого й лівого бортів та два кутові редуктори (рис. 6.48).

Маршові установки можуть працювати як спільно з установкою повного ходу, так і автономно, тобто за загальноприйнятою класифікацією – тип COGAG. Маршові редуктори обох бортів з'єднані між собою валом-перекидкою, що дозволяє передавати потужність будь-якого маршового двигуна на два гребні вали, забезпечуючи економічний хід корабля. Маршові редуктори двошвидкісні: під час роботи тільки з маршовими двигунами вмикається перша швидкість, спільна робота з двигунами повного ходу здійснюється на другій швидкості.

Редуктор повного ходу двоступеневий, з роздвоєнням потужності та вбудованим ГУП, який сприймає упор від гребного гвинта.

Максимальна потужність агрегата М15 складає 24 300 кВт.

Головний ГТА допускає реверсування за будь-якої кількості двигунів на потужності не більше 40 % номінальної, підключення і відключення будь-якого ГТД без зниження швидкості корабля дозволяють здійснювати

режим «стоп-гвинт», за якого турбіни гвинта мають нульовий обертальний момент.

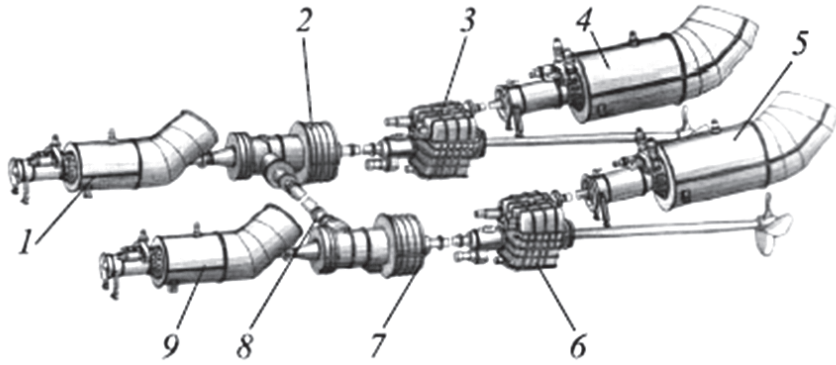


Рис. 6.48. Головний газотурбінний агрегат М15:
1, *9* – маршові ГТД ДО76; *2*, *7* – маршові планетарні двигуни; *3*, *6* – кутові редуктори повного ходу; *4*, *5* – ГТД повного ходу ДО77; *8* – вал-перекидка

Головний газотурбінний агрегат М27 призначений для застосування у газотурбінній енергетичній установці типу COGAG корабля проєкту «Ястреб». Він виконаний за схемою агрегата М7 і відрізняється застосуванням ГТД третього покоління ДС71 і ДО90 підвищеного ресурсу.

Основні характеристики агрегата М27 наведені нижче:

Потужність на повному передньому ходу, кВт	41 800
Потужність повного маршового ходу, кВт	13 800
Потужність повного заднього ходу, кВт	8000
Ресурс, год, у т. ч.:	
маршових ГТД	30 000
форсажних ГТД	20 000
маршових редукторів	40 000
форсажних редукторів	20 000

Агрегат М27 виготовлений на ВО «Зоря» у 1988 р.

Головний газотурбінний агрегат М21 спроєктований для корабля «Атлант» (водотоннажність складає 11 500 т, швидкість ходу – 32,5 вузлів).

До складу головного ГТА М21 входять маршова установка та установка повного ходу, яка складається з двох усережимних газотурбінних двигунів ДТ59 і редуктора зі звукоізолюючою муфтою.

До складу маршової установки входять усережимний реверсивний ГТД ДС71, двоступеневий редуктор зі звукоізолюючою муфтою і паровий ТУК, який використовує теплоту відхідних газів маршового двигуна (рис. 6.49).

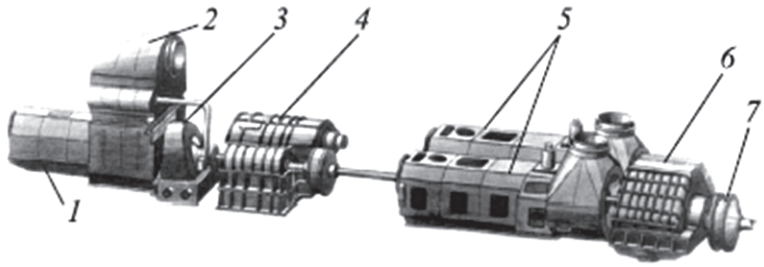


Рис. 6.49. Головний газотурбінний агрегат М21:
1 – маршовий реверсивний ГТД ДС71; *2* – утилізаційний паровий котел;
3 – ПТ; *4* – маршовий редуктор; *5* – ГТД повного ходу ДТ59; *6* – редуктор повного ходу;
7 – звукоізолююча муфта

Теплоутилізаційний контур складається з утилізаційного парового котла і ПТ з конденсатором. Паровий котел розташований на газовідвідному патрубку маршового двигуна. Параметри перегрітої пари, яку виробляє котел: температура складає 310 °С, тиск – 1,1 МПа, паропродуктивність – 10,8 т/год.

Маршовий ГТД і парова турбіна через ресори передають обертання на спільний маршовий редуктор, який пов'язаний з веденою частиною звукоізолюючої муфти редуктора повного ходу.

На режимі повного ходу працюють маршова газотурбінна установка й газотурбінна установка повного ходу, тобто енергетична установка корабля належить до категорії COGAG. Загальна потужність головного ГТА в режимі повного ходу становить 40 000 кВт, питома витрата палива маршової установки – 238 г/(кВт год), установки повного ходу – 300 г/(кВт год). Ресурс маршового ГТД 10 000 год, ГТД повного ходу 5000 год.

Головний корабель під назвою «Слава» побудований суднобудівним «Заводом ім. 61 комунара». Обладнання головного ГТА М21 виготовлено й поставлено у червні 1981 р.: ГТД і редуктори – ВО «Зоря», парова турбіна з конденсатором – НВП «Машпроєкт», УК – Чорноморським суднобудівним заводом. Ходові випробування завершені у червні 1982 р.

Дизель-газотурбінні агрегати. На ракетному катері «Молнія-1» (швидкість складає 41 вузол, водотоннажність – 470 т) установлений агрегат М15А, до складу якого як маршові входять ДРА з дизелями потужністю по 2950 кВт (рис. 6.50).

Повний хід корабля забезпечується роботою ДРА і газотурбінних двигунів ДС77 (схема CODAG). Загальна потужність повного ходу становить 28 500 кВт.

У дизель-газотурбінному агрегаті М44 як маршовий застосовано реверсивний дизель потужністю 5500 кВт, який працює через міжредукторну приставку і редуктори на два ГГ (рис. 6.51).

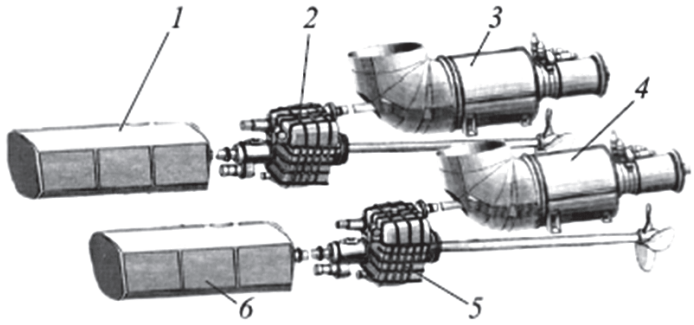


Рис. 6.50. Головний газотурбінний агрегат М15А:
1, *6* – маршові дизелі; *2*, *5* – редуктори; *3*, *4* – газотурбінні двигуни повного ходу ДС77

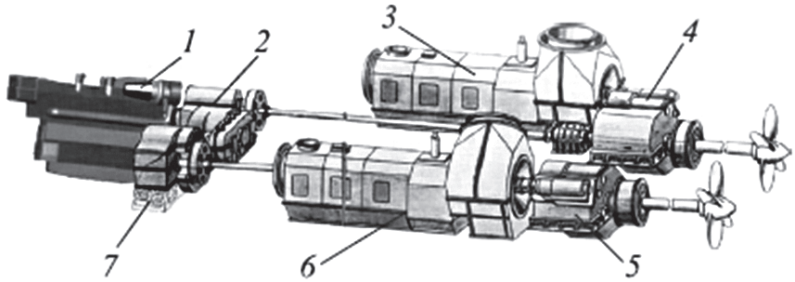


Рис. 6.51. Головний дизель-газотурбінний агрегат М44:
1 – дизельний двигун; *2* – міжредукторна приставка; *3*, *6* – ГТД повного ходу М90;
4, *5* – редуктори повного ходу; *7* – маршовий редуктор

Повний хід корабля забезпечують два реверсивні ГТД ДО90, які працюють кожен через редуктор на свій гребний гвинт. Під час роботи двигунів повного ходу дизель не працює (схема CODOG). Загальна потужність повного ходу становить 35 500 кВт.

6.7. Характеристики суднових ГТД провідних виробників

У табл. 6.5 наведені основні світові виробники морських ГТД. Табличні дані свідчать, на наш погляд, що Україна безумовно знаходиться у першій п'ятірці світових виробників. Обґрунтуванням цього є те, що типорозмірний ряд ГТД, які випускаються серійно НВГК «Зоря» – «Машпроєкт» (Україна, м. Миколаїв), повністю перекриває діапазон потужностей від 3,1 до 26,7 МВт. Розроблені ГТД потужністю 40 та 60 МВт, освоєно виробництво двигуна для енергетики потужністю 110 МВт. Винятковою перевагою ГТД даного підприємства є те, що всі вони проєктувалися для морських умов застосування.

У дод. С подані характеристики морських ГТД основних світових виробників.

Таблиця 6.5. **Фірми-виробники суднових ГТД [46]**

Фірма	Країна	Ряд потужності ГТД, кВт
General Electric Marine	США	4420, 14 100, 24 300, 42 200
Pratt & Whitney Power Systems		25 450, 27 100
Vericor		2940, 3650, 3750
Ishikawajima – Harima Heavy Industries	Японія	4100, 4150, 6380, 7730, 14 100, 243.29 800. 42 200
Kawasaki Heavy Industries		3930, 12 600, 15 800. 17 780
Mitsubishi Heavy Industries		24 460
MAN Turbo AG,	Німеччина	11 050, 24 600
MTU Friedrichshafen GMBH		14 100, 24 300, 28 700
Rolls-Royce	Англія	3900, 4440, 19 250, 24 900, 35 800
«Зоря» – «Машпроєкт»	Україна	3120, 3310, 6260, 6700, 8320, 10 670, 14 700, 15 600, 16 000, 17 000, 20 200, 26 700
Pratt & Whitney	Канада	596, 724, 1940, 3990
Turbomeca	Франція	1180

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. *Розгляньте принципи дії суднового газотурбінного двигуна зі згорянням за постійного тиску.*
2. *У чому полягає основна відмінність принципу дії ГТД зі згорянням за постійного об'єму від ГТД зі згорянням за постійного тиску?*
3. *Чому ГТД, виконані за схемою з блокованою судновою турбіною, непридатні для застосування у суднових енергетичних установках?*
4. *Які переваги суднового ГТД, виконаного за двокаскадною схемою?*
5. *Розгляньте способи ускладнення схем і циклів ГТД, застосовуваних з метою підвищення ККД.*
6. *Наведіть схеми суднових ГТА:*
   - *з проміжним охолодженням повітря;*
   - *з регенерацією теплоти відхідних газів;*
   - *з проміжним підігрівом газу;*
   - *з паротурбінним ТУК.*
7. *Які особливості контактного газотурбінного агрегата з ТУК?*
8. *Надайте характеристику процесу конвертування авіаційних ГТД у суднові.*
9. *Як відбувалось перше у світі морське застосування газотурбінного двигуна?*
10. *Наведіть характеристики ГТД «Protey 1260».*
11. *Як відбувався випуск відпрацьованих газів ГТД «Protey 1260», установленого на торпедному катері?*
12. *За якою схемою працювала експериментальна суднова ГТУ RM-60?*
13. *Як за міжнародною класифікацією позначаються комбіновані енергетичні установки? Наведіть приклади.*
14. *Охарактеризуйте послідовність упровадження ГТД на танкері «Auris».*
15. *За якою схемою був виконаний ГТД танкера «Auris»?*
16. *Порівняйте характеристики першої та другої ГТУ танкера «Auris».*
17. *Надайте характеристику ГТУ судна «John Sergeant»:*
   - *схема, за якою виконано ГТА;*
   - *утилізація теплоти відхідних газів;*
   - *запуск ГТД;*
   - *конструктивна схема ГТД;*
   - *параметри ГТД та питома витрата палива.*
18. *Які напрямки розвитку морських ГТД склалися на кінець 50-х рр. XX ст.?*
19. *Який принцип забезпечення руху протичовневих кораблів з агрегатами ГТК Д2 та ГТК Д3?*
20. *Розгляньте принцип реверсування суднового ГТД, розробленого на СПБ «Машпроєкт».*

21. *Надайте характеристику ГТД третього покоління вітчизняного виробництва.*
22. *Наведіть характеристики ГТД 25 000 – першого вітчизняного ГТД четвертого покоління.*
23. *Розгляньте конструктивну схему та характеристики LM 2500.*
24. *Які конструктивні особливості ГТД «Spey»?*
25. *Порівняйте ГТД LM 1600 та ГТД LM 2500 за конструктивною схемою і ККД.*
26. *Надайте характеристики ГТД FT8.*
27. *Розгляньте загальну будову ГТД WR-21.*
28. *У чому полягає принципова відміна ГТД LM 2500 від базової моделі?*
29. *Надайте характеристику ГТД MT30.*
30. *Охарактеризуйте ГТД UGT 25 000 за конструктивною схемою і параметрами циклу.*
31. *Як здійснюється запуск ГТД UGT 25 000?*
32. *Розгляньте рух повітря і продуктів згоряння у ГТД UGT 25 000.*
33. *Які особливості конструкції КНТ UGT 25 000?*
34. *Що відбувається в разі перевищення осьового навантаження на шарикопідшипник передньої опори КНТ ГТД UGT 25 000?*
35. *Як забезпечується стала робота КНТ ГТД UGT 25 000 у заданому діапазоні режимів?*
36. *Чим приводиться механізм повороту спрямних апаратів перших ступенів КНТ ГТД UGT 25 000?*
37. *Який тип ротора КНТ ГТД UGT 25 000? З яких елементів він складається?*
38. *У чому полягає призначення перехідника ГТД UGT 25 000?*
39. *Розгляньте будову ротора КВТ ГТД UGT 25 000.*
40. *Назвіть основні елементи камери згоряння ГТД UGT 25 000.*
41. *Покажіть спосіб кріплення жарових труб у камері згоряння ГТД UGT 25 000.*
42. *З яких елементів складається сопловий апарат ТВТ ГТД UGT 25 000?*
43. *Розгляньте конструкцію ротора ТВТ ГТД UGT 25 000.*
44. *Які особливості будови соплового апарата ТНТ ГТД UGT 25 000?*
45. *Розгляньте загальну будову ротора ТВТ ГТД UGT 25 000.*
46. *Розгляньте конструкцію елементів силової турбіни ГТД UGT 25 000.*
47. *Розгляньте принцип дії реверсивної турбіни суднового ГТД.*
48. *Проаналізуйте можливість забезпечення вимог Додатка VI Конвенції MARPOL застосуванням ГТД на пасажирських суднах.*
49. *Які енергетичні установки отримали поширення для високошвидкісних поромів?*
50. *Наведіть вимоги, яким повинні відповідати енергетичні установки СПК та СПП, і покажіть доцільність застосування ГТД на таких суднах.*

51. *Розгляньте можливі варіанти компоновки ГТД на СПК і покажіть, які з них мають переваги для застосування.*
52. *З яких елементів складаються енергетичні установки СПП?*
53. *Чим пояснюється більш висока ефективність утилізації теплоти відхідних газів ГТД порівняно з ДВЗ?*
54. *Яку частину від потужності ГТД може складати потужність УПТ?*
55. *Надайте загальну характеристику ГПТА М25 судна типу «Атлантика».*
56. *Розгляньте склад ГПТА М25.*
57. *Наведіть повну характеристику ГТД ДІ59: компресорів, камери згоряння, турбін.*
58. *Як організовано охолодження ГТД ДІ59 ГПТА М 25?*
59. *Розгляньте будову ПТУ-2 ГПТА М-25.*
60. *Наведіть склад та характеристики суднової електростанції ГПТУ судна типу «Атлантика».*
61. *Надайте характеристику СЕУ криголама «Polar Star».*
62. *Розгляньте склад та компоновку ГГТА М21: маршова установка, установка повного ходу, ТУК маршової установки.*
63. *Яка з частин камери згоряння відіграє вирішальну роль в утворенні забруднюючих речовин?*
64. *Наведіть відсоток оксидів азоту в сумарній токсичності вихлопних газів ГТД.*
65. *За якою реакцією в КЗ ГТД відбувається утворення* NO*x з атмосферного повітря?*
66. *На що спрямовані засоби зниження викидів оксидів азоту?*
67. *Розгляньте принцип реалізації основних засобів зниження викидів оксидів азоту з відхідними газами ГТД:*
    – *інтенсифікація процесів сумішоутворення;*
    – *скорочення часу перебування суміші в зоні високих температур;*
    – *збіднення суміші в зоні горіння;*
    – *циркуляція продуктів згоряння;*
    – *підведення в зону горіння води або водяної пари;*
    – *застосування альтернативних палив.*

ГЛАВА 7. ЗАСТОСУВАННЯ АТОМНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК НА СУДНАХ

7.1. Виникнення і становлення атомної енергетики

Безумовно, визначальним у виникненні атомної енергетики можна вважати відкриття у листопаді 1895 р. німецьким фізиком Вільгельмом Конрадом Рентгеном загадкових променів, які зараз увесь світ називає *рентгенівськими.* Дослідники припускали, що рентгенівське випромінювання супроводжує фосфоресценцію – холодне світіння деяких речовин. Піддані впливу сонячного світла, такі речовини певний час здатні мимовільно світитися. Перевіряючи цю гіпотезу, французький учений Анрі Беккерель 1 березня 1896 р. відкрив нове явище – промені невідомого типу, джерелом яких був хімічний елемент уран. Він назвав ці промені урановими.

Уран був не єдиним елементом, який здатний виділяти нові промені. Співвітчизники Беккереля П'єр та Марія Кюрі з десятків тонн руди виділили міліграми невідомих раніше елементів – полонія і радія, здатних на аналогічне випромінювання й провели їх детальне вивчення. Подібні якості дослідники винайшли й у торія. Промені, відкриті Беккерелем, стали називати *радіоактивними* (від латин. «радіус» – промінь), а саме явище їх випромінювання – радіоактивністю.

Визначенню природи радіоактивності та можливості її практичного застосування були присвячені роботи таких всесвітньо відомих фізиків, як О. Ган, Ф. Штрасман, Е. Фермі, К. Андерсон, Е. Резерфорд, Д. Чедвік.

Нарешті, у грудні 1942 р. у Чикаго (США) під керівництвом італійського фізика Енріко Фермі була здійснена керована ядерна ланцюгова реакція, яка проходила в першому у світі атомному реакторі. Ці роботи проводилися в умовах надсекретності, тому що, на жаль, кінцевою метою робіт було створення атомної бомби.

Приблизно в цей же час у СРСР були поновлені перервані початком Другої світової війни роботи з опанування енергії атома, очолювані академіком І. В. Курчатовим. Ці роботи завершилися створенням атомного реактора, у якому 25 грудня 1946 р. була здійснена керована ядерна реакція.

Перше практичне застосування атомної енергії принесло жахливі наслідки. У 1945 р. літаки США скинули розроблену американськими

вченими атомну бомбу на два японських міста – Хіросіма і Нагасакі. Загинули десятки тисяч мирних мешканців.

Далі події, пов'язані з використанням атомної енергії, розвивалися наступним чином: у 1954 р. у Радянському Союзі дала енергію перша у світі атомна електростанція потужністю 5000 кВт.

Перед підводними човнами атомна енергетична установка (АЕУ) відкривала майже необмежені можливості, дозволяючи кардинально вирішувати дві проблеми, які були визначальними протягом усієї історії підводного плавання: підвищення підводної швидкості ходу й забезпечення тривалого знаходження підводного човна під водою без спливання на поверхню води для зарядження акумуляторних батарей.

Розпочинаючи з 1955 р., коли у США було побудовано перший у світі атомний підводний човен «Nautilus», на довгі 35 років розтягнулося змагання між двома державами – США та СРСР – за першість у створенні все нових і нових підводних атомних велетнів.

Цікава інформація! **Як це відбувалось у США.** Закладання першого у світі підводного човна відбулося 14 червня 1952 р. на верфі «Electric Boats» у м. Гротон (штат Коннектикут). До паровиробної установки корабля водотоннажністю 3200/3800 т (відповідно, у надводному та підводному стані) входили один водо-водяний реактор «S2W» та два парогенератори. 17 січня 1955 р. об 11 год «Nautilus» своїм ходом відійшов від пірсу на випробування. Через три місяці, після успішного проходження здавальних випробувань підводний човен було включено до складу ВМС США. Реактор атомної енергетичної установки містив 100 кг ядерного палива, збагаченого до 20 % ізотопом «уран-235». Основні розміри реактора: діаметр складав 2,7 м, висота – 3,0 м, висота активної зони – 1 м. Теплова потужність ядерного реактора складала 60 МВт, він забезпечував роботу двох парових турбін потужністю по 5500 кВт, які через зубчастий редуктор обертали гребні гвинти діаметром 2,8 м. Як теплоносій першого контуру використовувався бідистилят, температура якого на виході з реактора становила 260 °С за тиску 14 МПа. На виході з парогенераторів пара мала температуру 230 °С і тиск 1,8 МПа. Живлення електричного обладнання забезпечували: чотири турбогенератори потужністю по 650 кВт (напруга 450 вольт, частота току 60 Гц; два дизель-генератори потужністю по 300 кВт та акумуляторна батарея із 12 елементів. З першим завантаженням ядерного палива «Nautilus» пройшов 69 138 миль за швидкості ходу до 20/23 вузлів. У 1980 р. підводний човен виведений зі складу флоту й переобладнаний на музей.

Одночасно зі створенням АЕУ з водо-водяним реактором у США проводились інтенсивні дослідження, спрямовані на створення оптимальної конструкції паровиробної установки. Одним із перспективних напрямків вважався ядерний реактор з рідкометалевим теплоносієм.

У 1957 році на підводному човні «Seawolf» водотоннажністю 3560/4210 т, побудованому на верфі у м. Гротон, була встановлена паровиробна установка, яка складалася з одного реактора «S2G» з натрієвим теплоносієм (температура плавлення складала 98 °С, температура кипіння, за атмосферного тиску 833 °С) та двох парогенераторів. Температура натрію на виході з реактора досягала 480 °С, тиск – 0,5 МПа. З урахуванням властивостей натрію паровиробна установка була виконана триконтурною.

Рідкометалевий реактор тепловою потужністю 50 МВт на проміжних нейтронах з графітовим уповільнювачем забезпечував роботу двох парових турбін потужністю по 5500 кВт. Пара для роботи турбіни на виході з парогенератора мала температуру 430 °С за тиску 4,25 МПа. Підводний човен «Seawolf» розвивав швидкість 19/20 вузлів. Надійність паровиробної установки з рідкометалевим теплоносієм під час експлуатації виявилась недостатньою, що призвело до практичного зупинення робіт з таким типом реакторів.

Сучасні підводні човні ВМС США оснащені уніфікованою ядерною енергетичною установкою «SWS», яка включає в себе водо-водяний реактор тепловою потужністю 60…75 МВт, дві парові турбіни потужністю по 15 000…20 000 кВт, що обертають гребний гвинт через підсумовувальний редуктор з частотою 150 $хв^{-1}$ та два автономні турбогенератори потужністю 1800…2500 кВт (450 В, 60 Гц). Реактор працює на збагаченому до 40 % ізотопі «уран-235»; маса реактора – 25 т, діаметр – 2,4 м та висота – 2,8 м. Як резервні засоби руху та електроживлення використовуються гребний електродвигун постійного струму потужністю 400 кВт, дизель-генератор потужністю 600 кВт та акумуляторна батарея з 126 елементів, маса кожного з них – 450 кг. В останні роки з'явилась інформація про те, що на сучасні атомні підводні човни США встановлюються реактори, кампанія[9] яких відповідає терміну служби атомного підводного човна.

Перший атомний підводний човен «Лєнінський комсомол» у колишньому Радянському Союзі був побудований у 1958 р.

Цікава інформація! **Як це відбувалось у колишньому СРСР.** З липня 1958 року перший підводний човен «К-3» пр. 627 з АЕУ водотоннажністю 3065 т, за проєктом СКБ-143 (СП МБМ «Малахіт») вийшов у море на ходові випробування. На підводному човні були встановлені два водо-водяних реактора «ВМ-А» і два парогенератори. Ядерні реактори тепловою потужністю по 70 МВт на теплових нейтронах з парогенераторами продуктивністю водяної пари 180 т/год забезпечували роботу двох турбін потужністю по 12 900 кВт.

Температура теплоносія (бідистилята) на виході з реактора становила 335 °С, тиск – 20 МПа; пара на виході з парогенераторів мала температуру 310 °С і тиск – 3,2 МПа.

У підводному стані човен розвивав швидкість ходу 23,3 вузлів за теплової потужності реакторів 60 % від номінальної. Підводний човен перебував в експлуатації до 1988 р. За проєктом 627 була побудована серія у 12 атомних підводних човнів.

У 1963 р. на підводний човен «К-27» пр. 645 водотоннажністю 3414 т було встановлено паровиробну установку, яка складалась з двох ядерних реакторів з рідкометалевим теплоносієм. Ядерні реактори тепловою потужністю по 73,5 МВт на проміжних нейтронах з берилієвим уповільнювачем і парогенератори продуктивністю 193 т/год забезпечували роботу двох турбін потужністю по 12 900 кВт. Як теплоносій першого контуру був застосований сплав свинець-вісмут (температура плавлення складала 125°С, температура кипіння – 910°С). Пара до турбін подавалась з такими параметрами: температура – 440 °С, тиск – 2 МПа.

Швидкість «К-27» у підводному положенні складала 30,2 вузлів. 24 травня 1968 р. на човні сталася аварія, причиною котрої стало погіршення тепловідведення від аварійного захисту, унаслідок чого відбулося руйнування частини тепловидільних елементів аварійного захисту лівого борту і винос радіоактивних продуктів ядерного палива

[9] Кампанія ядерного реактора – це проміжок часу між перезарядженням ядерного палива.

у контур сплаву. Відновлення паровиробної установки було неможливим і човен затопили у Карському морі на глибині 75 м.

Незважаючи на цю аварію, роботи зі створення АЕУ з рідкометалевим уповільнювачем для підводних човнів тривала.

У грудні 1971 року до складу ВМФ увійшов підводний човен «К-64» проєкту 705, водотоннажністю 2280 т, До одновальної енергетичної установки «ОК-550» входили реактор тепловою потужністю 155 МВт з рідкометалевим теплоносієм у першому контурі і блочна паротурбінна установка «ОК-7» потужністю 30 000 кВт. У блоці з турбозубчастим агрегатом були розташовані роз'єднувальна пружна звукоізолююча муфта, головний упорний підшипник та два автономні турбогенератори потужністю по 1500 кВт. На ходових випробуваннях «К-64» досягла у підводному положенні швидкості 41 вузол.

Під час підготовки до виходу в море на човні розпочався процес затвердіння теплоносія першого контуру, через це реактор був заглушений, а у 1974 р. «К-64» був виключений зі списку флоту.

У подальшому за аналогічним проєктом 705К була побудована серія із шести човнів. Незважаючи на всі удосконалення паровиробної установки пр. 705К, вона зберігала головний недолік такого типу установки – нестійкий стан теплоносія першого контуру, унаслідок чого більшість підводних човнів, побудованих за цим проєктом, виключили зі складу флоту в 1990 р. Усі інші підводні човни колишнього СРСР будувались виключно за проєктами з водо-водяними реакторами.

Загалом за період з 1955 по 1993 р. у світі було побудовано 464 човни, з них у США – 179, у колишньому СРСР – 243 човни.

Паралельно з військовим застосуванням відбувалося і будівництво цивільних суден з АЕУ. Так у 1959 р. вступив до дії перший у світі атомний криголам «Лєнін» з енергетичною установкою потужністю 32 350 кВт.

Далі, у 1962 р., було побудоване суховантажне судно «Savannah» (США) з АЕУ потужністю 14 700 кВт, у 1968 р. – «Otto Hahn» (ФРН) з АЕУ потужністю 7350 кВт, а у 1972 р. суднобудівники Японії спустили на воду суховантажне судно «Mutsu» з АЕУ потужністю 6600 кВт. На жаль, ні одне із цих суден, за винятком криголама «Лєнін», не витримало більш менш довгого терміну експлуатації. Усі вони, навіть не відпрацювали терміну життєвого циклу, за різними причинами були відправлені на утилізацію.

Високу ефективність показали криголами з АЕУ. Основною запорукою цього було те, що саме в умовах експлуатації криголамів найбільш рельєфно виявляються переваги АЕУ. Кораблебудівники колишнього СРСР після успішної експлуатації криголаму «Лєнін» побудували серію суден, головним з яких була «Арктика», а останнім за терміном побудови став криголам, спущений на воду у 1995 р.

Цікавий факт! Незалежно від типу, розмірів, потужності енергетичної установки для криголамів, які використовують органічні палива, характерний загальний недолік – їх автономність не перевищує 30–40 діб. Для того щоб якось розв'язати цю

проблему, запас палива на криголамах доводять до третини водотоннажності, унаслідок чого судно починає нагадувати плавуче нафтосховище. Але це мало допомагало: за годину потужний криголам використовує до 6–8 т палива. Атомна енергетична установка стала тим рішенням, яке дозволило здійснити справжній переворот у будуванні криголамів та зробити криголам «справжнім господарем Арктики», тому що він може ходити без обмеження і додаткового бункерування.

Важливою є і ще одна перевага атомохода: зважаючи на те, що кількість спалюваного за рейс палива вимірюється кілограмами, а не тисячами тонн, водотоннажність судна залишається практично незмінною, тобто по мірі витрачання запасів палива його криголамні якості не погіршуються.

Криголам «Арктика» був побудований у 1974 р., потужність, що передавалася на ГГ, становила близько 53 МВт. На сьогодні на Північному морському шляху знаходиться в експлуатації 10 атомних криголамів, спроєктованих на початку 80-х р. минулого століття.

Останній за терміном побудови атомний криголам був закладений 4 жовтня 1989 р. під назвою «Урал» (перед цим були побудовані криголами з АЕУ «Арктика», «Сибір, «Ямал»), а у 1995 р. він був спущений на воду. Після затяжного циклу добудовних, довідних робіт і державних випробувань атомохід був уведений в експлуатацію 23 березня 2007 р. Цей криголам став унікальним кораблем світового криголамного флоту. Його довжина складала 159 м, ширина – 30 м, водотоннажність – 20 000 т, швидкість – 18 вузлів. Він може подолати крижані поля товщиною 2,8 м (це висота сучасної житлової кімнати від підлоги до стелі). Криголам оснащений двома АЕУ, системою захисту «Антитеррор», він має два екологічних відсіки з найсучаснішим обладнанням для збирання та утилізації відходів, що утворюються під час роботи судна. Потужність АЕУ на гребних валах – 55,2 МВт.

У 2020 р. введені в експлуатацію дві плавучі атомні тепло-електростанції (ПАТЕС), які були спущені на воду у 2010 році.

Призначенням ПАТЕС є виробництво електричної та теплової енергії, а також, у разі потреби, опріснення морської води. До складу ПАТЕС входять плавучий енергоблок (ПЕБ), берегові майданчики із спорудами для видачі електричної і теплової енергії, а також гідротехнічні споруди для забезпечення безпечної стоянки ПЕБ в акваторії.

Характеристики ПЕБ: несамохідне судно довжиною 140 м, найбільшою довжиною 144,2 м, шириною 30 м, висотою борта 10 м, осадкою за конструктивною ватерлінією (КВЛ) 5,5 м, водотоннажністю 21 600 т.

На ПЕБ установлені два водо-водяних реактори з водою під тиском КЛТ-40С тепловою потужністю 150 МВт, які забезпечують отримання 60 МВт електричної енергії та до 50 Гкал/год теплофікаційної води. Під час роботи ПЕБ у режимі опріснення морської води його продуктивність складає 40…240 тис. м^3/добу.

Проєкт ліхтеровоза «Сєвморпуть» з АЕУ повинен був стати головним, і після його пробної експлуатації передбачалося закладання цілої серії

однотипних суден. У 1988 р. «Сєвморпуть», побудований на керченському заводі «Залив», був уведений в експлуатацію. Але ж так сталося, що за два роки до цієї події в Україні на Чорнобильській АЕС відбулася техногенна катастрофа, що призвела до радіоактивного забруднення територій багатьох країн. Реакцією світової спільноти стало насторожене відношення до атомної енергетики, особливо транспортної. Виникали проблеми із заходженнями ліхтеровоза «Сєвморпуть» до багатьох портів, незважаючи на наявність усіх необхідних свідоцтв і сертифікатів. На сьогодні «Сєвморпуть» переважно використовується в каботажному плаванні. Природно, що ніякої мови про подальше будівництво атомних ліхтеровозів не могло бути й мови.

У табл. 7.1 наведені характеристики АЕУ цивільних суден.

За період з 1974 р. у країнах світу (крім СРСР) не було побудовано жодного цивільного судна з АЕУ (за винятком Фінляндії, яка будувала криголами для колишнього СРСР). У той же час будувалися військові кораблі різного призначення з такими енергетичними установками.

Розпочинаючи із середини 70-х рр. минулого століття, на Балтійському заводі відбулось будівництво важких атомних ракетних крейсерів. Головний з них – переданий до ВМФ 30 грудня 1980 р., другий – 31 жовтня 1984 р., третій – 30 грудня 1988 р., четвертий – у 1996 р. Зараз будівництво таких крейсерів знову поновлене.

Флот ВМС США налічує, за станом на 2022 р., 11 атомних авіаносців: «George Bush» (2009 р.), «Ronald Reagan» (2003 р.), «Harry Truman» (1998 р.), «Jone Stennice» (1995 р.), «George Washington» (1992 р.), «Avraam Lincoln» (1989 р.), «Theodore Roosevelt» (1986 р.), «Carl Vinson» (1982 р.), «Dwight Eisenhower» (1977 р.), «Nimitz» (1979 р.), «Gerald Ford» (2017 р.).

До речі, «Enterprise», водотоннажністю 94 000 т, потужністю АЕУ 4×47 800 кВт – перший атомний авіаносець у світі, уведений в експлуатацію у 1958 р., тільки у 2017 році був виведений зі складу ВМС США. Ядерного палива, завантаженого у реакторі американських авіаносців типу «Nimitz», вистачало на період до 20 років, а, розпочинаючи з авіаносця «Gerald Ford» (уведений до складу ВМС у 2017 р.) передбачається, що ці кораблі будуть експлуатуватися без перезарядження активної зони 50 років (!), тобто весь термін свого життєвого циклу.

У стані добудови у США знаходяться два авіаносці з АЕУ «John Kennedy» (закінчення будівництва 2022 р.) та «Enterprize» (закінчення будівництва 2023 р.) Кожен із цих кораблів, окрім своєї назви, має спеціальне позначення, яке містить три букви CVN, які свідчать про те, що даний корабель є ядерним авіаносцем, та дві цифри, які є порядковим номером конкретного авіаносця.

Таблиця 7.1. **Основні характеристики суднових атомних енергетичних установок**

Параметр	Суховантажні судна			Криголами		Ліхтеровоз	ПАТЕС[10]
	«Savannah», США	«Otto Hahn», ФРН	«Mutsu», Японія	«Лєнін»	«Арктика»	«Сєвморпуть»	«Академік Ломоносов»
Рік побудови судна	1962	1968	1974	1959	1974	1988	2010
Теплова потужність реакторів, МВт	74	38	36	3×90	2×171	135	150
Ядерне паливо	UO_2	UO_2	UO_2	UO_2	UO_2	UO_2	UO_2
Маса завантаження палива, т	8,06	2,98	3,03	3,0×1,7	–	0,15	–
Тиск води у першому контурі, МПа	12,3	6,3	11,0	20,0	–	12,8	–
Температура води на вході / виході з активної зони, °С	257/271	267/278	271/285	248/325	–	279/311	–
Параметри пари:							
температура, °С	240	273	251	310	300	300	300
тиск, МПа	3,4	3,1	4,1	3,1	3,0	6,0	3,3
ККД АЕУ	23,5	21,6	–	14,0	–	–	–
Потужність на гребному валу, кВт	14 700	7350	6600	1×14 400 2×7200	2×27 600	1×29 400	–
Маса паровиробної установки у робочому стані, т	2500	2100	2920	3100	3150	–	60 МВт електричної потужності
Маса АЕУ в робочому стані, т	3945	2550	3700	5850	–	–	–
Питома маса паровиробної установки, кг/кВт	268	348	560	100	–	–	–

Примітка. Для всіх наведених суден тип реактора – водо-водяний реактор під тиском (ВВРТ), уповільнювач та теплоносій – H_2O.

[10] Під час роботи ПЕБ у режимі опріснення морської води продуктивність складає 40 000–240 000 м³/добу.

Так, авіаносець «George Bush», уведений до складу ВМС США у 2009 р. має позначення CVN-77. «George Bush» став останнім американським авіаносцем класу «Nimitz», за яким побудовані всі попередні авіаносці.

Загальні характеристики авіаносців типу «Nimitz» наступні:

Повна водотоннажність складає 104 112 т, довжина – 332 м, ширина – 76 м, осадка – 12,5 м. Швидкість авіаносця 30 вузлів. Енергетична установка складається з двох водо-водяних реакторів типу A4G/A1W по 550 МВт теплової потужності, виробництва компанії «Westinghouse», які забезпечують роботу чотирьох парових турбін загальною потужністю 194 МВт. Резервна суднова електростанція складається із 4 дизельних двигунів загальною потужністю по 2560 кВт.

У 2017 році був спущений на воду перший корабель нового класу «Jerald Ford» (CVN-78). Цей авіаносець та всі наступні, будуть побудовані за удосконаленою версією кораблів класу «Nimitz».

На жаль, не судилося Україні побудувати свій атомний корабель.

Тривожний факт! Авіаносці – це особливий тип кораблів, які здатні будувати тільки 5 держав у світі – США, колишній СРСР, Франція, Італія, Великобританія. Якщо США, відповідно до своєї військової доктрини, будували авіаносці ще з 50-х рр., то перший авіаносець у колишньому СРСР в Україні, на Чорноморському суднобудівному заводі був побудований лише у 1975 р., усього в Миколаєві (Україна) було побудовано 5 авіаносних кораблів та авіаносців – «Київ» (1975 р.), «Минськ» (1978 р.), «Новоросійськ» (1982 р.), «Баку» (1987 р.), «Адмирал Кузнецов» (1998 р.), шостий, «Варяг», був проданий у 2000 р. у недобудованому стані одній з китайських суднобудівних компаній. Китайська держава добудувала «Варяг» та ввела його до складу своїх ВМС.

Сьомий авіаносець «Ульянівськ», закладений у 1988 році, на відміну від попередніх кораблів, мав бути обладнаним АЕУ. Разом із цим, конструкцією авіаносця передбачався запуск палубних літаків за допомогою парової катапульти. На жаль, після розпаду СРСР з'ясувалося, що такий унікальний корабель нікому не потрібен, і на початку 1992 р. корпус «Ульянівська» (ступінь готовності авіаносця – 20 %) був порізаний на стапелі на метал.

7.2. Принцип роботи та загальна будова суднових ЯЕУ

Основним елементом суднової ядерної енергетичної установки є реактор, у якому енергія, що виділяється внаслідок ділення ядер деяких важких елементів, перетворюється на теплову.

Ядерна енергія – це різновид внутрішньої енергії, обумовленої ядерними силами, які зв'язують у ядрі всі частинки, що його утворюють. Як ядерне паливо для суднових енергетичних реакторів застосовується

збагачений уран. Уміст ізотопу урану 235 у природному урані – усього 0,7 %, інші 99,3 % складає ізотоп урану 238, який важко ділиться. Найчастіше у реакторах використовується штучно збагачений уран, який містить уран 235 у кількості 3…5 %, іноді – плутоній.

Процес поділу ядер урану відбувається під дією нейтронів, унаслідок чого ядро урану 235 розщеплюється на два однойменно заряджених і приблизно однакових осколки. Вони відштовхуються один від одного і розлітаються з високими швидкостями. Саме під час зіткнення осколків з атомами оточуючого середовища, у якому відбувається ділення ядер, їх кінетична енергія перетворюється на теплову.

На один поглинений нейтрон під час ділення кожного ядра урану утворюється 2…3 нейтрони, які зі свого боку викликають ділення інших ядер урану 235, унаслідок чого виникає ланцюгова реакція ділення. Ця реакція відбувається у тій частині реактора, у якій розташоване ядерне паливо, – в активній зоні.

Для енергетичних цілей використовуються реактори, у яких для більш ефективної взаємодії нейтронів з ядрами пального швидкість нейтронів уповільнена до швидкості їх теплового руху (близько 500…600 м/с). Такі нейтрони мають назву «*теплових*», а реактори – «*реакторів на теплових нейтронах*».

Як уповільнювачі можуть використовуватися важка (D_2O) і звичайна (H_2O) вода, берилій, графіт. Найбільш широкого застосування у суднових реакторах набула вода.

За типом активної зони ядерні реактори можуть бути *гомогенними*, у яких ядерне паливо та уповільнювач являють собою однорідну суміш, і *гетерогенними* – з розташуванням в уповільнювачі ядерного палива у вигляді стержнів або пластин. Саме гетерогенні реактори на сьогодні – єдиний тип реакторів, що використовуються у складі суднових ЯЕУ.

Ядерне паливо у реакторі зосереджене у тепловидільних елементах (ТВЕЛ), що являють собою герметичні (щоб виключити потрапляння радіоактивних осколків ділення до теплоносія) тонкостінні трубки з цирконію, сплавів алюмінію, нержавіючої сталі, заповнені таблетками оксиду урану. Тепловидільні елементи об'єднуються у паливні збірки (блоки), або касети, що розміщуються у технологічних каналах активної зони, які організують потік теплоносія. Відпрацьовані ТВЕЛ замінюються поканально.

Детальна інформація! Тепловидільні елементи – основна конструкційна деталь гетерогенних активних зон, яка значною мірою визначає ефективність, надійність і розміри ядерного реактора.

Принципова будова ТВЕЛ на прикладі стержневого елементу наведена на рис. 7.1. Він складається з паливного сердечника *1*, оболонки *2*,

газових порожнин *4*, герметизуючих пробок *5* та наконечників *6*. Між паливом та оболонкою виконано проміжок *3*.

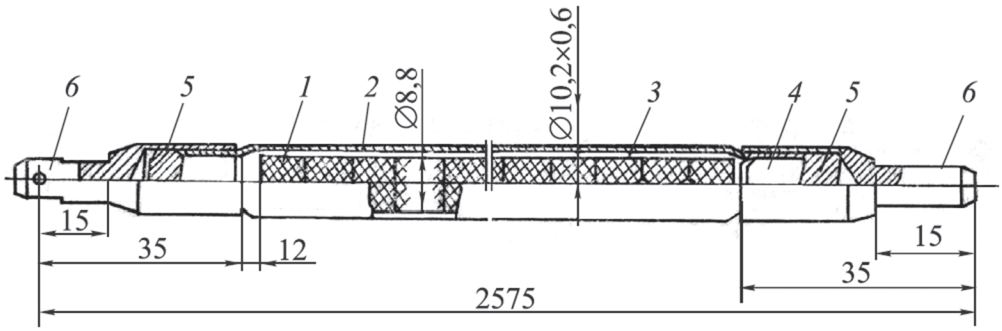


Рис. 7.1. Стержневий тепловидільний елемент водно-водяного реактора

Залежно від матеріалу паливного сердечника розрізняють наступні види ТВЕЛ:

з металевим паливом (металевий уран або його сплави);

з керамічним паливом (оксиди UO_2, PuO_2; карбіди UC, UC_2 та інші керамічні сполуки урану, плутонію, торію);

з дисперсійним паливом (сердечник виконаний із суміші ядерного палива з неподільним матеріалом, наприклад з частинок керамічного палива, диспергованих у металевій матриці, графіті або керамічній матриці – BeO, Al_2O_3).

З точки зору фізики реакторів, найкращий матеріал для паливного сердечника – металевий уран або плутоній, тому що для них число атомів в одиниці об'єму палива є найбільшим, а втрати нейтронів у неподільних матеріалах – найменші.

Унаслідок особливостей металевого урану та плутонію, пов'язаних з тим, що при нейтронному опроміненні мають місце зміна форми і зростання розмірів паливного сердечника, що може призвести до деформації та руйнування оболонки ТВЕЛ, ці матеріали як паливо не застосовуються.

Значного поширення у реакторах атомних СЕУ набуло керамічне паливо, особливо – двоокис урану UO_2. Двоокис урану має температуру плавлення 2880 °С, густину близько 10 г/см^3, він стабільний під опроміненням до температур, близьких до температур плавлення, хімічно стійкий до води, пари, органічних рідин, діоксиду вуглецю. Застосовується UO_2 у вигляді таблеток діаметром 4…15 мм.

Стержневий ТВЕЛ реакторів атомного криголама «Лєнін» (рис 7.2) має діаметр 6,1 мм і являє собою цирконієву трубку з товщиною стінки

0,75 мм, наповнену таблетками з UO_2 діаметром 4,5 мм. Між оболонкою і таблетками виконано проміжок 0,05 мм, заповнений гелієм. Наконечники *9* і *13* забезпечують герметизацію та закріплення ТВЕЛ у технологічних каналах. Паливна касета має циліндричний переріз, він утворений цирконієвою трубою зовнішнім діаметром 54 мм та товщиною стінки 1 мм. Усередині паливної касети по трьом концентрованим колам розташовані 36 ТВЕЛ із кроком 7,5 мм.

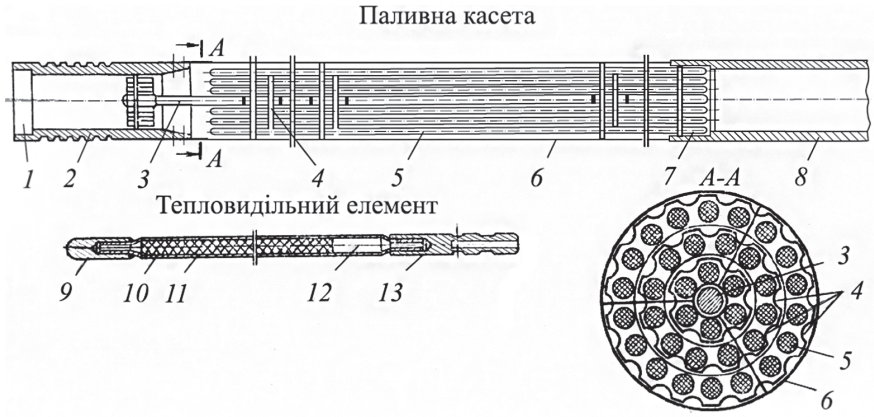


Рис. 7.2. Тепловидільний елемент та паливна касета реактора криголама «Лєнін»:

1 – розточка нижнього кінця; *2* – напрямний наконечник; *3*, *4* – відповідно дистанційні стрижень та кільце; *5* – ТВЕЛ; *6* – труба; *7*, *8* – нижня і верхня підвіски відповідно; *9*, *13* – наконечники; *10* – оболонка; *11* – таблетки палива; *12* – газова порожнина

Конструкція ТВЕЛ і паливної касети реактора АЕУ судна «Savannah» наведена на рис 7.3. Тепловидільний елемент стержневого типу має зовнішній діаметр 12,7 мм, в оболонці товщиною 0,89 мм, яка виконана з нержавіючої сталі, розміщуються 130 таблеток з UO2 діаметром 10,8 мм. Квадратний технологічний канал розміром 216×216 мм містить 164 ТВЕЛ, зібраних у 4 пакети по 41 одиниці.

Активна зона реактора огороджена відбивачем, який забезпечує зменшення втрат нейтронів, а також вирівнювання їх потоку. Як відбивачі звичайно використовуються ті ж речовини, які застосовуються і як уповільнювачі. Відведення теплоти з активної зони відбувається охолоджуючою речовиною – теплоносієм, функції якого можуть виконувати вода, органічні речовини, рідкі метали та їх сплави (калій, натрій, свинець, вісмут), а також гази (гелій, азот, діоксид вуглецю).

У реакторах СЕУ найбільшого поширення як теплоносій набула звичайна, ретельно очищена вода. Зважаючи на те, що вода використовується

також і як уповільнювач нейтронів, такі реактори мають назву «*реакторів водо-водяного типу під тиском*».

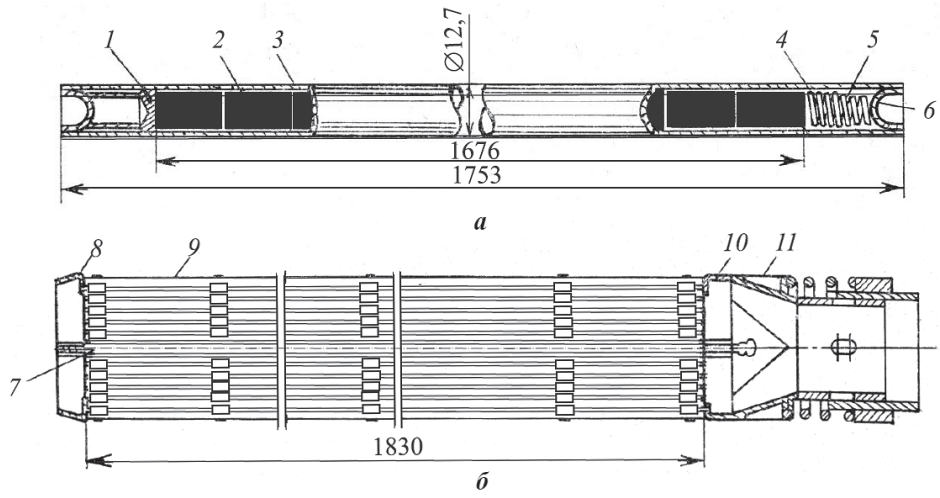


Рис. 7.3. Тепловидільний елемент (***а***) та поздовжній переріз паливної касети (***б***) реактора судна «Savannah»:
1 – плита; *2* – таблетки ядерного палива; *3* – оболонка; *4* – газова порожнина; *5* – пружина; *6* – герметизуюча пробка; *7* – центральний стрижень; *8*, *10* – нижній та верхній наконечники відповідно; *9* – оболонка паливної касети; *11* – перехідник

Регулювання потужності ядерного реактора, необхідне для забезпечення різних режимів роботи СЕУ, здійснюється за допомогою стержнів, виготовлених з матеріалів, які добре поглинають нейтрони (кадмій, бор). Уведенням і виведенням цих стержнів з активної зони регулюються інтенсивність ланцюгової реакції та виділення енергії. Якщо стержні просунути всередину активної зони, то ядерна реакція ділення уповільниться, а за подальшого переміщення і зовсім припиниться. Для аварійної зупинки ядерного реактора існують стержні аварійного захисту, які повинні миттєво припинити ланцюгову реакцію в разі виникнення аварійної ситуації.

У процесі експлуатації реактора ядерне паливо витрачається – вигорає. Під час вигорання палива до певної величини відбувається заміна ТВЕЛ. Час між такими замінами називається *кампанією реактора*.

Під час здійснення ядерних реакцій біля 80 % енергії перетворюється на теплову, а інші 20 % виділяються у вигляді випромінювання, під впливом яких в організмі людини можуть виникати важкі хворобливі явища. От чому активна зона реактора оточена захисним екраном з листів нержавіючої сталі, а навколо механізмів, трубопроводів, усередині яких рухається радіоактивна вода, що побувала у реакторі, установлено

повітро-водонепроникний *біологічний захист* у вигляді сталевих і бетонних плит товщиною 400…500 мм. Він суттєво підвищує масу АЕУ. Наприклад, маса АЕУ потужністю 10 000 кВт американського атомного підводного човна «Nautilus» складає біля 870 т, з яких на паровиробну частку з біологічним захистом припадає біля 740 т, або 85 % маси всієї енергетичної установки.

7.3. Принципові теплові схеми суднових АЕУ

Суднові АЕУ можуть виконуватися *одно-* та *двоконтурними*. Одноконтурна схема АЕУ, у якій теплоносій, що отримує тепло в активній зоні, одночасно є робочим тілом, передбачає, що вода, яка охолоджує ТВЕЛ реактора, перетворюється на пару. Остання безпосередньо розширюється у турбіні, після чого спрямовується до конденсатора й перетворюється на воду, яка насосом знову подається до реактора. Перевагою такої схеми є простота та можливість використання у турбіні пари високих параметрів, що підвищує економічність установки. Разом із цим, усе устаткування одноконтурних АЕУ в процесі роботи стає радіоактивним. Тому суттєво ускладнюються умови його обслуговування, особливо в разі можливої в експлуатації втраті герметичності оболонок ТВЕЛ.

Найбільш широкого застосування на суднах отримали АЕУ з двоконтурною схемою, тому що вони забезпечують доступ до обладнання другого контуру й придатні майже для всіх відомих типів реакторів, окрім реакторів з рідкометалевими теплоносіями і реакторів на рідкому ядерному паливі, для яких вимушено використовується триконтурна схема.

На рис. 7.4 наведена принципова теплова схема типової суднової АЕУ з водо-водяним реактором під тиском. Вода – теплоносій, яка носить назву води першого контуру, прокачується електричним насосом через реактор, після чого подається у трубки парогенератора, у яких віддає тепло воді другого контуру. Вода другого контуру нагрівається, закипає, перетворюється на пару, що надходить у парову турбіну, у якій і здійснює корисну роботу. Потім пара конденсується, як і у звичайній ПТУ, а конденсат повертається до парогенератора.

Для того щоб вода першого контуру була здатна нагріти воду другого контуру і передати достатньо теплоти для отримання пари, вона повинна мати достатньо високу температуру, яка перевищує температуру пари. У той же час для запобігання закипання води у реакторі ця температура має бути нижчою за температуру пароутворення за тиску першого контуру. Зважаючи на ці взаємовиключні умови, тиск у першому контурі підтримується на рівні 10…20 МПа [1].

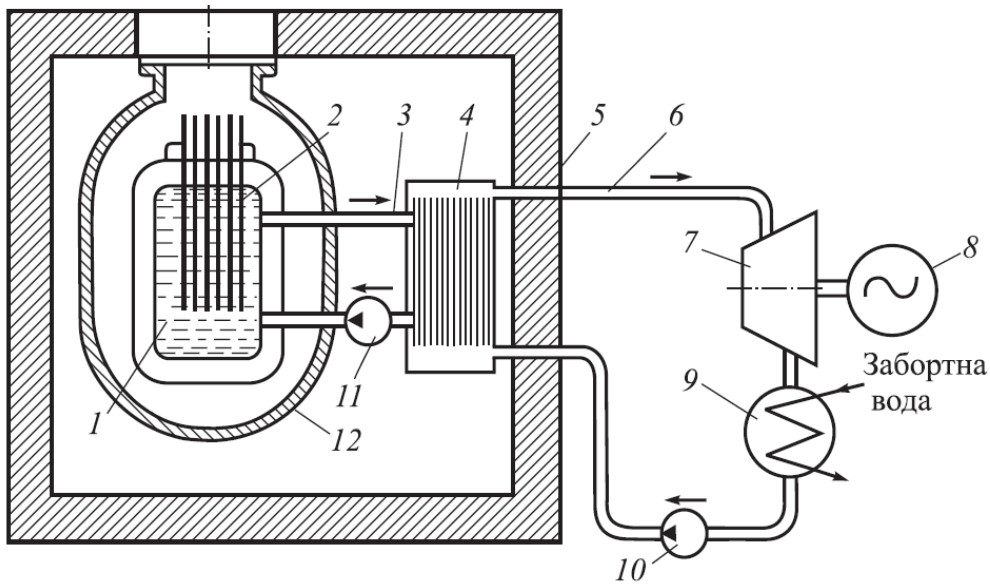


Рис. 7.4. Принципова схема двоконтурної атомної енергетичної установки:
1 – активна зона реактора; *2* – ТВЕЛ; *3* – трубопровід першого контуру;
4 – парогенератор; *5*, *12* – екрани біологічного захисту; *6* – паропровід другого контуру;
7 – ПТ; *8* – головний електрогенератор; *9* – конденсатор; *10* – живильний насос;
11 – циркуляційний насос першого контуру

З метою компенсації зміни об'єму теплоносія під час його нагрівання та охолодження і підтримання високого тиску в першому контурі, до нього приєднуються компенсатори об'єму – посудини, заповнені наполовину теплоносієм (водою), а наполовину – інертним газом під тиском.

Атомна паровиробна установка судна «Otto Hahn» з реактором типу ВВРТ наведена на рис. 7.5. Вона являє собою моноблочну конструкцію, у якій активна зона розташована у нижній центральній частині агрегата, а прямоструминний парогенератор розташовується над активною зоною. Таке компонування парогенератора забезпечує сталу роботу реактора за природною циркуляцією теплоносія на режимах до 30 % від номінального.

Циркуляція теплоносія у першому контурі забезпечується трьома осьовими насосами. Після виходу з міжтрубного простору парогенератора теплоносій омиває тепловий захист і надходить у приймальні порожнини насосів.

Елементи корпусу, що контактують з водою першого корпусу, захищені оболонкою з нержавіючої сталі. На кришці корпусу розташовані приводи регулювальних стрижнів.

Велике значення під час експлуатації АЕУ має забезпечення їх безпечності для обслуговуючого персоналу та навколишнього середовища.

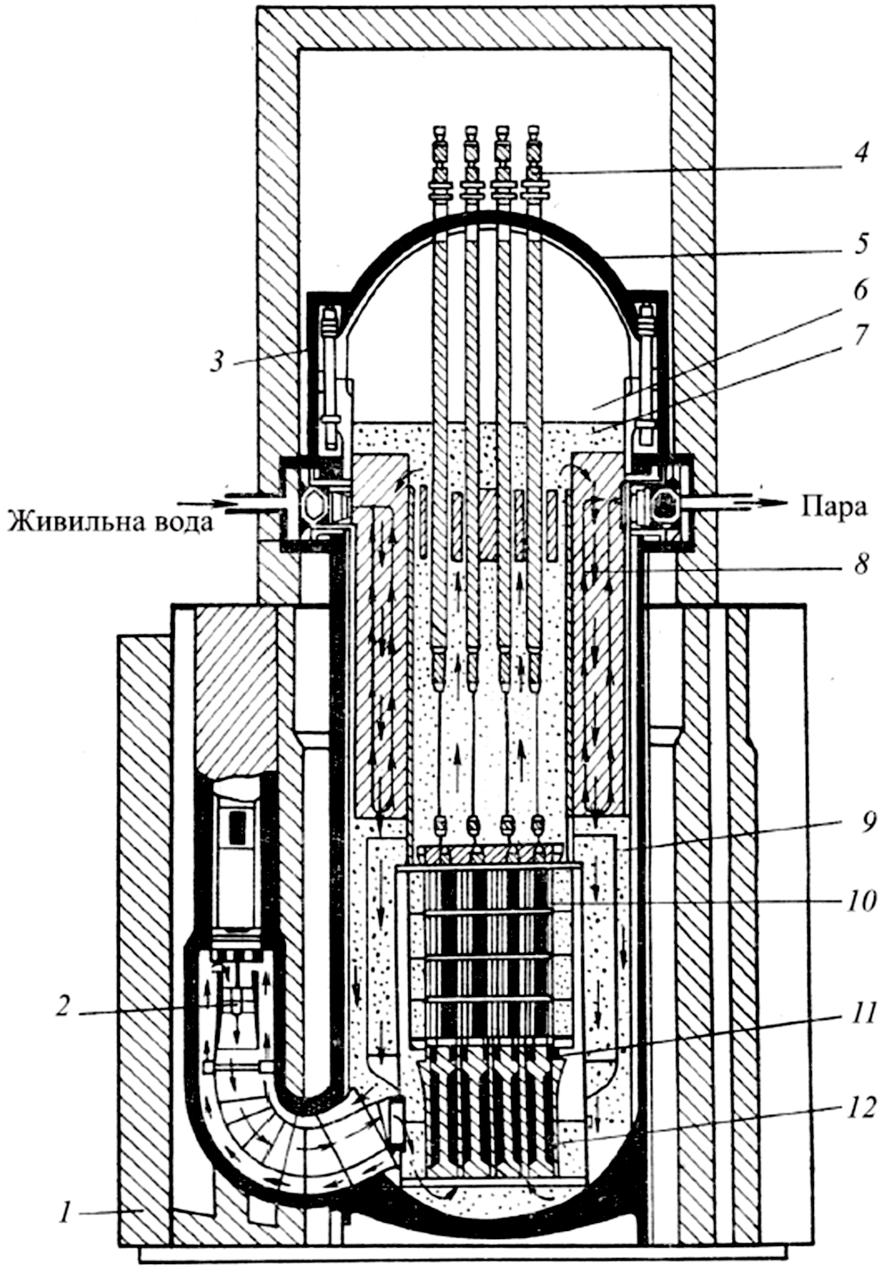


Рис. 7.5. Паровиробна установка судна «Otto Hahn»:
1 – біологічний захист реактора; *2* – осьовий насос; *3* – корпус паровиробної установки; *4* – регулювальні стержні; *5* – кришка корпусу реактора; *6* – парова подушка; *7* – захисна оболонка; *8* – прямоструминний парогенератор; *9* – тепловий захист; *10* – активна зона реактора; *11* – опорна решітка; *12* – хвостовики регулювальних стрижнів

Система ядерної безпеки розглянутих водо-водяних реакторів передбачає наявність трьох фізичних бар'єрів на шляху іонізуючих випромінювань радіації, що виникають під час їх роботи. Перший бар'єр – це абсолютно герметична оболонка ТВЕЛ, у яких розміщується ядерне паливо у вигляді уранових таблеток. Другий бар'єр – це межі першого контуру в реакторі, які також повинні бути герметичними на випадок проникнення випромінювання з паливних елементів. І, нарешті, третій бар'єр – це герметична оболонка, у межах якої розташоване основне обладнання реакторного відділення. Експлуатаційна надійність суднової АЕУ забезпечується безумовним дотриманням необхідних заходів для забезпечення стійкості всіх трьох фізичних бар'єрів на шляху поширення радіації.

Теплова схема та склад АЕУ визначаються типом реактора і робочого тіла, параметрами пари, що виробляється у реакторі, режимами роботи установки, що залежать від типу судна.

Принципова теплова схема АЕУ криголама «Лєнін» наведена на рис. 7.6. На судні застосована тривальна енергетична установка сумарною потужністю на фланцях гребних електродвигунів 28 800 кВт, яка розподіляється між гвинтами у відношенні 1:2:1 (7200:14 400:7200 кВт).

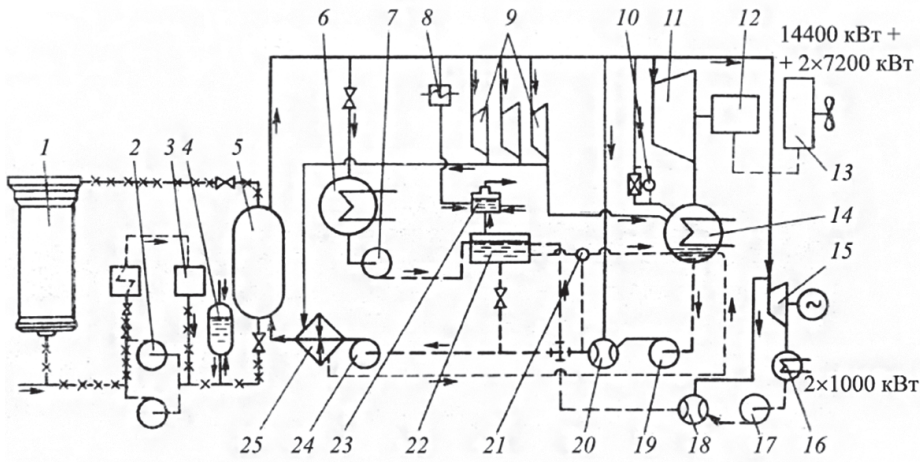


Рис. 7.6. Принципова теплова схема атомної енергетичної установки криголама «Лєнін»:

1 – реактор; *2* – головні циркуляційні насоси; *3* – іонообмінний фільтр; *4* – компенсатор об'єму; *5* – парогенератор; *6*, *14* – допоміжний і головний конденсатори; *7*, *19* – допоміжний та головний конденсатні насоси; *8* – пароохолодник; *9* – турбіни допоміжних механізмів; *10* – дросельно-зволожувальний пристрій; *11*, *12* і *15* – головний і допоміжний турбогенератори; *13* – гребний електродвигун; *16* – конденсатор турбогенератора; *17*, *18* – ежектор; *20* – головний ежектор; *21* – регулятор рівня в конденсаторі; *22* – вирівнювальна цистерна; *23* – парогенератор низького тиску для загальносуднових споживачів; *24* – живильний насос; *25* – підігрівник живильної води

На криголамі розташована двоконтурна атомна паровиробна установка з водо-водяними реакторами. У реакторному відсіку спочатку було передбачено три реактори ВВРТ, які після модернізації 1970 р. були замінені на два. Чотири головні турбіни криголама – однокорпусні, потужністю по 8100 кВт, кожна з них через одноступеневий редуктор приводить у дію два генератори постійного струму потужністю по 3840 кВт. Парогенератори, крім головних турбін, забезпечують парою два автономних турбогенератори загальносуднової електростанції потужністю по 1000 кВт кожен, а також турбінні приводи окремих допоміжних механізмів. За відсутності пари потреби в електроенергії забезпечуються резервним дизель-генератором (ДГ) потужністю 1000 кВт.

Конденсат з головних та допоміжних конденсаторів проходить через охолодники ежекторів до вирівнювальної цистерни, з неї подається до одноступеневого підігрівника живильної води, а потім – до парогенераторів. На рис. 7.7 наведена принципова теплова схема паротурбінної частини АЕУ криголама «Арктика». Зважаючи на те, що парові турбіни АЕУ працюють на насиченій парі, теплова схема має певні особливості порівняно зі звичайними судновими котлотурбінними установками. Це спеціальна система випуску надлишків свіжої пари на головний конденсатор; наявність спеціального стоянкового конденсатора для забезпечення режимів розведення і розхолоджування паровиробної установки; наявність спеціальної системи контролю за солевмістом конденсату; підвищена продуктивність випарників котлової води; підвищена потужність суднової електростанції [1].

На рис. 7.8 наведена принципова схема енергетичної установки «SSW» атомних човнів США.

Низкою Класифікаційних товариств (Англійський Ллойд, Норвезьке бюро Верітас тощо) розроблені правила побудови суден з АЕУ. Відповідно до цих правил передбачається розміщення паровиробної установки у спеціальному герметичному відсіку або легкому контейнері, розрахованому на невелике розрідження, що дозволяє попередити розповсюдження радіоактивних газів і аерозолів за межі відсіку в процесі експлуатації. Відсік забезпечується спеціальною системою вентиляції, яка підтримує в ньому розрідження. Причому, чим небезпечніше приміщення щодо виділюваних газів або аерозолів, тим вище розрідження, що в ньому утворюється. (рис. 7.9).

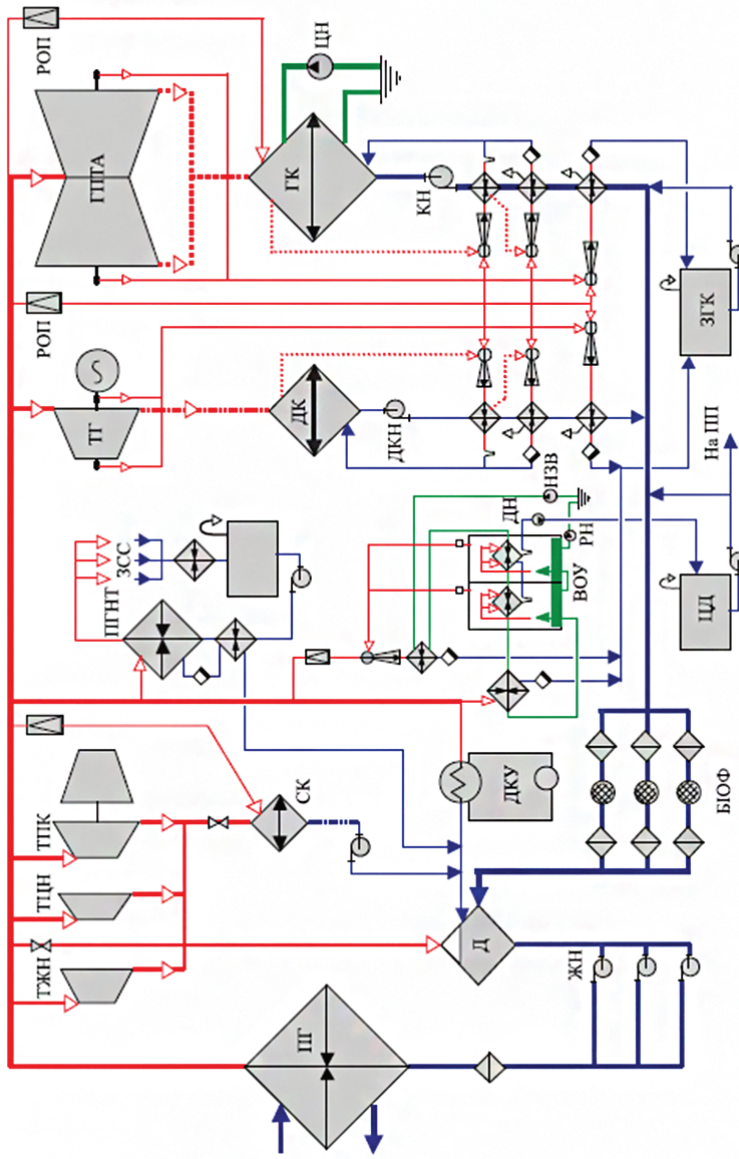


Рис. 7.7. Теплова схема паротурбінної установки криголама «Арктика»:
ПГ – парогенератор; ТЖН, ТЦН, ТПК – турбоприводи, відповідно живильного, циркуляційного насосів та компресора повітряного омивання корпусу; ПГНТ – парогенератор низького тиску; ЗСС – загальносуднові споживачі; ТГ – турбогенератор; РОП – редукційний охолоджуючий пристрій; ГПТА – головний паротурбоелектричний агрегат; ГК – головний конденсатор; ЦН – циркуляційний насос; КН – конденсатний насос; ЗГК – збірник гарячих конденсатів; ДК – допоміжний конденсатор; ТГ – турбогенератор; ДКН – допоміжний конденсатний насос; ЦД – цистерна дистиляту; ПП – побутові потреби; ВОУ – водоопріснювальна установка; РН – розсільний насос; ДН – дистилятний насос; НЗВ – насос забортної води; БІОФ – блок іонообмінних фільтрів; ДКУ – допоміжна котельна установка; Д – деаератор; ЖН – живильний насос; СК – стояночний конденсатор

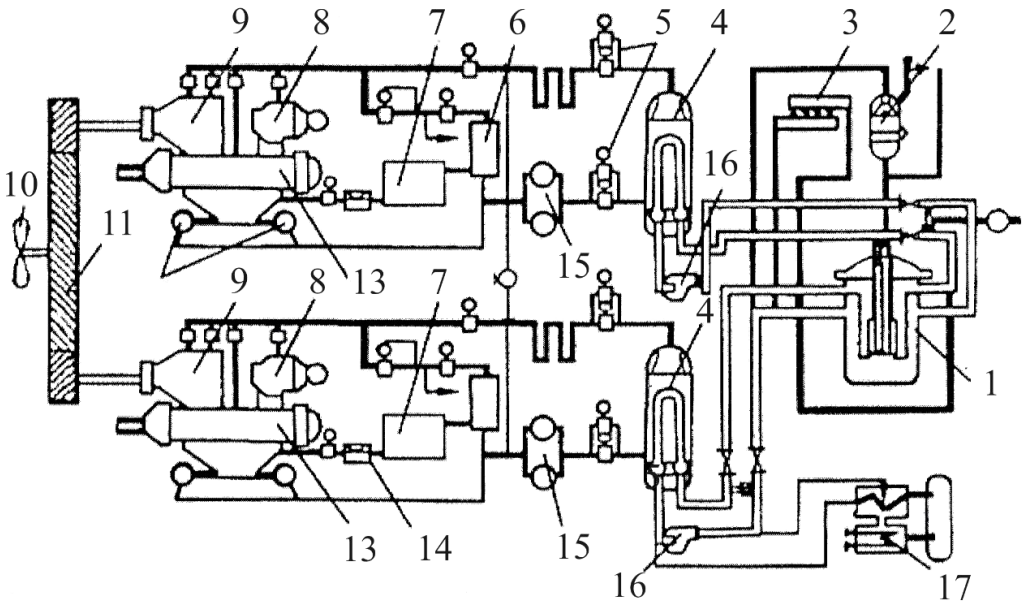


Рис. 7.8. Принципова схема атомної енергетичної установки типу «SSW» підводних човнів США:

1 – ядерний реактор; *2* – компенсатор об'єму; *3* – система розхолоджування; *4* – парогенератор; *5* – арматура; *6* – цистерна; *7* – теплий ящик; *8* – турбогенератор; *9* – парова турбіна; *10* – гребний гвинт; *11* – редуктор; *12* – конденсатні насоси; *13* – конденсатор; *14* – система регулювання рівня води в конденсаторі; *15* – живильні насоси; *16* – головний циркуляційний насос першого контуру; *17* – система водопідготовки

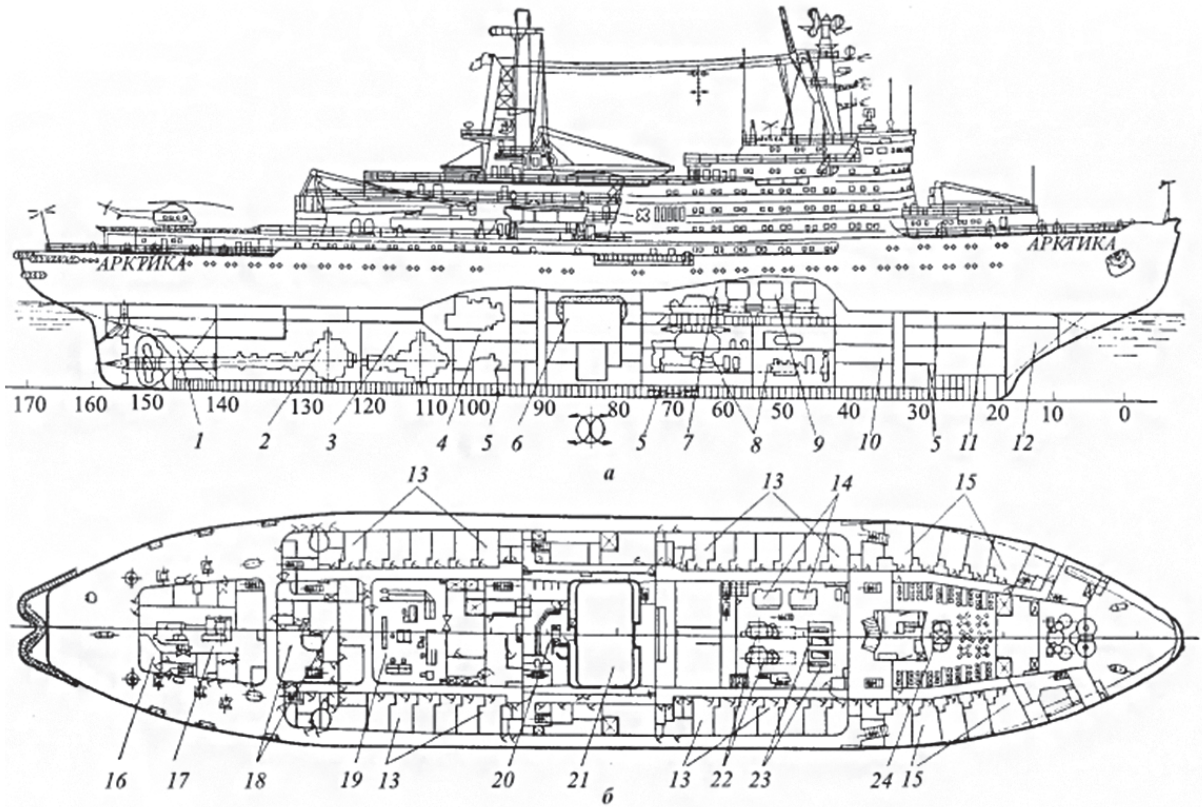


Рис. 7.9. Схема розташування атомної енергетичної установки криголама «Арктика»:
а **–** вигляд збоку; ***б*** **–** верхня палуба; *1*, *12* – диферентна цистерна; *2*, *3* – бортові та середній гребні електродвигуни; *4* – кормова електростанція; *5* – льодовий ящик; *6*, *21* – реакторне й апаратне приміщення атомної паровиробної установки; *7* – головна турбіна; *8*, *17* – приміщення відповідно допоміжних механізмів і буксирної лебідки; *9* – головні генератори; *10* – провізійні комори; *11* – вантажні приміщення; *13*, *15* – одно- й двомісні каюти; *14* – ВОУ; *16*, *19* – кормовий та центральний пости керування АЕУ; *18* – медичний блок; *20* – санпропускник центрального відсіку; *22* – ПГНТ; *23* – допоміжні котли; *24* – їдальня команди

Корпус криголама «Арктика» розділений водонепроникними перебірками на вісім відсіків. Найважливіші приміщення виділені у самостійні водонепроникні й газощільні відсіки, що не тільки забезпечує непотоплюваність криголама в разі затоплювання будь-яких двох відсіків, але і дозволяє повністю задовольнити вимоги радіаційної безпеки.

Паровиробна установка розташована у середній частині судна у спеціальному газощільному відсіку, який має легкий вторинний біологічний захист. Цей відсік по висоті розділений блоками біологічного захисту і герметичним настилом на два приміщення – реакторне (нижнє) й апаратне (верхнє). У реакторному приміщенні у кесонах бака залізо-водного захисту розміщуються два реакторні блоки. Бак захисту відділений від перебірок газощільною перебіркою кофердамом. Від паровиробної установки у ніс розташоване головне машинне відділення, у якому розміщено два головні турбогенератори потужністю по 27 600 кВт. Кожна турбіна обертає три послідовно з'єднаних генератори змінного струму і два допоміжних потужністю по 2000 кВт, а також допоміжні механізми. У корму від паровиробної установки розміщується кормова електростанція, яка складається з трьох допоміжних турбогенераторів і одного допоміжного ДГ потужністю по 1000 кВт кожний.

Частина обладнання АЕУ розміщена у середній частині надбудови: допоміжні котли, випарники, парогенератори низького тиску, деаератор, два аварійних ДГ потужністю по 200 кВт.

Наглядне уявлення про розташування АЕУ судна «Otto Hahn» дає рис. 7.10. Установка розміщена у трьох відсіках: турбінному, реакторному та допоміжному зі сховищем для відпрацьованих ТВЕЛ. Паротурбінна установка атомохода складається з ГТЗА потужністю 7350 кВт, двох турбогенераторів потужністю по 450 кВт, резервного ДГ потужністю 450 кВт і автоматизованого ДГ потужністю 240 кВт. Паровиробна установка розміщена у захисному контейнері, виконаному у вигляді вертикального циліндра з напівсферичними верхньою частиною і днищем.

У контейнері розташовані системи очищення і підживлення теплоносія, видалення газоподібних відходів, охолодження обладнання активної зони тощо. Частина біологічного захисту складається з попереміннних шарів чавуну і води. Зовнішній захист реактора змонтований на певній відстані від нього і складається з бетонних плит товщиною 500 мм, закріплених на перебірках реакторного відсіку.

За товщини стінок 30 мм контейнер розрахований на тиск 14 МПа. У ньому передбачено аварійний клапан, призначений для заповнення контейнера морською водою у випадку занурення судна внаслідок аварії.

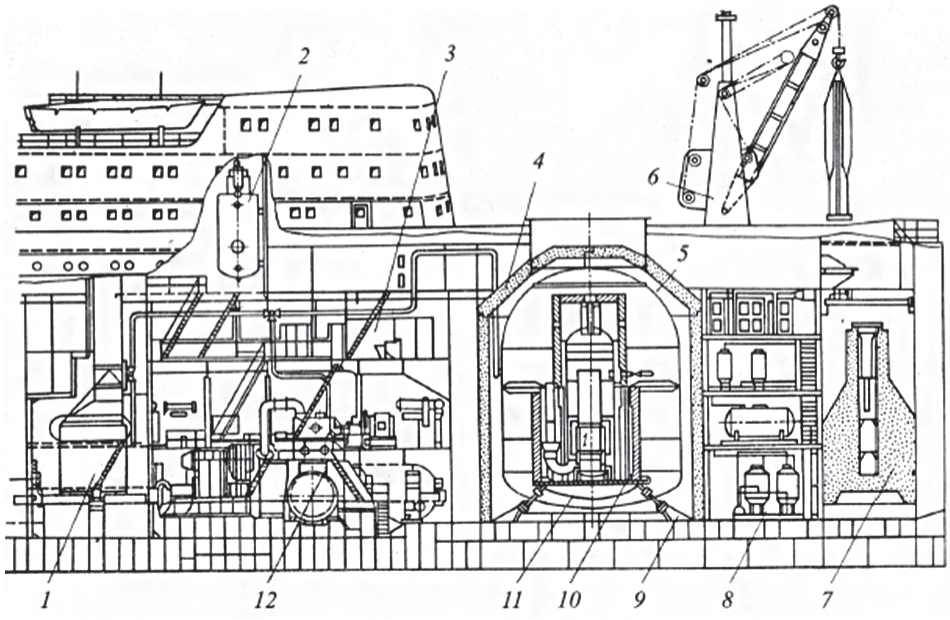


Рис. 7.10. Розміщення атомної енергетичної установки судна «Otto Hahn»:
1 – допоміжний парогенератор; *2* – деаератор; *3* – пост керування АЕУ;
4, *10* – вторинний та первинний біологічні захисти відповідно; *5* – контейнер;
6 – кран для демонтажу обладнання і перезарядки ТВЕЛ; *7* – сховище відпрацьованих ТВЕЛ; *8* – відсік допоміжних механізмів; *9* – опори контейнера; *11* – реактор; *12* – ГТЗА

В окремому приміщенні судна встановлено допоміжний парогенератор продуктивністю 10 т/год, який забезпечує роботу резервної установки потужністю 1400 кВт. До складу судна «Otto Hahn» входять також автономний комплекс для перезарядки активної зони реактора і залізобетонний басейн для тимчасового зберігання відпрацьованих ТВЕЛ.

Зважаючи на підвищені вимоги до забезпечення безпеки АЕУ, Правила Класифікаційних товариств приділяють значну увагу питанням розміщення реакторної установки на судні та її захисту від пошкоджень у разі зіткнення або посадці судна на мілину. Правилами всіх товариств передбачається створення протиударного захисту, а також підсиленого набору в районі реакторного відсіку.

На рис. 7.11 наведено розміщення контейнера з реактором у корпусі контейнеровоза, виконане відповідно до Правил Англійського Ллойда. Протиударний захист являє собою набір горизонтальних платформ, які, деформуючись, гасять енергію зіткнення. Відсік з контейнером відділяється від вантажних приміщень кофердамом. У приміщеннях, розташованих біля відсіку, розміщується допоміжне устаткування і зона строгого режиму для роботи з радіоактивними речовинами.

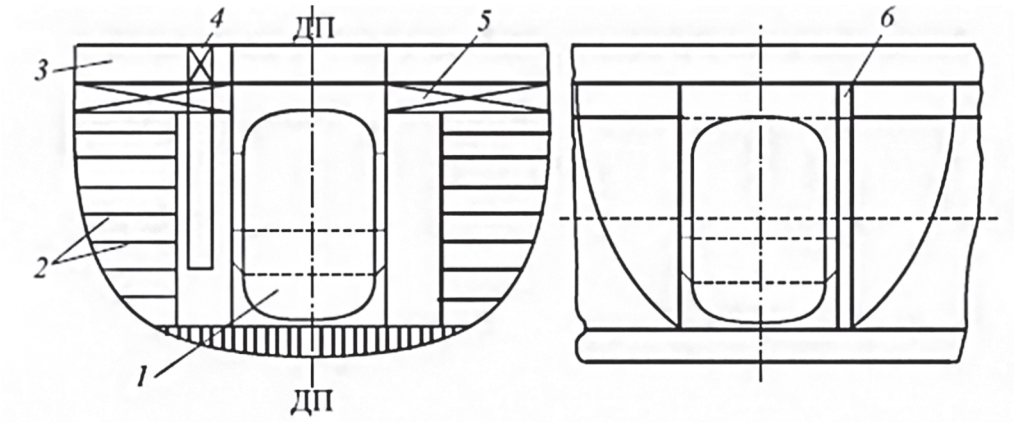


Рис. 7.11. Розташування контейнера з реактором у корпусі судна:
1 – контейнер з устаткуванням першого контуру; *2* – платформи протиударного захисту; *3*, *5* – зони розміщення відповідно допоміжного устаткування для роботи з радіоактивними речовинами й устаткування системи вентиляції; *4* – ліфт; *6* – кофердам

Поряд з розглянутими позитивними якостями паровиробних установок з ядерними реакторами, для них характерні істотні недоліки, які суттєво обмежують застосування на транспортних суднах До основних із них відносяться наступні:

– біологічний захист екіпажу і навколишнього середовища від радіоактивного випромінювання може перевищувати 50 % маси всієї енергетичної установки, що або знижує вантажомісткість судна, або потребує суттєвого підвищення його водотоннажності;

– висока вартість ядерного палива та вартість виготовлення деталей активної зони реактора суттєво підвищують вартість будівництва судна;

– вартість утилізації та захоронення відпрацьованого ядерного палива та опроміненого суднового обладнання співставна з вартістю нового судна.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. *Коли і де вперше здійснена керована ядерна ланцюгова реакція?*
2. *Чому саме для підводних човнів використання атомних енергетичних установок стало пріоритетним?*
3. *Коли і де був побудований першій у світі атомний підводний човен?*
4. *Яке паливо було застосовано у реакторі першого атомного підводного човна?*
5. *Надайте характеристику теплоносія першого контуру першого атомного підводного човна.*
6. *Охарактеризуйте склад та характеристики елементів допоміжної енергетичної установки першого у світі атомного підводного човна.*
7. *У чому складаються особливості енергетичної установки підводного човна «Seawolf»?*
8. *Чому у США призупинили роботу з атомними енергетичними установками, які використовували рідкометалеві теплоносії першого контуру?*
9. *Надайте характеристику енергетичної установки побудованого вперше у колишньому СРСР підводного човна «К-3».*
10. *Які параметри теплоносія АЕУ підводного човна «К-3»?*
11. *Наведіть тип і параметри теплоносія першого контуру атомного підводного човна «К-27».*
12. *Причини припинення експлуатації атомного підводного човна «К-27».*
13. *Надайте обґрунтування виключення більшості атомних підводних човнів, побудованих за проєктом 705К, зі складу флоту.*
14. *Розгляньте побудовані у 60–70-х рр. XX ст. торговельні судна з АЕУ.*
15. *У чому полягає перевага застосування на криголамах АЕУ?*
16. *Проаналізуйте особливості енергетичних установок авіаносців США.*
17. *Наведіть визначення ядерної енергії.*
18. *Охарактеризуйте ядерне паливо, що застосовується у суднових ЕУ.*
19. *Як поділяються ядерні реактори за типом активної зони?*
20. *Розгляньте уповільнювачі, які використовуються у суднових реакторах.*
21. *Охарактеризуйте спосіб розташування ядерного палива у реакторі.*
22. *Назвіть основну конструкційну деталь гетерогенних активних зон ядерних реакторів, яка значною мірою визначає ефективність, надійність і розміри ядерних реакторів.*
23. *Чому з точки зору фізики реакторів металевий уран або плутоній є найкращим матеріалом для пального сердечника тепловидільного елемента?*
24. *Які особливості металевого урану та плутонію завадили їх застосуванню як ядерного палива?*
25. *Яке паливо набуло найбільшого поширення у реакторах атомних СЕУ?*
26. *Розгляньте особливості конструкції ТВЕЛ та паливної касети реактора АЕУ судна «Savannah».*

27. *Назвіть речовини, які можуть виконувати у ядерному реакторі функції теплоносіїв.*
28. *Поясніть назву «водо-водяний реактор під тиском».*
29. *Як здійснюється регулювання потужності ядерного реактора?*
30. *Яким чином відбувається аварійна зупинка ядерного реактора?*
31. *Охарактеризуйте функції та загальну будову біологічного захисту ядерного реактора.*
32. *Надайте характеристику одноконтурної схеми АЕУ.*
33. *Розгляньте принципову схему двоконтурної АЕУ і наведіть її зображення.*
34. *Наведіть обґрунтування необхідності підтримання тиску води в першому контурі водо-водяного реактора на рівні 10-20 МПа.*
35. *Яке проєктне рішення, застосоване в конструкції паровиробної установки судна «Otto Hahn» з реактором типу ВВРТ дозволило забезпечити сталу роботу реактора за природної циркуляції теплоносія?*
36. *Охарактеризуйте систему безпеки ВВРТ.*
37. *Як забезпечується експлуатаційна надійність суднової АЕУ?*
38. *Якими факторами визначаються теплова схема та склад АЕУ?*
39. *Проаналізуйте особливості теплової схеми АЕУ криголама «Арктика» порівняно зі звичайними котлотурбінними установками.*
40. *Охарактеризуйте склад енергетичної установки типу «SSW» атомних човнів США.*
41. *Які класифікаційні товариства світу взяли участь у розробці правил побудови суден з АЕУ?*
42. *За яких умов розміщення паровиробної установки АЕУ забезпечується попередженням розповсюдження радіоактивних газів та аерозолів у процесі експлуатації?*
43. *З яких елементів складається паротурбінна установка атомохода «Otto Hahn»?*
44. *Охарактеризуйте розміщення паровиробної установки атомохода «Otto Hahn».*
45. *Як здійснюється захист навколишнього середовища під час роботи реактора атомохода «Otto Hahn»?*
46. *Яким чином забезпечується робота резервної паротурбінної установки?*
47. *Розгляньте принцип дії протиударного захисту контейнера з реакторною установкою.*
48. *Які властивості паровиробних установок з ядерним реактором обмежують їх застосування на морських суднах?*

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Горбов В. М. Енциклопедія суднової енергетики : підруч. Миколаїв : НУК, 2010. 624 с.
2. Кузнецов В. В., Кузнецова С. А., Мовчан С. М., Соломонюк Д. М. Утилізаційні котли газотурбінних установок : навч. посіб. Миколаїв : НУК, 2011. 248 с.
3. Єпіфанов О. А. Конструкції суднових котлів : навч. посіб. Миколаїв : НУК, 2016. 198 с.
4. Greens Power Ltd Maarine Boilers / HRSGs for FPSO Applications. URL: https://www.greenpower.co.uk.
5. SAACKE GmbH. URL: https://www.saacke.com/products/marine-boilers.
6. Kangrim Heavy Industries Co.Ltd. URL: https://www.mhi–global.com.
7. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. URL: https://www.mhi–global.com.
8. Романовський Г. Ф., Іпатенко А. І., Патлайчук В. М. Теорія та розрахунок парових газових турбін : навч. посіб. Миколаїв : УДМТУ, 2002. 292 с.
9. Baker A. D. The Naval Institute Guide to Combat Fuels of the World 1998–1999 / A. D. Bakers. Annapolis, Maryland; Naval institute Press, 2000. 75 p.p.
10. [www.ship-efficiency.org/onTEAM/pdf/06-STGSHIPEfficiency2013 10 0913 Paper.pdf. Презентація Enercom].
11. [www.siliconrepublic.com/green-tech/item/17300–eco-friendly-e-ship-1-docks/stabe-of-the-art cargo ship to dock with haul of wind turbines].
12. Chen Luyu Analysis on sail selection and energy conservation of a Panamax bulk carier / Luyu Chen? Shunhuai Chen, Yigong Wang/ The International Conference on Advances in Enrergy Engineering, 2010. Beiging, 2010. P. 182–185.
13. URL: https://www.popmech.ru/article 8606-to-li-machta-to-li parus/.
14. Beluga Scipping to Tru «Wind Hybrid» Kite Propulsion Assist for Cargo Vessel / Green Car Congress.2008-01-22.
15. US Navy charters world's first kite powered cargo hip / Navy military. 2008-10-06.
16. Deviani M. G. Let's Go Fly a Kite – Sky Sails and Climate Change / M. G. Deviani. Technology and operations management course. Harvard Business School, November 2016.

17. Cherubini A. Airborne Wind Energy Systems. A Review of the Technologies / A. Cherubini, A. Papini, R. Vertechy, M. Fontana. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015.

18. Solar Sailor – Hybrid Solar, Wind and Combustion Enginer Powered Ship [Electronic resource]. Access mode. URL: https://www.engineersaustralia.org.au.

19. Back to future? Solar and wind sails for cargo ships. URL: https://www.sail-world.com.

20. Keith Ray. The Gas turbine goes to sea / Ray Keith. *MER*. 2008, October. P. 32–33.

21. Keith Ray. Nuclear poucer for merchant ships – past failure but future success / Ray Keith. *MER*. 2009, July / August. P. 38–44.

22. Кар'янський С. А., Оженко Є. М., Лаврученко Ю. В. Двигуни WinGD типу RT-flex/X з електронним управлінням. Одеса : НУ «ОМА», 2019. 62 с.

23. Gill Anton. Titanic: the real story of The construction of the worlds most famous ship. Channel 4 Books, 2010.

24. Горбов В. М., Ратушняк І. О., Трушляков Є. І., Чередніченко О. К. Суднова енергетика та Світовий океан : підруч. Миколаїв : НУК, 2007. 596 с.

25. Шостак В. П., Гершанік В. І., Кот В. П., Бондаренко М. С. Проектування пропульсивної установки суден з прямою передачею потужності на гвинт : навч. посіб. / за ред. В. П. Шостака. Миколаїв : УДМТУ, 2003. 580 с.

26. Controlling emissions in two-stroke marine diesel. *MER*. 2008, November. P. 16–21.

27. Артемов Г. А., Горбов В. М. Суднові енергетичні установки : навч. посіб. Миколаїв : УДМТУ, 2002. 356 с.

28. Горбов В. М. Енергетичні палива : навч. посіб. Миколаїв : УДМТУ, 2003. 328 с.

29. Митрофанов О. С., Проскурін А. Ю. Основи експлуатації, обслуговування та ремонту двигунів внутрішнього згоряння : навч. посіб. Миколаїв : видавець Торубара В. В., 2018. 151 с.

30. Горбов В. М., Шаповалов Ю. О., Ратушняк І. О. Головні двигуни сучасних транспортних суден : навч. посіб. Миколаїв : УДМТУ, 1998. 72 с.

31. Наливайко В. С., Тимошевський Б. Г., Ткаченко С. Г. Суднові двигуни внутрішнього згоряння : підруч. Миколаїв : видавець Торубара В. В., 2015. 332 с.

32. Bilousov Jevgen. Modern Marine internal combustion Engines / A Technical and Historian Overview / Jevgen Bilousov? Mykola Bulgakov, Volodymir Savchuk. Switzerland: Springer Nature Switzerland, 2022. 385 p.

33. Мошенцев Ю. Л., Гогоренко О. А., Мінчев Д. С. Системи охолодження та теплообмінні апарати двигунів внутрішнього згоряння. Миколаїв : видавець Торубара В. В., 2020. 234 с.

34. Романовський Г. Ф., Сербін С. І., Патлайчук В. М. Сучасні газотурбінні агрегати : у 2 т. Т. 1: Агрегати виробництва України та Росії : навч. посіб. Миколаїв : НУК, 2005. Т. 1. 344 с.

35. Significant ships of 2007. *RINA*. 2008. 120 p.

36. Significant ships of 2008. *RINA*. 2009. 120 p.

37. Gorbov V., Mitienkova V. S., Serbin S. I. Marine Engineering Encyclopedia. Mykolaiv : publisher Torubara V., 2017. 200 p.

38. Gorbov V., Mitienkova V. S., Serbin S. I. Alternative Fuels in Ship Power Plants : Monograph. Mykolaiv : publisher Torubara V., 2017. 120 p.

39. Yang Z., Wen H., Yang X., Gorbov V., Mitienkova V., Serbin S. Marine Power Plant – Springer, Nature Singapore Pte Ltd. Jointly Published with Shanhai Scie, China, 2021. 335 p.

40. Yang X., Yang Z., Wen H., Gorbov V., Mitienkova V., Serbin S. Alternative Fuels in Ship Power Plants – Springer Nature Singapore Pte Ltd. Jointly Published, China, 2021. 168 p.

41. Горбов В. М., Мітєнкова В. С., Білоусов Є. В., Савчук В. П., Оцінка енергоефективності морського судна : методичні рекомендації. Херсон : ХДМА, 2019. 68 с.

42. Горбов В. М. Використання суднових гібридних енергетичних установок для зниження атмосферної емісії / В. М, Горбов, В. С. Мітєнкова. *Інновації в суднобудуванні та океанотехниці* : матеріали XII МНТК. Миколаїв : Видавництво НУК, 2021. С. 229–231.

43. Романовський Г. Ф., Ващиленко М. В., Сербін С. І. Теоретичні основи проектування суднових газотурбінних агрегатів : навч. посіб. Миколаїв : УДМТУ, 2003. 304 с.

44. Alfa Laval Aalborg Industries. URL: https://www.aalborg–indusries.com/marine.boilers.

45. Спіцин В. Є., Харченко В. І. Будова газотурбінного двигуна типу UGT 2500E : навч. посіб. : у 2 ч. Ч. 1. Конструкція двигуна. Миколаїв : НУК, 2007. 52 с.

46. Gas Turbine World 2005–2006. *Handbook*. 2006, Vol. 22. 203 p.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Хронологія суднової енергетики

II ст. до н. е., Герон Олександрійський – видатний давньогрецький учений. Створив еоліпил – прообраз реактивної парової турбіни.

1615 р., Соломон де Ко, Франція. Опублікував книгу «Причини рушійних сил з різними корисними і цікавими історіями», у якій обґрунтовується можливість підйому води за рахунок тиску пари, що утворюється в герметичній посудині.

1629 р., Джованні Бранка, Італія. У книзі «Машини» навів перше зображення прообразів активної парової турбіни та газової турбіни.

1630 р., Девід Рамсі, Англія. Отримав патент на винахід, мета якого «піднімати воду з глибини за допомогою вогню». Більших роз'яснень у патенті не наводиться.

1680 р., Дені Папен, Франція. Винайшов паровий котел із запобіжним клапаном.

1680 р., Хрістіан Гюйгенс, Голландія. Запропонував конструкцію двигуна, який працював за рахунок послідовних вибухів пороху в циліндрі.

1688 р., Дені Папен, Франція. Виготовив двигун за ідеєю Гюйгенса.

1690 р., Дені Папен, Франція. Запропонував принцип дії поршневого двигуна, який являв собою циліндр із закритим дном та негерметичною верхньою кришкою.

1698 р., Томас Севері, Англія. Запатентував «Винахід для підйому води за допомогою рушійної сили вогню».

1707 р., Дені Папен, Франція. Обладнав паровим насосом власної конструкції судно, гребні колеса якого обертала вода, яка піднімалася насосом і падала на колеса з висоти.

1712 р., Томас Ньюкомен, Англія. Побудував пароатмосферну машину для відкачування води з використанням ідей Севері та Папена.

1736 р., Джонатан Хулл, Англія. Установив пароатмосферну машину Ньюкомена на дерев'яне судно з одним гребним колесом у кормі та й використав його для буксирування річкою Евон вітрильних кораблів.

1736 р., Джонатан Хулл, Англія. 21 грудня отримав патент № 556 на «Машину для руху суден з будь-якої гавані й річки в будь-яку гавань і річку, проти вітру та припливних течій або у штиль, яка може бути корисною для військових і цивільних кораблів».

1738 р., Даніїл Бернуллі. У фундаментальній праці «Гідродинаміка, або записи про сили й рухи рідини» теоретично обґрунтував можливість застосування на судні водометного рушія.

1753 р., Даніїл Бернуллі. Довів, що існуючі на той час двигуни не здатні були забезпечити рух судна.

1765 р., І. І. Ползунов. Побудував пароатмосферну машину, яка забезпечувала безперервний рух привідних механізмів. Перший двигун мав потужність 30 к. с.

1774 р., Джеймс Уатт, Англія. Запропонував та побудував парову машину простої дії для широкого застосування.

1780 р., Д. Рамсі, США. Побудував перше судно з водометним рушієм та пароатмосферною паровою машиною, яке

здатне було розвинути швидкість не більше 3 вузлів.

1781 р., Джонатан Горнблоуер, Англія. Запропонував виконувати розширення пари у двох послідовно з'єднаних циліндрах, що забезпечувало більш повне розширення пари і підвищення ефективності роботи парової машини.

1781 р., Джонатан Горнблоуер, Англія. Спроєктував парову машину, яка працювала на парі високого на ті часи тиску – біля 6 бар, з розширенням у двох послідовно розташованих циліндрах.

1782 р., І. П. Кулібін. Побудував річкове «водохідне» судно, рух якого здійснювався за допомогою двох пароводяних коліс, що приводилися нагнітаючою течією води, та провів його випробування.

1783 р., Жифуа д'Аббан, Франція. Побудував колісний пароплав «Pyroscaphe» з паровою машиною, який експлуатувався протягом року.

1784 р., Джеймс Уатт, Англія. Запропонував та побудував парову машину подвійної дії, у якій був застосований відцентровий регулятор, а передача потужності від штока поршня до балансира здійснювалася за допомогою паралелограма. У наслідок цього був створений універсальний паровий двигун.

1787 р., Джон Фітч, США. Випробував на р. Делавер парове судно «Perseverance», яке приводилося у рух за допомогою 12 вертикально закріплених на шарнірній рамі весел, з'єднаних зі штоком парової машини. У 1789 р. побудував бот «Experiment» з паровою машиною і рушієм у вигляді трьох весел, розташованих у кормі.

1789 р., П. Міллер, У. Саймінгтон, Англія. Застосували парову машину потужністю 12 к. с. на двокорпусному човні з гребними колесами, розміщеними одне за одним усередині корпусу. Швидкість руху човна складала 5 вузлів.

1791 р., Джон Барбер, Англія. Отримав патент на тепловий двигун, принцип дії якого багато в чому був схожий з принципом дії сучасного ГТД.

1794 р., Роберт Стріт, Англія. Отримав патент на двигун, у якому рідке паливо випаровувалося у циліндрі, змішуючись з повітрям, яке подавалося у циліндр, і підпалювалося запальним вогнем.

1801 р., Філіп Лебон, Франція. Отримав патент на робочий процес газового двигуна із самозапалюванням горючої суміші. Конструкція двигуна не була реалізована.

1802 р., Уільям Саймінгтон, Англія. Побудував буксирний катер «Sharlotte Dundas» з машиною Уатта потужністю 10 к. с., яка через кривошип обертала кормове гребне колесо.

1803 р., Р. Фултон, США. Побудував і провів випробування на р. Сена парового судна, яке рухалося проти течії.

1804 р., А. Вульф, Англія. Створив парову машину з двома циліндрами, яка працювала на парі тиском 3 атм, та провів її випробування. Економічність цієї машини у три рази перевищила економічність машини Уатта.

1804 р., А. Вульф, Англія. Реалізував пропозицію Д. Горнблоуера: побудував двоциліндрову парову машину, у якій глибоке розширення пари завершувалося у другому циліндрі більшого діаметра. Така парова машина, яка передбачала розширення пари у послідовно з'єднаних циліндрах, отримала назву «компаунд-машина», вона виготовлялася як з горизонтальним, так і вертикальним розташуваннями циліндрів.

1804 р., Англія. На катері «Little Juliana» одноциліндрова вертикальна парова машина через зубчасту передачу

обертала два гвинти. Чотирилопатеві гребні гвинти оберталися у взаємно протилежних напрямках, що забезпечувало судну стійкість на курсі та швидкість 15 км/год.

1807 р., Р. Фултон, США. Створив перше у світі судно «Clermont» з паровою машиною потужністю 18 к. с. (діаметр циліндра – 61 см, хід поршня – 122 см), придатне для комерційної експлуатації. Судно, водотоннажністю 150 т і довжиною 50 м, мало швидкість 5 вузлів, його п'ятиметрові бортові гребні колеса оберталися із частотою 20 $хв^{-1}$. Воно розвивало швидкість ходу до 8 вузлів.

1815 р., Р. Фултон, США. Створив перший в історії паровий корабель – пароплавофрегат «Demologos» водотоннажністю біля 2500 т.

1819 р., США. Американським пароплавом «Savannah» водотоннажністю 325 т (потужність парової машини 90 к. с.) здійснено трансатлантичний рейс за маршрутом Нью–Йорк–Ліверпуль–Петербург. На борту був запас палива у 75 т, який забезпечував роботу парової машини протягом 80 годин. Частково рух судна здійснювався під вітрилами. В Америці, 22 травня 1819 р., день, коли «Savannah» вийшла з Нью-Йорку, святкується як День мореплавства.

1822 р., США, Англія. У США нараховується біля 300 пароплавів, у Англії – біля 150. За станом на 1827 р., кількість пароплавів у США – 900, в Англії – біля 300.

1823 р., Самуель Браун, Англія. Побудував запатентований ним тепловий двигун з водяним охолодженням, робочий хід якого здійснювався при створенні розрідження у циліндрі.

1824 р., С. Карно, Франція. Опублікував наукову працю «Роздуми про рушійну силу вогню і про машини, здатні розвивати цю силу», у якій викладені основні положення, пов'язані з визначенням рівня досконалості теплових двигунів різних типів.

1827 р., Англія. Свій перший перехід через Атлантичний океан з Європи до Америки здійснив дерев'яний колісний пароплав «Curacao» водотоннажністю 438 т з паровою машиною потужністю 100 к. с.

1827 р., Чехія, 1836 р., Англія, Швеція. Чех Рессель, англієць Сміт, швед Еріксон запатентували конструкції гребних гвинтів.

1829 р. З'явилися перші поверхневі конденсатори, що надало можливість повністю відмовитися від застосування морської води для живлення котлів та підняти тиск пари до 5…7 бар. Широке застосування таких конденсаторів розпочалося лише з 1860 р.

1830-ті рр. Створені перші конструкції суднових водотрубних парових котлів. Це були котли з горизонтальними трубками (нахил трубок до горизонтальної площини – менше 30°).

1833 р., Вельмант Райт, Англія. Запатентував та побудував тепловий газовий двигун з охолодженням циліндрів водою у верхній мертвій точці.

1838 р., Англія. Англійський пароплав «Syrius» із 40 пасажирами на борту перетнув Атлантичний океан за безперервної роботи парової машини потужністю 320 к. с. При водотоннажності судна 703 т запас вугілля становив 440 т.

1838 р., Ф. Сміт, Англія. Побудовано пароплав «Archimed» водотоннажністю 237 т з вітрильним оснащенням та паровою машиною потужністю 90 к. с., яка за частоти обертання колінчастого вала 50 $хв^{-1}$ через зубчасту передачу обертала із частотою 150 $хв^{-1}$ гребний гвинт у вигляді короткої спіралі діаметром 2,1 м, довжиною 1,52 м. Пароплав, який розвивав швидкість 9 вузлів, вважається

першим у світі гвинтовим пароплавом. Під час руху під вітрилами для зменшення опору води гребний гвинт від'єднувався від валопроводу й обертався вільно.

1838 р., Вільям Барнет, Англія. Запатентував тепловий двигун з попереднім роздільним стисненням повітря і газу.

1839 р., Англія. Джордж Хайт отримав патент на конструкцію поворотної колонки з гребним гвинтом.

1840 р. Англія. Пароплав «Британія» відкрив еру трансатлантичного сполучення між Європою та Америкою. У цьому ж році засновано приз «Блакитна стрічка Атлантики». Приз носив символічний характер. Він був виконаний у вигляді блакитної стрічки, що підіймалась на щоглі судна, яке у рекордний час здійснило перехід із Англії до Нью-Йорку і у зворотньому напрямку. У 1935 році був виготовлений срібний кубок, який символізував приз «Блакитна стрічка Атлантики».

40-ві роки XIX ст. 1. Гребний гвинт починає швидко витісняти колісний рушій. 2. Парова машина на судні застосовується разом з вітрильним оснащенням. 3. З'явилися спеціальні конструкції парових машин для гвинтових пароплавів. Зазвичай це були горизонтальні парові машини. 4. Питома маса котломашинної установки становить біля 800 кг/к. с.

1841 р., Джеймс Джонстон, Англія. Отримав патент на тепловий двигун зі здійсненням руху поршня як під дією продуктів згоряння, так і під дією розрідження.

1842 р., Дрек, Англія. Запатентував та побудував двигун, який працював на світильному газі. Двигун розвивав потужність 20 к. с., він міг працювати і на гасі.

1843 р., Англія. «Great Britain» – один з найбільших пасажирських пароплавів XIX ст. і одне з перших у світі англійських суден зі сталевим корпусом і гребним гвинтом. Водотоннажність судна складала 3675 т, довжина – 98 м, ширина – 15,4 м, осадка – 4,9 м. Головним двигуном була найпотужніша на ті часи парова машина у 1500 к. с., гребний гвинт виконано шестилопатевим, забезпечував швидкість судна 12 вузлів. На судні були встановлені 6 щогл для вітрил. За 8 років «Great Britain» здійснило 45 трансатлантичних рейсів. За весь час роботи на цих рейсах було перевезено 33 000 пасажирів. Судно перевозило 360 пасажирів, чисельність команди 130 осіб. З 1843 по 1854 рр. це було найдовше судно у світі.

1850 р., Гаррі Вімсгарст, Німеччина. Запропонував конструкцію нерухомого підрулюючого пристрою, який складався із гребного ГРК, розміщеного в поперечному каналі носової частини судна.

1852 р., Хрістіан Рейтман, Голландія. Побудував двигун, у якому повітря і водень стискувалися насосом до 2…8 бар, суміш запалювалася електричною іскрою. У 1858 р. двигун був переобладнаний на світильний газ.

1857 р., Барзанті та Матеуччі, Італія. Побудували атмосферний двигун, у якому рух поршня догори здійснювався під впливом продуктів згорання, донизу – під тиском атмосферного повітря.

1857 р., Франція. Вийшов указ, згідно з яким усі кораблі, необладнані паровими машинами, підлягали виключенню зі списків флоту.

1858 р., Дегеран, Франція. Запропонував стискувати горючу суміш безпосередньо у циліндрі теплового двигуна, а не зовні.

1858 р., Англія. Спущений на воду гігантський, видатний для свого часу, пароплав XIX ст. лайнер «Great Eastern» водотоннажністю 32 700 т,

розрахований на перевезення без проміжного бункерування 4000 пасажирів з Англії до Австралії. Суднові запас вугілля складав 12 000 т; щодобово у топках спалювалось 320 т вугілля. Довжина судна складала 207 м, ширина – 25 м. Енергетичну установку судна складали дві парові машини – одна потужністю 3410 к. с. (для приводу двох бортових гребних колес діаметром по 16,8 м і масою 185 т), друга – 4890 к. с. (для приводу гребного гвинта діаметром 7,2 м, масою 36 т). Десять вогнетрубних котлів з вугільним опаленням за тиску пари 26 бар забезпечили роботу парових машин. На п'ятитрубному судні було передбачене вітрильне оснащення, розташоване на шістьох щоглах висотою 60 м. Швидкість судна – 14 вузлів.

1860 р. Поверхневі конденсатори набули значного поширення на суднах. Це надало можливість підняти тиск пари до 5…7 бар, що сприяло впровадженню машин дво- та трикратного розширення.

1861 р., Жан Ленуар, Швейцарія. Побудував горизонтальний газовий двигун подвійної дії. Коефіцієнт корисної дії двигуна не перевищував 4 %. Потужність складала 3…12 к. с.

1862 р., Швеція. Для підвищення продуктивності суднових парових котлів шведський інженер Джон Еріксон запропонував штучне дуття, яке дозволило підвищити кількість палива, що спалювалося у топці. З 1862 р. були реалізовані різні технічні рішення з цього приводу. Спочатку повітря спеціальними вентиляторами нагніталося у котельне відділення, створюючи деякий надмірний тиск. Пізніше повітря, яке попередньо пройшло через підігрівник, стали подавати безпосередньо в топку котла.

1862 р., Альфонс Бо де Роша, Франція. Запропонував і обгрунтував чотиритактний робочий цикл теплового двигуна.

1864 р., Ніколаус Отто, Ейген Ланген, Німеччина. Побудували тепловий атмосферний двигун потужністю 0,635 к. с., ККД якого становив близько 15 %. Загалом було випущено більше 5000 таких двигунів потужністю 0,5…3,0 к. с., їх загальна потужність склала 6 тис. к. с.

1865 р., О. І. Шпаковський. Запропонував конструкцію форсунки, яка забезпечувала якісне спалювання нафти і мазуту в розпиленому парою вигляді.

1873 р., Хрістіан Рейтман, Голландія. Через 20 років після створення водневого двигуна побудував перший чотиритактний двигун, який працював на світильному газі. Потужність двигуна становила 0,75 к. с.

1876–1878 рр., Ланген, Отто, Даймлер, Майбах, Німеччина. Їх спільною діяльністю було створення та доведення до працездатного стану дослідного зразка чотиритактного ДВЗ.

80-ті рр. XIX ст. 1. На суднах почали застосовувати барабанні водотрубні котли.

2. Основним типом суднової парової машини стала вертикальна машина двократного розширення. Почали використовуватися машини трикратного розширення.

3. Потужність парових машин досягла 5000 к. с.

1883 р., Юліус Даймлер, Німеччина. Побудував свій перший бензиновий одноциліндровий двигун потужністю 1,5 к. с.

1883 р., Г. Лаваль, Швеція. Отримав патент на реактивну парову турбіну.

1884 р., Чарльз Парсонс, Англія. Виготовив придатну для експлуатації багатоступеневу реактивну турбіну потужністю 6 к. с.

1884–1889 рр., Німеччина. На заводі «Отто–Дейтц», на якому працювали

Юліус Даймлер і Вільгельм Майбах, у 1884 р. побудований двоциліндровий газовий двигун потужністю 8 к. с. За станом на кінець 1889 р. цей завод випускав двигуни потужністю 1…100 к. с.

1885 р., Капітен, Англія. Побудував тепловий двигун, який працював на газі.

1886 р., Юліус Даймлер, Німеччина. Побудував катер «Neccar» довжиною 6 м з бензиновим двигуном потужністю 2 к. с.

1888 р., Чарльз Парсонс, Англія. Потужність побудованої за проєктом Ч. Парсона багатоступеневої реактивної турбіни становила 50 к. с.

1890 р., Свідерський, Німеччина. Побудував двигун Капітена із самозапалюванням мазута від високої температури стисненого повітрям.

1891 р., Герберт Стюарт, Англія. Спільно з компанією «Richard Hornsby&Co» відкрив підприємство з випуску компресорних ДВЗ, які працювали на гасі.

1892 р., Рудольф Дізель, Німеччина. Отримав патент на тепловий двигун з адіабатичним стисненням чистого повітря до тиску 25 МПа і досягненням температури 800 °С, при якій у циліндр впорскується газоподібне, рідке або пилоподібне тверде паливо. Перші зразки побудованих двигунів випробувань не витримали.

1893 р., Г. Лаваль, Швеція. На Всесвітній виставці у Чикаго демонструє свою першу активну парову турбіну потужністю 5 к. с.

1894 р., Деламар, Маландін, Франція. Побудували газові ДВЗ потужністю 700 і 1000 к. с.

1894 р., Чарльз Парсонс, Англія. Побудував судно «Turbinia» водотоннажністю 44,5 т з паровою турбіною потужністю 2000 к. с. Його швидкість становила 19,7 вузлів. Уперше зафіксував та ідентифікував явище кавітації під час роботи гребного гвинта.

1896 р., Чарльз Парсонс, Англія. Енергетична установка судна «Turbinia» після модернізації забезпечила швидкість 32,8 вузлів, на наступних випробуваннях – 34,5 вузлів. Вона складалася з трьох прямодіючих парових турбін високого, середнього та низького тисків, послідовно з'єднаних за рухом пари. Кожна турбіна мала свій валопровід і гребний гвинт.

1897 р., Німеччина. Професором Шреттером проведені офіційні випробування двигуна Дизеля на рідкому паливі. Конструкція двигуна набула значних змін порівняно з первинним патентом, отриманим Дизелем. Питома витрата палива становила 240 г/(к. с. · год), що відповідало ККД 26,2 %. У двигуні паливо розприскувалося повітрям за тиску 50…60 бар, стиснення повітря у циліндрі здійснювалося до 35 бар з підвищенням температури до 620 °С.

1898 р., Швейцарія. Брати Зульцер підписали договір з Рудольфом Дизелем стосовно використання нових технологій створення його двигуна.

1898 р., Англія. Три носові, три кормові підрулюючі пристрої і два гребні ГРК входять до складу пропульсивного комплексу круїзного лайнера «Fantasy». Кожен з підрулюючих пристроїв має ГГ з електроприводом.

1898 р., Данія. Компанія «Burmeister&Wain A/S» передала Рудольфу Дизелю права на виробництво його двигунів на датських підприємствах фірми.

1898 р., Швейцарія. Перший ДВЗ, побудований братами Зульцер, почав працювати 10 червня.

1898 р., Франція. Фредерік Дикхофф, який першим у Франції придбав патент Рудольфа Дізеля, побудував перший у світі реверсивний триціліндровий дизельний двигун. Цей двигун мав діаметр циліндра і хід

поршня по 132 мм, потужність його становила 15 к. с. за 600 хв$^{-1}$.

1898 р., Англія. Три гребні гвинти в кормі та один у носовій частині судна встановлені на криголамі «Єрмак» водотоннажністю 8700 т, побудованому фірмою «Armstrong Vitvort&Co» в Нью-Каслі за ініціативою і під наглядом адмірала С. О. Макарова. «Єрмак» був першим у світі полярним криголамом, спеціально спроєктованим і побудованим для подолання арктичних льодів. Чотири парові машини потужністю по 2500 к. с. приводили три кормові чотирилопатеві гвинти діаметром 4,28 м і носовий чотирилопатевий гвинт діаметром 3,95 м, що забезпечувало криголаму на чистій воді швидкість ходу до 15,9 вузлів. Економічну швидкість ходу до 6,7 вузлів забезпечували чотири парові машини по 200 к. с., які обертали ГГ через зубчасті редуктори з роз'єднувальними муфтами. Шість парових котлів забезпечували парою тиском 12,7 бар парові машини. Через низький рівень надійності невдовзі після початку експлуатації криголама парові машини економічного ходу з муфтами і редукторами та носовий гребний гвинт були демонтовані.

Початок XX ст. Як джерело електричної енергії головної енергетичної установки на суднах установлюються електричні генератори постійного та змінного струмів з тепловими двигунами різних типів.

1900 р., Г. Лаваль. На Всесвітній виставці 1900 р. у Парижі демонструє турбіну потужністю 350 к. с.

1900 р., Англія. На заводі Парсонса побудовані ПТУ для двох англійських есмінців «Cobra» і «Vipera» водотоннажністю 370 т і 390 т, які розвивали швидкість до 37 вузлів.

1901 р., Англія. На верфі Уїльяма Денні спущено на воду перше у світі паротурбінне торговельне судно «King Eduard».

1901–1940 рр., Німеччина. Сорок років – саме такий термін служби двох вертикальних парових машин з чотирикратним розширенням пари потужністю по 17 500 к. с., які забезпечували лайнеру «Kronprince Wilhelm» водотоннажністю 15 150 т, побудованому в 1901 р. у Штеттині, швидкість ходу складала 23,3 вузлів. Діаметр циліндра низького тиску складав 2590 мм, хід поршня – 1955 мм.

1903 р., Франція. Побудовано річкове судно «Pti Peer» з реверсивним ДВЗ потужністю 25 к. с.

1903 р., Ч. Парсонс, Англія. Спроєктував і виготовив для морського винищувача «Velox» водотоннажністю 440 т чотиривальну комбіновану турбомашинну установку з двома паровими турбінами високого тиску, двома – низького тиску і двома паровими машинами. Швидкість судна 34 вузли.

1903 р., Німеччина. 1. Гігантських розмірів досягали парові машини деяких суден. На лайнері «Kaiser Wilhelm II» водотоннажністю 26 500 т, побудованому у м. Штеттин, були встановлені дві парові машини довжиною 22,0 і висотою 12,8 м, які забезпечували швидкість ходу до 23,5 вузлів. Колінчастий вал парової машини мав масу біля 100 т.

2. Компанія «MAN» виготовила перший швидкохідний чотиритактний морський дизельний двигун.

1903 р., Швейцарія. Компанією «Sulzer» відкрито підприємство з виробництва дизельних двигунів у м. Винтерзурі.

1904 р., Німеччина. Прийнято до експлуатації найбільший у світі вітрильник «Proyssen» – сталеве трипалубне судно водотоннажністю 11,6 тис. т і вантажопідйомністю 8 тис. т. На цьому судні довжиною

145 м, шириною 16,3 м і висотою борту 9,9 м розташовано 47 вітрил загальною площею 5570 м. Швидкість судна становила 17 вузлів. Дві парові машини невеликої потужності забезпечували роботу вантажних лебідок, підйом якоря, керування рулем.

1904 р., Англія. побудований міноносець «Ласточка» водотоннажністю 140 т і швидкістю 27 вузлів. Потужність ПТ переднього ходу становила 2000 к. с., малого переднього та заднього ходу 250 к. с.

1905 р., Швейцарія. Компанія «Sulzer» розробила і виготовила перший реверсивний двотактний морський дизельний двигун.

1905 р., Англія. Судна «Victorian» та «Virginian» компанії «Allen Line» стали першими пасажирськими лайнерами з паротурбінною енергетическою установкою, які перетнули Атлантичний океан.

1906 р., Англія. Прямодіючі (ротор яких безпосередньо з'єднувався з ВП і ГГ) парові турбіни досягали значних розмірів. Чотирівальна паротурбінна енергетична установка потужністю 70 000 к. с. забезпечувала найбільшим на цей час лайнерам «Mavritania» та «Lusitania» водотоннажністю по 41 500 т швидкість ходу 26 вузлів. На турбіни з кількістю робочих ступенів 200 подавалася насичена пара тиском 15 атм з 25 котлів. Маса двох ТВТ з роторами діаметром 2,6 м та довжиною 7 м становила 144 т, а двох ТНТ з роторами діаметром 3,94 м і довжиною 5,6 м – 252 т.

1906 р., Англія. На лінкорі «Dreadnought», побудованому в Англії, для роботи парових котлів застосовані нафта і вугілля. Запас палива на кораблі складався на 60 % з кам'яного вугілля і на 40 % з нафти.

1907 р. Загалом у світі побудовано біля 90 багатоступеневих парових турбін Парсонса загальною потужністю 975 000 к. с.

1907 р., Англія. На побудованому для Нової Зеландії пароплаві «Otaky» водотоннажністю 950 т застосована комбінована тривальна енергетична установка потужністю 3350 к. с., у якій парова машина і парова турбіна пов'язані парою між собою. Бортові гвинти приводилися від поршневих машин, на середній гвинт працювала турбіна відпрацьованої пари.

1907 р., Швеція. Побудована шхуна «Orion» з реверсивним дизелем потужністю 60 к. с.

1907 р., Англія. Лайнер «Mavritania» з паротурбінною енергетичною установкою потужністю 70 000 к. с. завоював приз «Блакитна стрічка Атлантики», яким він володів наступні 22 роки.

1907 р., Німеччина. Інженер Феттінгер сконструював гідродинамічну муфту, яка передавала обертальний момент унаслідок взаємодії рідини з багатолопатевими колесами. Колесо ведучого вала виконує функції насоса, колесо веденого – функції гідравлічної турбіни. Такі муфти набули застосування в елементах СЕУ для забезпечення швидкого з'єднання та роз'єднання вала і рушія, окремих елементів редукторів між собою, безступеневого регулювання частоти обертання веденого вала через зміну наповнення порожнини муфти.

1909 р., Англія. На торговельному судні «Vespasian» з ПТУ застосована зубчаста передача. Агрегат, який складався з головної парової турбіни і зубчастої передачі, став називатися *головним турбозубчастим агрегатом.*

1910 р., Англія. Англійський танкер «Vulcanus» став першим морським судном з ДВЗ. На цьому судні був установлений шестициліндровий чотиритактний крейцкопфний

дизельний двигун потужністю 370 кВт компанії «Werkspoor».

1910 р., Швейцарія. Компанія «Sulzer» побудувала експериментальний одноциліндровий дизельний двигун з діаметром циліндра 1000 мм та ходом поршня 1100 мм, який розвивав потужність 1470 кВт за 150 хв$^{-1}$.

1910 р. Тиск пари у суднових вогнетрубних котлах зростає до 1,2 МПа.

1911 р., Англія. Побудовано пасажирський лайнер «Titanic», однотипний з побудованим роком раніше лайнером «Olympice». Водотоннажність судна складала 52 320 т, довжина – 252 м, ширина – 28 м, осадка – 11 м, швидкість ходу – 23 вузли, пасажиромісткість – 2500 пасажирів. Енергетична установка потужністю 46 000 к. с. складалася з двох чотирициліндрових парових машин тройного розширення потужністю по 15 000 к. с. і однієї – потужністю 16 тис. к. с., які працювали на три ГГ. Пара для парових машин тиском 1,4 МПа вироблялася 25 котлами, які працювали на вугіллі (на «Olympice» було застосовано нафтове опалення котлів). Судно загинуло 14 квітня 1912 р. у першому ж рейсі. Ця трагічна подія багато в чому ініціювала прийняття Міжнародних норм з рятування людського життя на морі.

1912 р. 1. Для вантажного лайнера «Monte Penedo» виготовлено двотактний чотирициліндровий дизель Sulzer 4S потужністю 625 кВт за 160 хв$^{-1}$ із циліндрами діаметром 470 мм та ходом поршня 680 мм. 2. Побудовано дослідний зразок двигуна Sulzer 1S100 потужністю 1470 кВт за 150 хв$^{-1}$. Діаметр циліндра складав 1 м.

1912 р., Данія. Вийшло у море датське судно «Selandia» водотоннажністю 9800 т з двигуном дизеля потужністю 2400 к. с. Це судно поклало початок застосуванню дизелів на найбільш багато чисельній групі морських торговельних суден – суховантажних.

1912 р., США. На американських лінійних кораблях з ПТУ вперше застосована електрична передача.

1914 р., Англія. Прийнято до експлуатації лінкор ВМС Великої Британії «Queen Elizabeth», котли якого працювали на нафті.

1915 р. Здійснило свій перший рейс пасажирське судно «Tuscania». Це перший у світі лайнер з паротурбінною енергетичною установкою, до складу якої входила механічна передача.

1915–1916 рр., Англія, Німеччина. Розпочато випуск безкомпресорних дизелів, придатних для використання як суднові двигуни.

1917 р., А. Бюхі, Швейцарія. Висунув ідею застосування газової турбіни, що працює на відпрацьованих газах, для забезпечення наддування дизеля.

1921 р., Англія. Перший дизельний двигун з поршнями, що рухаються у протилежних напрямках, установлений на судні «Yngaren».

1926 р., А. Флеттнер, Німеччина. Для забезпечення руху судна використав «Ефект Магнуса». Він установив три циліндричних ротори діаметром 4 м і висотою 17 м на палубі судна «Barbara» водотоннажністю 2800 т. Ротори оберталися електродвигунами потужністю 26 кВт із частотою 160 хв$^{-1}$. Живлення електродвигунів – від дизель-генераторів. Загальна площа роторів складала 10 % площі вітрил такої ж ефективності. За відсутності вітру та маневрах рух судна зі швидкістю 10 вузлів забезпечував дизель потужністю 1020 к. с.

1926 р., Ернст Шнейдер, Австрія. Розробив конструкцію крильчастого рушія для судна, яка забезпечувала зміну напряму та упору за незмінної частоти обертання ротора.

1927 р., Німеччина. Перші морські десятициліндрові чотиритактні двигуни

VulkanMAN з турбонагнітачами Brown Boveri встановлені на двогвинтових суднах «Preussen» та «Hansestadt Dancig».

1930 р. Біля 75 % суден торговельного флоту мали енергетичні установки з паровими машинами.

1930–1935 рр., колишній СРСР. Побудовано пасажирській теплоход з безкомпресорними двотактними двигунами. Шестициліндрові двигуни розвивали потужність 4000 к. с. за частоти обертання 130 $хв^{-1}$.

1931 р., Британія. Дизель-електрична енергетична установка вперше застосована на пасажирському судні «Loch Fyne», яке було прийнято до експлуатації 8 липня.

1932 р., Італія. Чотири головні турбозубчасті агрегати із чотирма ГГ установлені на пасажирському лайнері «Rex» водотоннажністю 51 075 т, призначеному для перевезення 2250 пасажирів. Кожен такий агрегат включав у себе турбіни високого, середнього й низького тисків переднього ходу та турбіни високого і низького тисків заднього ходу. Тиск пари становив 27 атм, температура 380 °С, частота обертання ТВТ та ТСТ становила 2500 $хв^{-1}$, ТНТ 2280 $хв^{-1}$. Потужність енергетичної установки склала 130 000 к. с., що забезпечило лайнеру рекордну на той час швидкість 28,92 вузлів, і він став володарем призу «Блакитна стрічка Атлантики».

1932–1937 рр. На суднах набули застосування дизель-редукторні установки з безкомпресорними двигунами. Передаточне число редукторів 2…4.

1935 р., Англія. Один ГЕД і чотири ДГ установлені на річковому теплоході «Talisman», побудованому на верфі «Messere&Engles». Гребний електродвигун потужністю 1300 к. с. за частоти обертання як 50 $хв^{-1}$ безпосередньо приводив восьмилопатеві гребні колеса діаметром 4,22 м, забезпечуючи судну маневрування та швидкість ходу до 19 вузлів. Живлення електродвигуна відбувалось від чотирьох ДГ потужністю по 400 к. с. за частоті обертання колінчастого вала 600 $хв^{-1}$.

1935 р., Франція. Чотиривальна енергетична установка потужністю 133 600 кВт застосована на лайнері «Normandia» водотонажністю 68 500 т. Довжина судна становила 313,7 м, ширина – 35,9 м, висота – 23 м, осадка – 11,32 м, пасажиромісткість – 1980 осіб. Гребні гвинти приводились чотирма електричними двигунами потужністю по 29 400 кВт, що забезпечило лайнеру середню швидкість 31,2 вузлів, протяжність рейсу 3 дні (приз «Блакитна стрічка Атлантики»). Живлення гребних електродвигунів відбувалось від чотирьох паротурбогенераторів потужністю по 33 400 кВт з 29 водотрубними котлами.

1937 р., Німеччина. На фірмі «Heinkel» виготовлено перший дослідний зразок авіаційного реактивного двигуна He S-1.

1937 р., колишній СРСР. Прикладом СЕУ з пневматичною передачею стала установка катера Л-5 водотоннажністю 8,6 т на повітряній подушці. Два авіаційних зіркоподібних двигуни М-25М потужністю по 890 к. с. з осьовими вентиляторами нагнітали повітря під днище у простір між скегами, піднімаючи катер з води. Рух катера відбувався за рахунок реакції струменів повітря, яке витікало з повітряної подушки, і регулювався заслінками. На випробуваннях катер розвивав швидкість 73 вузли.

1939 р., Німеччина. Здійснено перший у світі політ літака «He 178» з турбореактивним двигуном He S-1.

1940 р., Англія. Побудовано чотиригвинтовий пасажирський суперлайнер «Queen Elisabeth» водотоннажністю

77,4 тис. т і пасажиромісткістю 2285 чол., з екіпажем 1100 чол. До 1955 р. це судно було найбільшим у світі як серед цивільного, так і серед військового флотів. Довжина судна складала 314,5 м, ширина – 36 м, висота борту – 21 м, осадка – 12,1 м. Швидкість судна у 30 вузлів забезпечувалася чотирма ПТ сумарною потужністю 210 000 к. с., які працювали на парі тиском 30 Мпа від 12 водотрубних котлів на нафтовому опаленні. Потужність СЕС – 17,6 тис. кВт.

1940 р. Потужність окремих парових головних турбозубчастих агрегатів досягла 50 000 к. с.

1941 р., США. Суховантажник «Patrick Henry» – перше з 2700 стандартних суден типу «Lyberty», 26 грудня пройшов ходові випробування.

1941–1944 рр., США. Для вантажних суден типу «Lyberty» виготовлено 2500 парових машин трикратного розширення потужністю по 2500 к. с. Після 1945–1947 рр. У широких масштабах розгорнута побудова суден з дизель-електричними силовими установками.

1947 р., Англія. На канонерському човні «MGB 2009» водотоннажністю 100 т англійського військово-морського флоту застосовано ГТД G-1 фірми «Metropoliten Vikkers» потужністю 2500 к. с. Двигун використовувався як прискорювальний у складі комбінованої енергетичної установки з трьома ГГ. Бортові трилопатеві гребні гвинти діаметром 1,12 м і бензинові двигуни фірми «Pakkard» з реверсредукторами потужністю по 250 к. с. забезпечували маневрені режими і тривалий економічний режим. На цьому режимі роботи енергетичної установки середній гвинт діаметром 1,12 м вільнообертався у потоці води. Максимальну швидкість ходу 34 вузли катер розвивав при підключенні ГТД.

1948 р., Джон Ламб, Англія. Довів можливість застосування важких палив для дизельних двигунів.

1951–1953 рр., колишній СРСР. Виготовлена для застосування на торпедних катерах газотурбінна установка М-1 потужністю 2940 кВт, проведені випробування.

1951 р., Англія. Танкер «Auris» водотоннажністю 12 250 т став першим у світі торговельним судном, на якому встановлено ГТД. Один із чотирьох ДГ було замінено газотурбогенератором з одновальним ГТД потужністю 956 кВт з регенерацією теплоти відхідних газів. За 5 років експлуатації установка відпрацювала більше 20 000 год, з яких 6650 год – на мазуті.

1952 р., США. Рейс пасажирського судна «United States» з ПТУ потужністю 235 000 к. с. розпочався 4 липня. Воно стало володарем «Блакитної стрічки Атлантики», розвинувши швидкість 35,59 вузлів. Цей результат до сьогодні залишився неперевершеним.

1952 р., Англія. Проведені успішні випробування чотиривальної енергетичної установки, у складі якої були два дизельні двигуни, як маршові та два ГТД як прискорювальні. Такі двигуни застосовувалися на патрульних катерах серії «Bond». У процесі випробувань отримано питому витрату палива 490 г/(кВт · год), що відповідало ККД циклу близько 16 %.

1954 р., Україна. Радою Міністрів прийнята Постанова про створення у Миколаєві бази корабельного газотурбобудування на Південному турбінному заводі (ПТЗ).

1954 р., США. Розпочато експлуатацію першого у світі бойового корабля з АЕУ – підводного човна «Nautilus». Водо-водяний реактор тепловою потужністю 60 МВт забезпечував роботу двох ПТ потужністю по 7500 к. с. Пара для роботи турбін мала

температуру 230 °С і тиск 1,8 МПа. Живлення електроустаткування забезпечувалося чотирма паротурбогенераторами по 300 кВт, акумуляторною батареєю. З першим завантаженням ядерним паливом «Nautilus» пройшов 69 138 миль зі швидкістю до 23 вузлів.

1955 р., Англія. На канонерському човні «Grey Goos» водотоннажністю 250 т змонтовані дві експериментальні ГТУ RM-60 фірми «Rolls-Royce» потужністю по 4000 кВт. Установка працювала за циклом з трьома ступенями стиснення, двома ступенями проміжного охолодження повітря, трьома ступенями розширення і регенерацією теплоти відхідних газів. Питома витрата палива ГТУ складала 410 г/(кВт · год) (ККД ≈ 20 %). Застосування газотурбінних двигунів мало експериментальний характер.

1955 р., Японія. Фірма «Mitsubishi Heavy Industries LTD» («MHI») розпочала виробництво двотактних МОД за ліцензією фірми «B&W».

1956 р., США. Електроенергетична установка криголама «Glacier» водотоннажністю 8450 т складалась із десяти ДГ потужністю по 1950 кВт і двох ГЕД потужністю по 7700 кВт. Швидкість ходу криголама – до 18,3 вузлів.

1956 р., Англія. Рейсом конвертованого танкера «Ideal X» компанії «Malcom McLean», на борту якого було перевезено 58 контейнерів з Порт Неварк до Х'юстона, 26 квітня розпочата ера контейнерних перевезень. Середина 50-х рр. XX ст., Англія. Значного поширення у складі енергетичних установок військових кораблів невеликої водотоннажності набув конвертований ГТД «Protay 1260» потужністю 3800 к. с.

1956 р., Англія. Три дизель-генератори та один газотурбогенератор танкера «Auris» замінено однією ГТУ потужністю 5500 к. с., виконаною за схемою з двоступеневим стисненням повітря, проміжним його охолодженням і регенерацією теплоти відхідних газів.

1956 р., США. На судні «John Sergeant» типу «Lyberty» застосована ГТУ потужністю 6000 к. с. фірми «General Electric», виконана за схемою з регенерацією теплоти відхідних газів.

1956 р., колишній СРСР. До складу електроенергетичної установки китобійного судна «Мирний» водотоннажністю 1273 т, побудованого у Миколаєві, входили чотири ДГ потужністю по 760 кВт, які приводилися дизелями Д50 потужністю по 810 кВт ($n = 740$ хв$^{-1}$), та ГЕД потужністю 2600 кВт при $n = 200$ хв$^{-1}$. Чотирилопатевий гвинт діаметром 3,2 м забезпечував швидкість ходу судна 16,5 вузлів.

1956–1958 рр., колишній СРСР. За цей період на ПТЗ (м. Миколаїв) були виготовлені 34 серійні газотурбінні двигуни М-1, призначені для використання як прискорювальні двигуни морських торпедних катерів.

1957 р., колишній СРСР. Побудовано перше пасажирське СПК «Ракета» водотоннажністю 24,5 т з головним двигуном потужністю 830 к. с., призначене для перевезення 64 пасажирів зі швидкістю 60 км/год. До 1967 р. було побудовано більше 200 таких суден.

1958 р., колишній СРСР. 1. До складу морського флоту передано судно «Фізик Вавілов» – перше із серії сухонтажних суден типу «Лєнінський комсомол» і перше радянське паротурбінне транспортне судно з ПТУ типу ТС-1 потужністю 13 000 к. с. Параметри пари за котлом: $P_0 = 4$ МПа, $t_0 = 450$ °С. Питома витрата палива на установку становила 245 г/(к. с. · год). Усього було побудовано 25 таких суден.

2. 3 липня у море на ходові випробування вийшов перший атомний підводний човен К-3 (з 1962 р. – «Лєнінський комсомол»). Два ядерні водо-водяні реактори тепловою потужністю по 70 МВт з парогенераторами продуктивністю 180 т/год пари з тиском 3,2 МПа та температурою 310 °С забезпечували роботу двох ПТ сумарною потужністю 25 900 кВт. Швидкість човна у підводному положенні сягала до 30 вузлів.
3. Газова турбіна з чотирма вільнопоршневими генераторами газу (ВПГГ) установлена на лісовозі «Павлин Виноградов» дедвейтом 6400 т, побудованому на Балтійському заводі. Газова турбіна переднього ходу потужністю 4000 к. с. за частоти обертання 5500 хв$^{-1}$ (частота обертання ГГ 115 хв$^{-1}$) забезпечувала швидкість судна до 14,2 вузлів, а газова турбіна заднього ходу потужністю 1400 к. с. за частоти обертання ГГ 80 хв$^{-1}$ забезпечувала хід протягом 15 хв. Вільнопоршневі генератори газу типу «GS-34» французької фірми «Sigma» виробляли 3,85 кг/с газу температурою 450 °С за тиску 0,41 МПа. Маса кожного ВПГГ становила 8 т. Питома витрата мазуту на номінальному режимі складала 190 г/(к. с. · год). За період з 1958 по 1965 рр. побудовано шість таких суден.

1959 р., колишній СРСР. 1. На суднобудівному заводі ім. Носенка у Миколаєві побудована найбільша у світі китобаза «Совєтская Україна» водотоннажністю 44 900 т, призначена для переробки китів. Потужність ДЕУ 2×7500 к. с. Швидкість судна 16 вузлів, чисельність екіпажу 536 осіб. 2. 3 грудня закінчені ходові випробування і введений в експлуатацію атомний криголам «Лєнін» водотоннажністю 17 300 т – перше у світі цивільне судно з АЕУ потужністю 44 000 к. с. Судно оснащене трьома паропродуктивними установками, кожна з яких включала у себе водо-водяний реактор, два парогенератори, чотири головні і два аварійні циркуляційні насоси. Реактори (два основні, один резервний) тепловою потужністю по 90 МВт забезпечували необмежений район плавання криголама і швидкість ходу 19,7 вузлів. Три ГГ приводились кожен своїм електричним двигуном постійного струму, з яких середній мав потужність 14 400 кВт, – а бортові – по 7200 кВт.

1959 р., США. Уперше у світі 25 січня судно «Methan Pioneer» вирушило у рейс до Луїзіани з вантажем LNG.

1961 р., колишній СРСР. Побудовано перше морське судно на підводних крилах «Комета» водотоннажністю 56 т, призначене для перевезення 118 пасажирів зі швидкістю 34 вузли. Потужність головної енергетичної дизельної установки 2×740 кВт.

1962 р., США. 1. У перше плавання 20 серпня вийшло американське судно «Savannah» водотоннажністю 15 500 т, призначене для перевезення вантажів і пасажирів, яке за довжини 169 м розвивало швидкість 20 вузлів. Рух судна забезпечувала АЕУ, до складу якої входили водоохолоджуваний ядерний реактор і ПТ «De Laval» потужністю 14 700 кВт. На жаль, перший рейс судна «Savannah» став, за невизначених причин, і останнім: судно було виведене з експлуатації. 2. Різнотипні рушії були застосовані у ПК катера на підводних крилах «Denison». Маневрування і плавання у водотоннажному положенні зі швидкістю до 11 вузлів забезпечували два ВР, розташовані побортно, які приводяться від ГТД «Т-58». Рух катера на крилах зі швидкістю до 80 вузлів забезпечував трилопатевий суперкавітуючий

ГГ діаметром 1020 мм за частоти обертання 3700 хв$^{-1}$ з приводом від ГТД «MS240».

1962 р., колишній СРСР. Завершено ходові випробування першої у світі морської всережимної ГТУ, побудованої на підприємстві ПТЗ (м. Миколаїв), до складу якої входили чотири газотурбінні двигуни МЗ, потужністю по 13 200 кВт. Електрична установка двовальна, на кожен з валопроводів працюють два ГТД через підсумовувальний редуктор. Реверс СЕУ забезпечувався редукторами. Газотурбінна установка призначена для головного корабля 61 проєкту «Комсомолец України». У період з 1962 по 1988 рр. було побудовано 25 кораблів цього проєкту, з них 20 одиниць у Миколаєві.

1963 р., колишній СРСР. 1. Введено в експлуатацію танкер «Софія» дедвейтом 49 370 т – головний у серії танкерів з ПТУ типу ТС-2 потужністю 19 000 к. с. Параметри пари перед ТВТ: тиск – 4 МПа, температура – 465 °С. Питома витрата палива на паротурбінну енергетичну установку становить 245 г/(к. с. · год).

2. Побудовано найбільше на ті часи морське пасажирське СПК «Віхрь» водотоннажністю 118 т, призначене для перевезення 260 пасажирів зі швидкістю 35 вузлів. До складу енергетичної установки входили чотири ДВЗ потужністю по 740 кВт.

1964 р., Україна. На ПТЗ (м. Миколаїв) виготовлені два ГТД Д-3 потужністю по 3200 кВт, кожен з яких приводив окремо розташований компресор і два гідромоторні пристрої, установлені на протичовновому кораблі проєкту 35 водотоннажністю 1150 т з двовальною дизельною установкою маршового ходу. Кожен з дизельних двигунів працював на ГГ, розташований у трубі гідромотора, забезпечуючи швидкість 17,5 вузлів. Газотурбокомпресори нагнітали 100 кг/с повітря під тиском 0,2 МПа в гідромотор за ГГ, що створювало додатковий упор разом з реактивним ефектом від дії відхідних газів ГТД, які розташовувалися в кормі. Це забезпечувало швидкість корабля до 31 вузли та зниження інтенсивності його шумового поля.

Починаючи з 1965 р. Поширеного застосування на транспортних суднах набули двотактні ДВЗ, які безпосередньо поєднувалися з валопроводом (частота обертання 100…200 хв$^{-1}$). Характерною особливістю таких двигунів була наявність газотурбінного наддуву. Циліндрова потужність доходила до 1500 кВт. Це двигуни фірм «MAN», «Burmeister&Wain», «Sulzer».

1965 р., Англія. У Великобританії побудовано танкер «British Admiral», перше судно дедвейтом більше 100 000 т (119 313 т).

1966 р., Японія. В Японії побудовано танкер «Idemitsu Maru» дедвейтом 209 413 т, перше у світі судно типу VLCC (дедвейтом більше 200 000 т).

1966 р., Україна. Побудовано (м. Херсон) суховантажне судно «Паризька Комуна» дедвейтом 16 000 т з ГТУ-20 потужністю 9600 кВт. До складу енергетичної установки входили два ГТД, які через підсумовувальний редуктор обертали гребний гвинт регульованого кроку. Чотирилопатевий ГГ діаметром 6,3 м за частоти обертання 100 хв$^{-1}$ разом з ГТД забезпечували швидкість ходу 19,2 вузлів. Питома витрата палива на установку становила 292 г/(кВт · год) дизельного палива або 305 г/(кВт · год) мазуту.

1967 р., США. На транспортному судні «Admiral Callagan» (дедвейт складав 7000 т, швидкість – 26 вузлів) застосована двовальна енергетична установка з двома ГТД типу FT4 американської фірми «Pratt&Whitney»

потужністю по 18,7 МВт. У подальшому (1969 р.) FT4 були замінені на двигуни LM2500 потужністю по 22,8 МВт.

1968 р., ФРН. Побудовано суховантажне судно водотоннажністю 14 000 т «Otto Hahn» з АЕУ потужністю 7350 кВт. До 1979 р. воно використовувалося як дослідницьке судно, але з економічних міркувань у 1982 р. на ньому відбулася заміна АЕУ на дизельну. Змінивши власника, воно отримало назву «Hua Kang He» і використовувалось як звичайне комерційне судно.

1968 р., Англія. 1. Кожен із чотирьох ГТД «Marine Protey» потужністю 2500 кВт, установлених на автомобільно-пасажирському поромі на повітряній подушці «SRNY Mk.1 Mountbutten» водотоннажністю 200 т, через складну зубчасту передачу обертав одночасно чотирилопатевий повітряний гвинт діаметром 5,79 м, відцентровий дванадцятилопатевий нагнітач діаметром 3,5 м і допоміжні механізми. Чотири ГТД, два повітряних гвинти і два нагнітача повітря розміщені у кормовій частині судна, а інші два повітряних гвинти і два нагнітачі з подовженими валопроводами від відповідних ГТД – у носі. Пором розвиває швидкість ходу до 70 вузлів. 2. Фрегат «Exmouth», перший у Великобританії корабель з газотурбінною всережимною енергетичною установкою, увійшов до складу військового флоту через шість років після введення в експлуатацію корабля з аналогічною ЕУ, побудованою у Миколаєві на ПТЗ.

1970 р., Україна. Уведено в експлуатацію НДС, призначене для забезпечення космічних польотів «Академік Сергій Корольов» водотоннажністю 21 250 т, побудоване на Чорноморському суднобудівному заводі у Миколаєві. Потужність головної енергетичної одновальної дизельної установки становила 8800 кВт, швидкість ходу судна – 17,5 вузлів, дальність плавання – 22 500 миль, автономність 120 діб, чисельність екіпажу 307 осіб.

1971 р., Японія. Побудовано судно «Univers Curs» водотоннажністю 180 тис. т, обладнане стрічковими транспортерами. Цей балкер довжиною 303,8 м вважається найбільшим судном, здатним самостійно виконувати вантажні операції.

1971 р., Німеччина. Здано в експлуатацію «Euroliner», перший із чотирьох («Euroliner», «Asialiner», «Eurofriter», «Asiafriter») контейнеровозів, призначених для перевезення 816 FEU. Головна енергетична установка контейнеровоза включала у себе два ГТД фірми «Pratt&Whitney» FT4A-12 потужністю по 22 МВт. Швидкість судна становила 28 вузлів.

1971 р., Швейцарія. Як паливо для головних двигунів Sulzer 8RND90 танкерів «Conoco Espana» та «Conoco Britannia», дедвейтом 115 000 т, призначених для перевезення лівійської сирої нафти, застосовано саме цю нафту.

1972 р., Голландія. На окремих суднах застосування знайшли ПТУ значних потужностей. На контейнеровозі «Sea Land Machean» дедвейтом 27 670 т установлено два головні турбозубчасті агрегати потужністю по 44 000 кВт. За частоти обертання ГГ 135 $хв^{-1}$ судно рухалося зі швидкістю ходу 33 вузли.

1972 р., Японія. Побудовано суховантажне судно «Mutsu» довжиною 130 м, шириною 19 м і водотоннажністю 8200 т з АЕУ, але через протести місцевого населення, пов'язані з використанням ядерної енергії, воно почало використовуватися тільки з 1974 р. Потужність АЕУ становила 6600 кВт. Під час пробної

експлуатації виникла низка проблем, пов'язаних з роботою реактора. Як наслідок, у 1991 р. використання судна за первинним призначенням було припинено, відбулася заміна АЕУ на ДЕУ, судно змінило власника і почало використовуватися як звичайне комерційне судно під назвою «Mirai».

1972 р., Україна. Перший у світі досвід застосування теплоутилізаційного контура (ТУК) у складі газотурбінної установки: на допоміжному судні «Бєрєзіна» встановлено ГТА з ТУК, виготовлений на Південному турбінному заводі у Миколаєві. Потужність утилізаційної парової турбіни склала 3600 кВт. Утилізаційний котел виконаний гладкотрубним, за традиційною схемою, він мав масу біля 140 т за висоти 5,5 м.

1972 р., Франція. До складу комбінованої енергетичної установки (COGAG) автомобільно-пасажирського порома на повітряній подушці «Navyplane 2000» водотоннажністю 2000 т входить шість ГТД потужністю по 4600 кВт. Повітряну подушку створюють два осьові нагнітачі діаметром 4 м, які приводяться двома газотурбінними двигунами. Ще чотири ГТД, розташовані попарно у скегах корпусу порома, забезпечують роботу осьових насосів чотирьох водометних рушіїв (ВР). Швидкість порома становить 54 вузли.

1973–1975 рр., Норвегія, **США, Австралія.** Побудовано серія суден, оснащених ГТУ з ГТД промислового типу фірми «General Electric». Це судна з горизонтальною вантажообробкою, пороми, танкери. Потужність ГТУ складала 9…18 МВт. Енергетичні установки танкерів і поромів виконані із застосуванням головних електричних передач.

1973 р., Швеція. Побудований найбільший на той час нафторудовоз «World Gulle» водотоннажністю 317 тис. т (дедвейт складав 282 тис. т). Дев'ятициліндровий дизель фірми «Burmeister&Wine» потужністю 31 500 кВт, також найбільш потужний, дозволяв розвивати швидкість 16,3 вузлів.

1973 р., США. Комбінована енергетична установка COGAG застосована на пасажирському поромі на повітряній подушці «НМ-6» водотоннажністю 167 т. Повітряну подушку створюють два нагнітачі з ГТД ST69-70 потужністю по 375 кВт, рух судна забезпечують ВР, насоси яких приводяться двома ГТД фірми «Avco Lycoming» потужністю по 1840 кВт. Швидкість судна складає 48 вузлів.

1973 р., Фінляндія. На судні типу LNG «Venator» вантажомісткістю 25 000 м^3 уперше у світі застосований двопаливний двигун Sulzer 7RND90 потужністю 15 000 кВт, який працював як на важкому паливі, так і на газі, який випаровувався з вантажних танків. Потужність двигуна, яку він розвивав на газі через низький тиск впорскування, становила лише 10 300 кВт.

1974 р., Україна. На Керченському суднобудівному заводі «Залив» побудовано найбільше судно у колишньому СРСР – танкер «Крим» дедвейтом 150 000 т. Усього побудовано шість однотипних суден: «Крим», «Кавказ», «Кривбас», «Кузбас», «Кубань», «Совєтская нєфть». Головною енергетичною установкою «Криму» була паротурбінна установка ТС-3 потужністю 22 тис. кВт. Паропродуктивність головного котла 80 т/год. Параметри пари за котлом: $P_0 = 1{,}65$ МПа, $t_0 = 510$ °С. У топках парових котлів (головного та допоміжного) щодобово спалювалося 135 т мазуту. Швидкість судна становила 16,8 вузлів.

1974 р., Фінляндія. Дев'ять ДГ постійного струму потужністю по 3090 кВт для

живлення трьох ГЕД постійного струму потужністю по 8830 кВт за частоти обертання 115 хв$^{-1}$ установлені на криголамі «Єрмак» водотоннажністю 20 240 т зі швидкістю ходу 19,5 вузлів, побудованому верф'ю «Wärtsillä». Привід електрогенераторів забезпечується дизелями 12ZH40/48 потужністю 3390 кВт компанії «Wärtsillä-Sulzer».

1974 р., Норвегія. На газовозі «Lucaine» (сестринське судно «Venator») змонтована енергетична установка з ГТД MS 5212R фірми «General Electric», здатним працювати як на нафтовому паливі (дистилятному або мазутному), так і на метані, який випаровується з вантажних танків під час здійснення рейсу.

1974 р., колишній СРСР. Прийнято до експлуатації атомний криголам «Арктика». До складу енергетичної установки криголама входять два головні турбогенератори сумарною потужністю 55 150 КВт. Кожен головний ТГ складається з парової турбіни, трьох послідовно з'єднаних з нею співвісних електрогенераторів змінного струму. Шість синхронних генераторів потужністю по 9000 кВт забезпечують живлення через напівпровідникові випрямлячі трьох ГЕД постійного струму. Робота ПТ забезпечується паропродуктивною установкою з двох автономних блоків до кожного з яких входять ядерний реактор водо-водяного типу, чотири парогенератори, чотири циркуляційні насоси першого контуру. У 1977 р. прийнято до експлуатації аналогічний криголам «Сибир», у 1985 р. – ще три однотипні криголами.

1975 р., Англія. На судні «Energy Independence» з паротурбінною енергетичною установкою, призначеному для перевезення вугілля, як паливо застосовано вугілля з автоматизованою підготовкою вугілля та видаленням золи.

1975 р., США. Три газотурбінні двигуни FT4A-12 потужністю по 14,7 МВт, шість дизель-генераторів потужністю по 2540 кВт і три гребні електродвигуни встановлені на криголамі берегової охорони США «Polar Star» водотоннажністю 12 000 т з тригвинтовою енергетичною установкою. Гребні електродвигуни потужністю по 4400 кВт забезпечують судну швидкість ходу до 13 вузлів. На форсажному режимі, пов'язаному з необхідністю подолання льодового поля значної (більше 2 м) товщини, потужність трьох ГТД через редуктори подавалася на гребні гвинти регульованого кроку, ДГ при цьому не працюють.

1975 р., Україна. На Чорноморському суднобудівному заводі (м. Миколаїв) побудовано головне судно серії з більше ніж 80 суден – ВМРТ типу «Пулковський меридіан» водотоннажністю 5720 т. Потужність головних дизельних двигунів 2×2500 кВт, швидкість судна 14,3 вузлів.

1976 р., Франція. На верфі «Chantiers de l'Atlantique yard» у м. Сен-Назарі спущене на воду найбільше судно у світі серед суден, побудованих за первинним проєктом без будь-якої модернізації, – танкер «Batillus» водотоннажністю 632 тис. т (дедвейт 553 000 т). Довжина його складає 414 м, ширина – 63 м, висота борту – 36 м, осадка – 28,6 м. Чотири головні парові турбозубчасті агрегати фірми «Stal Laval» по 47 600 кВт приводять до дії два п'ятилопатеві ГГ діаметром 8,5 м та чотири вантажні насоси з подачею 24 000 м^3/год. Два головні парові котли фірми «Foster Willer» продуктивністю по 125 т/год пари тиском 8 МПа і температурою 515 °С споживають 330 т мазуту на добу. До 1979 р. у Франції були

побудовані ще три таких же танкери: «Belamia», «Per Gilyom» та «Prairial».

1977 р., Фінляндія. На двовальному фінському поромі «Finnjet» установлені два ГТД FT4C2 сумарною потужністю 55,2 МВт. Швидкість судна 30,5 вузлів, воно перевозить 1500 пасажирів і 350 автомашин.

1977 р., Україна. 1. Три крильчасті рушії ДКК 3200 установлені на крановому судні «Вітязь» водотоннажністю 4200 т, вантажопідйомністю 1000 т. Крильчасті рушії, один з яких розташований у носі, а два – у кормі, що приводилися дизелями, забезпечили судну необхідні маневрені якості. 2. Міністерство морського флоту отримало побудований на заводі «Океан» (м. Миколаїв) найбільший у колишньому СРСР великотоннажний нафторудовоз «Борис Бутома» дедвейтом 109 640 т з головним двигуном 8ДКРН 84/180-3, потужністю 15 500 кВт, який забезпечував швидкість судна – 15,2 вузлів.

1978 р., Україна. На Чорноморському суднобудівному заводі (м. Миколаїв) побудовано перше у світі судно з горизонтальною вантажообробкою «Капітан Смірнов» дедвейтом 20 000 т з комбінованою газопаротурбінною двовальною енергетичною установкою загальною потужністю 36 800 кВт. До складу СЕУ входять два головні всережимні газотурбінні агрегати М25 з утилізаційним контуром. Кожен агрегат складається з газотурбінного двигуна Д59 потужністю 14,12 МВт, ПТУ потужністю 4,28 МВт і загального редуктора. Питома витрата палива ГТА становить 204 г/(кВт · год). У наступні роки були побудовані ще три однотипні судна: «Капітан Мєзєнцев», «Інженер Єрмошкін», «Володимир Васляєв» (1987 р.). Судна не мають аналогів у світовому суднобудуванні.

1979 р., Японія. Побудовано внаслідок подовження танкера «Opnama», дедвейтом 418 тис. т, найбільше у світі судно-танкер «Seawyes Giant» водотоннажністю 640 тис. т (дедвейт 565 тис. т) з паротурбінною енергетичною установкою. Розміри судна: довжина складала 458 м, ширина – 69 м, висота борту – 30 м, осадка – 24,6 м. До руху танкер приводиться ПТ потужністю 36,8 тис. кВт, яка працює на ГГ діаметром 9 м, що забезпечує швидкість 16,2 вузлів.

1980 р., Німеччина. Компанія «MAN» об'єднала потужності з виробництва дизельних двигунів з компанією «Burmeister&Wain».

1980 р., Японія. На доповнення до ДЕУ потужністю 1170 кВт танкера «Sin Aitoku Maru» водотоннажністю 2220 т фірма «Nippon Kokan Kaisha» установила два каркасні вітрила, що складаються, загальною площею 194,4 м^2. За швидкості вітру 16,7 м/с танкер розвиває швидкість 15 вузлів.

1980 р., Австралія. Двопаливний дизель фірми «Fuji» потужністю 1220 кВт установлено на вантажному судні дедвейтом 7500 т. Під час маневрування судна дизель працює на рідкому паливі, на переході морем – на природному газі. Судновий запас газу зберігається в палубних цистернах під тиском 16 МПа. Заправка цистерн – від міської газової мережі або від спеціальних станцій, розташованих на шельфі.

1981 р., Україна. На Керченському суднобудівному заводі «Залив» здано головне судно великої серії екологічно чистих танкерів дедвейтом 68 000 т типу «Побєда», які відповідали вимогам Конвенцій МАРПОЛ-73 і СОЛАС-74. Головний двигун – МОД 7ДКРН 80/160-4 – потужністю 12 300 кВт пристосований для роботи на важких сортах палива. Швидкість судна 15,8 вузлів.

1982 р., Японія. На рудовозі «Hoei Maru» дедвейтом 208 700 т, побудованому

фірмою «Kawasaki Dzucoqie», застосований найбільший у світі ГРК діаметром 11 м, масою 76 т за 45 $хв^{-1}$, який обертається двотактним дизелем фірми «MAN» за частоти обертання 126 $хв^{-1}$ через редуктор.

1983 р., Україна. На Херсонському суднобудівному заводі здано до експлуатації перший радянський ліхтеровоз «Олексій Косигін» дедвейтом 40 880 т для перевезення ліхтерів вантажопідйомністю до 450 т зі швидкістю ходу 17,5 вузлів, яку забезпечували два головні двигуни 7ДКРН80/160 потужністю по 12 300 кВт. За період до 1989 р. побудовано чотири судна цього типу.

1983 р., Японія. Два парові котли з вугільним опаленням установлені на бокситовозі «Rive Boin» дедвейтом 75 500 т. Котли продуктивністю 70 т/год пари, перегрітої до 480 °С за тиску 6,3 МПа, оснащені автоматизованою системою подачі в топки гранульованого (22…45 мм) вугілля. З вугільних бункерів об'ємом 4222 $м^3$ вугілля подавалося у два витратні бункери, розраховані на 6 год роботи. У топки подавалося 16 т/год вугілля, з накопичувачів ємністю 25 т зола видалялася за борт у вигляді водопульпи. Усі системи герметичні, виключають появу пилу у МВ. Енергетична установка з паровою турбіною MS-21-2 потужністю 14 МВт за питомої витрати вугілля 360 г/(кВт · год) забезпечує судну швидкість 16 вузлів.

1985 р., Україна. На Керченському суднобудівному заводі «Залив» побудовано перше у світі лінійне атомне транспортне судно-ліхтеровоз «Сєвморпуть» довжиною 229 м, шириною 32,2 м, дедвейтом 33 980 т, здатне перевозити 74 стандартні ліхтери вантажопідйомністю до 450 т або 1330 контейнерів TEU зі швидкістю 20 вузлів. Рух судна забезпечувався АЕУ потужністю 29 400 кВт. Судно передано замовнику – Мурманському пароплавству у грудні 1988 р.

1985 р., Франція. Французький океанограф Жак Ів Кусто та професор Л. Малавар на судні «Alkiona» водотоннажністю 65 т установили турбовітрило Кусто, яке використовувало «Ефект Магнуса». Турбовітрило – це нерухомий циліндр еліптичного перерізу висотою 10,2 м і осями еліпса 2,05 та 1,35 м з отворами на одній стороні, через які відбувається відсмоктування повітря електровентилятором потужністю 9 кВт. За швидкості вітру 13 м/с судно розвиває швидкість ходу 15 вузлів. Вітрорушії на довгих переходах економлять до 35 % палива дизельної установки. Загалом у складі СЕУ «Alkiona» застосовані двигуни внутрішнього згоряння, механічна та електрична передачі, гребні гвинти і два турбовітрила Кусто.

1986 р., колишній СРСР. Здано до експлуатації головне транспортне судно «Вітус Бєрінг» дедвейтом 10 700 т, призначене для експлуатації в умовах подовженої навігації за температури навколишнього повітря до –15 °С. На судні застосована дизель-електрична енергетична установка потужністю 11 470 кВт, швидкість судна складала 15,9 вузлів. Усього побудовано п'ять суден цього типу.

1987 р., Японія. Фірма «МНІ» випустила перший двотактний судновий двигун UEC75LS2 за власним проєктом.

1987 р., Англія. Два ГЕД з гребними гвинтами і дев'ять ДГ змінного струму потужністю по 10 600 кВт для забезпечення роботи гребних електродвигунів і загальносуднових потреб застосовані замість паротурбінної установки на лайнері «Queen Elisabeth II», побудованому в 1968 р. на верфі «Vone Brawn». Електричні двигуни

потужністю 44 000 кВт з ГГ діаметром 5,8 м забезпечили судну швидкість ходу до 32,2 вузлів. Унаслідок проведеної модернізації потужність установки зросла на 18 %, швидкість ходу збільшилася на 13 %, питома витрата палива зменшилася на 50 % і складала 172 г/(кВт · год).

1987 р., Україна. Уведено в експлуатацію пасажирське двопалубне СПК «Циклон» водотоннажністю 137 т (Феодосійський завод «Море»), на якому у складі головної енергетичної установки застосований ГТА М-37 максимальною потужністю 5880 кВт (ПТЗ, м. Миколаїв). Швидкість судна складала 42 вузли, пасажиромісткість – 250 осіб.

1988 р., Японія. Головний двигун – дизель UET52/90D фірми «Mitsubibishi» потужністю 4000 кВт, установлений на автомобілевозі «Taiofudsy», за частоти обертання колінчастого вала 185 хв$^{-1}$, через планетарний редуктор одночасно обертає два співвісних ГГ: носовий із частотою 139 хв$^{-1}$, кормовий – 185 хв$^{-1}$.

1989 р., Фінляндія. До складу рушійного комплексу НДС «Академік Іоффе» водотоннажністю 6600 т, побудованого у Фінляндії для колишнього Радянського Союзу, входили два ГРК, гвинторульова колонка «Аквамастер», носовий підрулюючий пристрій та два вітрорушія. Гвинти регульованого кроку приводяться двома дизелями 6ЧН 40/46 потужністю по 2570 кВт, які забезпечують швидкість руху до 15 вузлів. Необхідні маневрені якості судну надають ГРК з електродвигуном потужністю 600 кВт і підрулюючий пристрій з ГГ і електродвигуном потужністю 700 кВт. Два вітрорушії коробчастого типу розмірами 10×8 м використовуються за швидкості вітру 6…16 м/с під час проведення дослідних робіт. Живлення електрообладнання забезпечують два ВГ по 800 кВт і два ДГ по 880 кВт.

1995 р., Голандія. Механічна зубчаста та електрична передачі застосовані у ДЕУ порома «Shulpengate» водотоннажністю 4280 т. Чотири КР (два у носі, два в кормі), установлені на поромі, приводяться кожен двома електричними двигунами, що забезпечило швидкість руху порома до 14,2 вузлів і високі маневрені якості. Живлення електричних двигунів забезпечують чотири ДГ потужністю по 1250 кВт.

1998 р., Фінляндія. Центром дизельних технологій «Wärtsilä Sulzer» створений перший у світі малообертовий двотактний двигун з електронним керуванням.

2000 р., Франція. Круїзний лайнер «Millenium», побудований компанією «Chantiers de l'Atlantique», введено до експлуатації. Він став першим із серії пасажирських суден, на яких застосована нова пропульсивна система, базована на комбінації газової та парової турбін, об'єднаних електричною рушійною установкою (COGES). Два газотурбінні двигуни GE LM2500+ потужністю по 25 МВт приводять електричний генератор, парова турбіна потужністю 9 МВт, яка живиться парою з УК, працює на свій електрогенератор. Особливістю пропульсивного комплексу лайнера стало застосування двох азимутальних рушійно-рульових комплексів потужністю по 19,5 МВт.

2001 р., Франція. Побудовано пасажирський катамаран на повітряній подушці «Anges 200» водотоннажністю 250 т, пасажиромісткістю 450 осіб, основні розміри: довжина складала 51 м, ширина – 13 м, висота борту – 1 м.

Енергетична установка складається із чотирьох дизелів фірми «MTU»: два

дизелі потужністю по 2994 кВт приводять два ВР, два по 736 кВт – два відцентрові повітронагнітачі, які створюють повітряну подушку.

Швидкість під час руху на подушці 45 вузлів, у водотоннажному режимі 15 вузлів. Дальність плавання зі швидкістю 15 вузлів – 1500 миль, 40 вузлів – 370 миль.

2001 р., Японія. Фірма «MHI» випустила перший судновий малообертовий двотактний двигун UEC-LSE з електронною системою керування.

2001 р., Швейцарія. Фірма «Sulzer» увела в експлуатацію перший двигун з електронним керуванням.

2001 р., Південна Корея, Фінляндія. Спільними зусиллями «Hyundai-Sulzer» і «Wärtsilä» виготовлено найпотужніший у світі на той час двотактний десятициліндровий дизель RTA96C потужністю 57 200 кВт.

2002 р., Франція. Побудовано пасажирське судно «Coral Princess», спеціально пристосоване для проходження Панамського каналу. Загальна довжина судна складала 294 м, ширина – 32 м, осадка – 8 м, водотоннажність – 88 000 т, швидкість – 24 вузли, пасажиромісткість – 2850 осіб, чисельність екіпажу – 987 чол.

Енергетична установка – комбінована дизель-газотурбоелектрична – складається з двох дизельних двигунів Wärtsilä 16V46 потужністю по 16 800 кВт та газотурбінного двигуна LM2500 потужністю 25 000 кВт.

2003 р., Німеччина. Виробництво двигунів з електронним керуванням розпочала фірма «MAN B&W».

2003 р., Франція. Здано замовнику побудоване на верфі м. Сент-Назер найбільше у світі круїзне пасажирське судно «Queen Mary II», яке 12 січня 2004 р. здійснило перший рейс. Довжина судна складвла 345 м, ширина – 45 м, осадка – 10 м, водотоннажність – 79 500 т, швидкість – 30 вузлів, пасажиромісткість – 2620 осіб, чисельність екіпажу 1300 чол.

Комбінована дизель-газотурбінна енергетична установка судна потужністю 117 200 кВт складається із чотирьох дизелів Wärtsilä 16V46C потужністю по 16 800 кВт та двох газотурбінних двигунів LM2500 потужністю по 25 000 кВт. Кожен двигун працює на свій електрогенератор.

2003 р., Німеччина. Спущено на воду (верф м. Папенбург) пасажирське п'ятнадцятипалубне судно «Serenade of the Seas» водотоннажністю 90 090 т, довжиною 293 м. На судні застосована комбінована газопаротурбінна установка з електропередачею, до складу якої входять два газотурбінні двигуни LM2500 потужністю по 25 000 кВт і ПТ потужністю 7800 кВт, на яку подається пара з утилізаційного парового котла. Швидкість судна складала 25 вузлів.

2005 р., Японія. Завершені ходові випробування «Super Liner Ogasawara» – швидкісного вантажопасажирського судна з комбінованою дизель-газотурбінною енергетичною установкою, яке поєднало якості катамарана з ВР і скегового СПП. Судно дедвейтом 925 т має швидкість 39 вузлів, може перевозити 350 автомобілів і 725 пасажирів. Два водомети діаметром 2,35 м працюють від двох ГТД LM2500+ потужністю по 25 180 кВт. Вентилятори для утворення подушки працюють від чотирьох дизелів Niigata потужністю по 4000 кВт.

2005 р., Південна Корея. На південнокорейській верфі «Samsung Heavy Industries» побудовано контейнеровоз «MSC Pamela» довжиною 336,7 м і шириною 45,6 м, розрахований на перевезення 9200 TEU зі швидкістю 26 вузлів. До складу

енергетичної установки входить головний двигун – дизель 12 K98 MC-C потужністю 68 520 кВт.

2005 р., Австралія. Побудовано швидкісне судно для перевезення 1350 пасажирів та 340 автомобілів, яке являє собою тримаран довжиною 127 м зі швидкістю 40 вузлів. Головна енергетична установка складається з чотирьох дизелів фірми «MTU» потужністю по 8000 кВт.

2005 р., Південна Корея. Випуском двигуна 10K98MC-C HYUNDAI – MAN B&W потужністю 71 000 кВт досягнена межа у 50 млн к. с. загальної потужності двотактних двигунів, випущених у світі.

2006 р., Фінляндія. Фірма «Wärtsilä NSD» виготовила двотактний двигун з електронним керуванням 14RT-flex 96C агрегатною потужністю 80 000 кВт.

2006 р., Англія. На найбільшому у світі на той час контейнеровозі «Emma Maersk», який перевозить 11 000 TEU, установлено найбільший у світі двигун – 14-циліндровий МОД (102 хв$^{-1}$) Wärtsilä RT-flex96C потужністю 80 000 кВт. Застосовані на судні засоби очищення випускних газів забезпечують емісію NO*x* близько 7…8 г/кВт.

2007 р., Англія. До складу енергетичної установки контейнеровоза «Gudrun Maersk» (класу «Emma Maersk») з головним двигуном Wärtsilä 14RT-flex96C потужністю 80 000 кВт включено паротурбогенератор компанії «Peter Brotherhood» потужністю 8500 кВт, який живиться насиченою парою з утилізаційного котла ГД. Схемою паротурбоелектричної допоміжної установки передбачається додаткове підсумовування потужності від силової газової турбіни, яка працює на відхідних газах ГД.

2007 р., Франція. На верфі «Chantiers de l'Atlantigue» побудовано три судна-газовози типу LNG, які являють собою нову концепцію наливних суден з двопаливною ДЕУ. Перші два з них «Gaselys» та «Provalys» призначені для перевезення 154 500 м^3 газу, а третє – «Gas de France Energy» – 75 000 м^3. Енергетична установка судна «Gas de France Energy» складається із чотирьох шестициліндрових двопаливних двигунів 50DF фірми «Wärtsilä» загальною потужністю 22,8 MW.

2007 р., Фінляндія. Побудовано найбільше у світі на той час круїзне судно «Emerald Princess». Судно має валову місткість 113 000 т, його розміри: довжина складала 288 м, ширина – 36 м, воно має 19 пасажирських палуб, висота судна складає 67 м. У 1539 каютах «Emerald Princess» розташовано 3500 пасажирів, чисельність команди судна складає 1200 осіб. Швидкість судна у 23 вузли забезпечується дизель-електричною енергетичною установкою, до складу якої входять шість дизелів 12ZAV40S фірми «Wärtsilä NSD» потужністю кожен по 14 480 кВт, які працюють на два гвинти.

Судно є модернізованим сестринським стосовно «Crown Princess», «Caribean Princess», «Star Princess».

2007 р., Австралія. Суднобудівним заводом м. Хобарт здано замовнику пором катамаранного типу, розрахований для перевезення 800 пасажирів, 36 трейлерів та 350 автомобілів зі швидкістю 40 вузлів. Довжина порома складала 112,6 м, ширина – 30,5 м. Головна енергетична установка складається із чотирьох COD MAN 20V28/33D потужністю по 9 МВт.

2007 р., У Санкт-Петербурзі, на Балтійському заводі побудовано та здано до експлуатації криголам з АЕУ потужністю 55 000 кВт, яка багато в чому є однотипною з АЕУ криголама «Арктика».

2007 р., Франція. На верфі «Aker Yards» побудовано п'ять вантажно-пасажирських поромів довжиною 50 м з двопаливними, типу GTL (gas-to-liquids), ДЕУ з потужністю головного двигуна 2 х 1,25 МВт. Судна призначені для використання у Північному морі, у зонах SECA. Це перші пасажирські судна, що використовували LNG як паливо.

2007 р. Іспанія. Іспанська компанія «Astilleros Zamakona» передала замовнику – «Maritime Safety Auhtority» (Іспанія) найпотужніший в Європі буксир «DON INDA». Характеристики судна: довжина складала 80,8 м, висота борту – 8,25 м, осадка – 6,8 м, тягове зусилля – 250 т, найбільше серед європейських суден такого типу. Головні двигуни СЕУ: 4 восьмициліндрових двигуни Bergen B32:40 потужністю по 4000 кВт. Кожні два двигуни приводять один гребний гвинт змінного кроку, до носової частини кожного валопроводу приєднується пожежний насос. Ця пропульсивна система забезпечує швидкість 17,6 вузлів. Пропульсивний комплекс судна: два головні гвинта змінного кроку; два кормові підрулюючих пристрої тунельного типу та один носовий підрулюючий пристрій тунельного типу з індивідуальним приводом від допоміжного ДГ потужністю 736 кВт. Конструктивні особливості судна: наявність спеціального танка ємністю 1730 м^3 для водомаслянної / водопаливної суміші, яка відкачується в разі розливу палива або масла з аварійного судна, та наявність спеціального допоміжного буксирного човна довжиною 9 м, з буксирувальним зусиллям 2 т.

2007 р. Нідерланди. Компанія «Merwede Shipiyard» здала замовнику норвезькій компанії «Subsea Vessel Management», трубоукладальне судно «Seven Seas», призначене для укладання труб за J-Ray- технологією. Основу суднової енергетичної установки складають 6 дизельних двигунів компанії «Wartsila» потужністю по 3360 кВт, призначених для забезпечення руху, маневрування, позиціонування та процесів укладання трубопроводу. До спеціалізованого укладального та кранового обладнання відносяться: два 180-тонних натягувача, 113-тонна лебідка, 154-тонний телескопічний (knuckle boom) кран, 400-тонний щогловий кран, 40-тонний телескопічний кран та інше трубоукладальне обладнання. Судно обладнане системою динамічного позиціонування ДР-3, функціонування якої та рух судна забезпечують три кормові рушії потужністю по 2200 кВт, установлені в носовій частині судна.

2007 р. Корея. Південна Корея підписала контракт з компанією «MAN Diesel» до 2011 р. на поставку 10 двигунів 14K98ME-C7 потужністю по 84 280 кВт, призначених для контейнеровозів на 10 000 TEU, які будуються в Кореї.

2007 р. Австралія. Компанія «Austral» передала турецькому замовнику – компанії «Istambul Metropolitan» швидкісний пором OSMAN GAZI-1.

Швидкість порома становить 37,4 вузлів, він перевозить 1200 пасажирів та 225 автомобілів. Розміри судна: довжина складала 87,8 м, ширина – 24 м,осадка – 3,62 м.

На судні застосовані чотири водометні рушії Lips LJ12OE, які приводяться чотирма головними двигунами MTU 20V8000 MHR потужністю по 7200 кВт.

Загальносуднові потреби забезпечуються чотирма дизельгенераторами Leroy Somer HC-4 потужністю по 280 кВт.

2008 р., Данія. Найпотужніший у світі двотактний дизель 12K108ME-C потужністю 83 400 кВт

побудований фірмою «MAN B&W». Двигун виконаний з електронним керуванням подачі палива, роботи вихлопного клапана й подачі циліндрового масла.

2008 р., Індія. На верфі «Bharati Shipyard» розпочато будівництво для Норвегії чотирьох суден типу «Ro-Ro» (довжина судна складала 132,8 м, протяжність вантажної колії – 1150 м) з двигунами внутрішнього згоряння Bergen B35:40V12PG, які працюють на LNG. Це перші контейнерні судна, які використовують газове паливо.

2008 р., Англія. Компанія «Peter Brothehood» підписала контракт на створення у 2009–2010 рр. двох ПТУ, котли яких працюють на газі, потужністю по 27 МВт кожна. Паротурбінна енергетична установка складається з турбіни, конденсатора, змонтованих на загальній рамі. Ці установки, призначені для забезпечення електроенергією судна «Knock Allan» типу FPSO, конвертованого з танкера, будуть установлені на верхній палубі. Судно може взяти до 115 тис. $м^3$ нафти з підводних родовищ і переробити до 2500 $м^3$ нафти.

2008 р., Польща. Компанія «Cegielski-Posnan SA» за ліцензією «MAN Diesel» виготовила перший у Польщі двигун з електронним керуванням 7S60ME-C7, призначений для автомобілевоза на 6600 автомашин, який будується на Гдинській судноверфі.

2008 р., Японія. Спущено на воду побудований компанією «Misui Engineering» рудовоз «Brasil Maru» дедвейтом 327 180 т. Швидкість у 15 вузлів йому забезпечує головний двигун Mitsui-MAN B&W 7S80MC-C потужністю 23 640 кВт.

2008 р. Нідерланди. На заводі «Krimpenyard» здано в експлуатацію багатофункціональне судно «HOS ASCHIEVER». Воно є характерним представником широко поширеної в останні роки групи суден, призначених для забезпечення функціонування бурових установок та інших офшорних споруд, а також виконання глибоководних робіт різної спрямованості. Дизель-електрична установка складається з чотирьох електрогенераторів компанії «Siemens», які приводяться чотирма двигунами MAN 9L27/38 потужністю по 2970 кВт. Вони розташовані у двох машинних відділеннях у носовій частині судна по правому та лівому борту. Потужність, яку вони генерують, призначена для забезпечення руху з маневруванням та позиціонуванням на рівні ДРЗ, а також забезпечення загальносуднових потреб. Ці режими забезпечуються двома головними азимутальними гвинтостерновими комплексами компанії «Wartsila» потужністю по 3000 кВт з ГФК діаметром 2800 мм, двома висувними азимутальними гвинтостерновими комплексами компанії «Wartsila» потужністю по 1200 кВт та двома рушіями компанії «Rolls-Royce Kamewa» потужністю по 1350 кВт. У третьому машинному відділенні розміщенні два дизельгенератори MAN/Siemens, призначені для забезпечення функціонування суднових кранів вантажопідйомністю 70 т та глибоководного крана вантажопідйомністю 3000 т, призначеного для роботи на глибині до 3000 м, глибоководних лебідок та іншого енергетичного обладнання.

2009 р., Норвегія. 1. На судні «Viking Lady», призначеному для обслуговування морських добувних платформ, з метою проведення ходових випробувань установлено допоміжний електрогенератор потужністю 320 кВт на паливних елементах. Електрогенераторний блок виготовлено компанією «MTUOnsite EnergyGmbH»

у рамках проєкту FellowSHIP, який проводиться під егідою класифікаційного товариства «DNV» та компанії «Wärtsilä». Метою проєкту є створення енергетичних блоків на паливних елементах для морського та офшорного застосування. 2. Класифікаційні товариства «DNV» та «GL» видали сертифікат відповідності (Compliance Certificate) скруберній установці компанії «Wärtsilä», призначеній для очищення відхідних газів ДВЗ від оксидів сірки.

2009 р., Німеччина. Компанія «RWO» (Бремен) виготовила установку типу RO (revers osmosis – зворотний осмос) для опріснення морської води продуктивністю 70 т/добу для судна «Girassol» типу FPSO, призначеного для зберігання та переробки 320 тис. т нафти.

2009 р., Японія. Компанія «HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES» («HHI») випуском двотактного суднового двигуна потужністю 93 360 к. с. досягла рівня 90 млн к. с. сумарної потужності МОД, випущених компанією з 1979 р.

2009 р., Німеччина. Компанія «Zeppelin Sky Sails Service» розпочала реалізацію вітрильних пропульсивних систем (Sky Sails propulsion), які запускаються з борту судна. Ці системи, які нагадують гібрид параплана та вітрила, можуть економити до 10 % витрати палива на ходу судна.

2009 р. Всесвітнє відоме Королівське товариство суднобудування Великобританії (RINA), 150 років із дня заснування якого виповнилось у 2009 році, надало перелік 12 найбільш визначних суден та кораблів, створених у XX ст. на світових верфях. Цей перелік, безумовно, надає авторитетне уявлення про досягнення XX ст. у суднобудуванні.

«Mauritania». 1906 р. Перший лайнер, парові турбіни конструкції Парсонса якого забезпечували швидкість ходу 25 вузлів.

«Dreadnought». Паротурбінний корабель зі швидкістю ходу 21 вузол та понад п'ятидесятидюймовими гарматами, побудований у 1906 році на верфях «Portsmouth Dookyard», дав своє ім'я концепції лінійних кораблів.

«Selandia». Побудований у 1912 р. компанією «Burmeister & Wain» вантажний лайнер став першим у світі океанським судном з ДВЗ.

«V&W CLASS Destroyers» з високими мореплавними та бойовими характеристиками.

«Argus». Конвертований з 1918 р. з недобудованого пасажирського лайнера на верфях «Berdmore on the Clyde». «Argus» став першим у світі авіаносцем.

«Princess Victoria». Перший пасажирський пором концепції «Ro-Ro», призначений для перевезення 1400 пасажирів та 80 авто, побудований у 1930 р. компанією «Denny on the Clyde».

«The Liberty Ship». У період з 1941 по 1945 рр. на американських верфях було побудовано 2700 вантажних суден типу «Liberty» з паровою машиною, як головним двигуном, призначеним для перевезень військових вантажів та продовольства для колишнього Радянського Союзу та країн протигітлеровської коаліції.

«Nautilus». Підводний човен «Nautilus», побудований у 1955 р. у США став першим у світі кораблем з АЕУ.

«Idemitsu Maru». Перший танкер типу VLCC водотоннажністю 200 000 т, побудований у 1966 р. японською компанією «Ishicawadzima Hariwa Industries».

«Metane Princess/Progress». Перші газовози типу LNG «Metane Princess, «Metane Progress», побудовані у 1964 р. на суднобудівних верфях Белфасту.

«Encouter Bay». Перший у світі контейнеровоз Bay-класу для перевезення 1300 TEU. Побудований у 1969 р. на верфях компанії «Howaldtsverke».

«The Akor H3 Semi Submertsible». Першою у світі серед напівзанурених бурових платформ стала платформа «Dyvi Alpha» класу Acer H3, побудована у 1974 р. компанією «Trasvik Framnals».

2009 р. Фінляндія. Фінська суднобудівна верф Aker Finnyards передала замовнику – компанії «Royal Caribbean Cruises LTD» перше круїзне судно класу «Oasis» – «Oasis of the seas», яке на цей час стало найбільшим пасажирським судном у світі.

Довжина судна складала 360 м, ширина – 47 м (за ватерлінією), 60,5 м (по крилом навігаційного містка), висота судна – 72 метри (від поверхні води до зріза висушеної труби), осадка – 9,3 м, водотоннажність судна – 225 000 т. Пасажиромісткість – 6880 осіб (максимальна) та 5400 (при двомісному розміщенні). Склад команди та обслуговуючого персоналу складав 2186 осіб.

Судно обладнано шістьма двигунами компанії «Wartsila» – трьома 12V469 потужністю по 13 860 кВт та трьома 16V46D потужністю по 18 480 кВт. Сумарна потужність СЕУ складає 97 020 кВт. На судні застосована єдина електроенергетична система. До складу суднової електростанції, яка забезпечує роботу судна на всіх експлуатаційних режимах входять три головні ЕГ по 21 000 кВА і три – по 15 800 кВА.

Рух судна забезпечують три гвинтостернові колонки із вбудованими гребними електродвигунами ABB Azipod, 20 МВт, які обертаються на 360° і створюють упор у будь-якому напрямку. Гвинт фіксованого кроку – 6,1 м. Маневрені режими забезпечують 4 НПП з гвинтами діаметром 3 м і загальною потужністю 20 МВт, завдяки яким судно може розгортатися на місці. Швидкість судна – 2760 вузлів. Воно обладнане телескопічними вихлопними трубами, які можуть зменшувати висоту на 7 м у разі необхідності проходу під мостом.

Круїзні судна класу «Oasis» – це якісно нові судна, які забезпечують втілення сучасних світових концепцій енергозбереження та захисту навколишнього середовища і той же час надають своїм пасажирам усі, які тільки можна уявити, умови для повноцінного відпочинку.

2010 р., Швеція. Компанія «Alfa laval» представила нову концепцію знищення викидів, названу як «Pure Dry». В основу концепції покладено застосування високошвидкісного сепаратора з можливістю багатократного очищення палива від сторонніх вкраплень. Реалізується концепція за допомогою створеного компанією інноваційного сепаратора, який відділяє паливну фракцію з танку паливоутримуючих вод з утворенням шлаку у вигляді сухого залишку. Система поновлення паливних відходів WFR (Waste Fuel Recovery) надає можливість збереження біля 2 % відходів палива під час сепарації.

Основою системи є два танки маслопаливних відходів – один для змащувальних масел (LO), другий для палива (FO). Танк з відходами палива містить 20–30 % палива, 70–80 % води та 1 % рідкої суспензії.

The Pure Dry сепаратор поновлює паливо з води забрудненої паливом з FO танка та повертає паливо у бункерний танк для звичайного використання. Результатом є повернення близько 2 % загальної витрати палива, процес обробки забруднених відходів завершується отриманням

5–15 кг/день суперсухих відходів. Вода, отримана під час сепарації з умістом палива менше 1000 ppm подається у трюмну систему.

2012 р., Данія. Датська компанія «Lauritzen Bulkare» застосувала концепцію «slow streaming» для зниження викидів до атмосфери зі своїх суден. Суть цієї концепції полягає в тому, що примусове зниження швидкості вантажних суден дозволяє знизити витрати палива та рівень викидів CO_2. Компанія заявила, що, знизивши швидкість своїх балкерів «Hadysize» та «Capesize» у баласті та при повному завантаженні до 14,0 вузлів, вони досягли зниження витрат палива на 10 %, що становить за час рейсу 1500$ (Handysize) та 4300$ (Capesize) за день та приблизно 10 % зниження викидів CO_2, 7 та 19 т відповідно. «Коли вартість бункеру така висока, кожний крок до зниження вартості перевезень виправданий», – заявили представники компанії.

2014 р., Південна Корея. Бурове судно «Deepwater Asgard» побудоване у 2014 р. у Південній Кореї на верфі компанії «Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering» (DSME). Судно обладнано системою динамічного позиціонування найвищого третього класу ДР-3, розраховано на навантаження у 1000 т при бурінні на глибині свердловини 12 000 м. Судно оснащено противикидними превенторами, розрахованими на пластовий тиск у 103 МПа.

«Deepwater Asgard» оснащено шістьма дизельними двигунами HHI-EMD 14H32/4DV з потужністю по 7000 кВт, воно має 6 азімутальних підрулюючих пристроїв потужністю по 5500 кВт, які забезпечують необхідні умови для позиціонування судна.

2014 р., Південна Корея. Уведено в експлуатацію унікальне трубокладальне судно «Pieter Shelte» з 2015 р. назва «Pionering Spirit». Судно призначене для монтажу, демонтажу і перевезення морських бурових платформ, а також для прокладання підводних трубопроводів діаметром від 2 до 68 дюймів. Довжина судна складає 477 м, ширина – 124 м, висота – 30 м, осадка – 27 м, водотоннажність – 900 000 т. СЕУ – дизель-електрична. Головні двигуни: MAN Diesel & Turbo 8x20V32/44 CR, 1x9L 32/44 CR сумарною потужністю 4460 кВт. Рушії 12 азімутальних гвинтостернових комплексів, швидкість судна складає 14 вузлів, екіпаж – 571 особа.

2015 р., Нідерланди. Трубоукладальне «Ceon Amazon» побудовано на верфі «Lloyd Werft» та введено до дії у 2015 р. Судно здатне проводити укладання жорстких та гнучких труб за технологією S-lay на глибинах до 3000 м. Для здійснення цих процесів судно оснащено двома кранами вантажопідйомністю до 400 т кожний, які можуть працювати у тандемі. Суднові приміщення розраховані на розташування 5500 т гнучких труб або 8500 т жорстких труб. Розвинена площа палуб судна складає біля 4600 м^2, дає можливість працювати без допомоги інших суден. «Ceon Amazon» може проводити трубоукладальні операції під час загального хвилювання на морі та шквальних вітрах. Наявне на борту обладнання дозволяє знищити ефект руху судна, компенсувати рух судна для забезпечення точності трубоукладальних робіт. Обладнання для укладання гнучких труб розташоване в кормовій частині судна. У середній частині судна, подібно до бурового судна, розташований шахтний колодязь розміром 7,9 м х 13,41 м та трубоукладальна башта, призначениа для укладання жорстких труб. Судно обладнане єдиною

електроенергетичною установкою, яка складається з двох двигунів MAN Diesel & Turbo 9L32/44CR потужністю по 5040 кВт та по 4480 кВт.

Забезпечення судна парою здійснює паровий котел Alfal laval / Aalborg типу V4-TF0-015 тепловою потужністю 1400 кВт.

Особлива увага на судні надана забезпеченню високого рівня динамічного позиціонування та сталості руху, який підтримується трьома кормовими пристроями Steerprop Azimuth потужністю по 3500 кВт та чотирма НПП висувного типу: один потужністю 1800 кВт та трьома НПП потужністю по 2400 кВт.

2015 р., Китай. «Ineos Insight» – перший у світі багатоцільовий газовий танкер з трипаливним середньообертовим двигуном, здатним працювати на нафтовому паливі. На ЗПГ та етані – це перше судно з двигуном на етані. Судно побудовано у 2015 р. китайською компанією «Nantong Sinopacific Offshore & Engineering».

Дедвейт складає 220 920 т, довжина – 180 м, ширина – 26,6 м, осадка – 9,4 м, швидкість – 16 вузлів. Важливою особливістю судна є його енергетична установка, яка складається з двох багатопаливних двигунів Wartsila 50DF потужністю по 5,85 МВт. Зменшення споживання нафтопродуктів дозволяє суттєво скоротити викиди шкідливих речовин – смолу сірки, оксидів азоту, діоксиду вуглецю.

2015 р., США. У 2014 р. спущено на воду компанією «Easten Shipbuilding Group» багатофункціональне судно забезпечення офшорних суден «Harvey Stone». Його основним призначенням є забезпечення офшорних терміналів FP30 компанії «Shell Stones»: швартування човникових танкерів DW 46 287 т, забезпечення вантажних робіт картування та ескортні послуги в разі аварійного стану цих танкерів.

Гібридна пропульсивна установка забезпечує економічний рух (eco-transit – 8–9 вузлів), отримання судна у заданій точці на одному двигуні, забезпечення руху за допомогою механічних або електричних приводів або НПП. Гібридна система облаштована двойним виходом (PTO/PTI) – на привід валопроводу з одного боку та на мотор / генератор з другого.

Судно може функціонувати у наступних режимах:

– звичайний рух / транзит. Обидва ГД обертають два ГГ. Один валогенератор обертає електричний двигун;

– режим ДР2. Один ГД обертає один Г; валогенератор подає потужність на НПП;

– гібридний (транзит та утримання судна у заданій точці). Один ГД обертає два гвинта (один механічною, другий електричною енергією) та вал M/G редуктора;

– гасіння пожежі. Один ГД обертає гребний гвинт, обидві валові лінії обертаються, муфта пожежного насосу підключається до валопроводу. Валогенератор видає електричну енергію.

Головний двигун GE12V250 MDC 2 × 3495 кВт. Валогенератор / двигун – Make Marelli – 2 × 1000 кВт.

ДЕГ – Cummins Q9K19 – 2 × 350 кВт.

АДГ – Cummins QSR 1 × 120 кВт.

Головні гвинти – два ГСК Shottel Ø 3400 мм.

НПП – Shottel 8ТГ2-2 × 610 кВт.

2015 р., IMO затвердила попередню редакцію IGF Code (Code of Safety for Ships using Gases or Low-flashpoint Fuels) – Кодексу безпеки для суден, що використовують газоподібні або інші палива з низькою температурою спалаху. Кодекс вступає в дію 1 січня 2017 р.

2015 р., Південна Корея. Hyundai Heavy Industries (HHI) розробили перші у світі ЗПГ – газовоз місткістю 174 000 м^3 з газотурбинною пропульсивною установкою разом із GE Aviation & Marine. В основі лежить розроблена GE комбінована газопаротурбіна електроенергетична установка (COGES 2.0).

2016 р., США. Компанією «Easten Shipbuilding Group» побудовано багатофункціональне судно «HARVEY STONE». Основним призначенням судна є забезпечення функціонування суден FPSO як офшорних терміналів: забезпечення швартування, прийому вантажу, від швартування та буксирування човникових танкерів (типу Shuttle) дедвейтом 46 280 т обо інших суден, носова частина яких має відповідну форму для пришвартування до FPSO.

Гібридна пропульсивна система забезпечує економічний рух (на швидкості 8–9 вузлів) та утримання у заданому положенні одним двигуном, застосовуючи механічний або електричний привід, або носовий підрулюючий пристрій.

Загальні характеристики судна: довжина складає 64,8 м, ширина – 18 м, осадка – 7,8 м, водотоннажність – 3750 т, швидкість ходу (максимальна) – 14 вузлів.

Склад СЕУ: головні двигуни: 2xGE 12V250 MDS по 3495 кВ, два валогенератоти потужністю по 1800 кВт, допоміжний ДГ 2х Cumming QSK19 потужністю по 360 кВт, АДГ Cumming QSB7 потужністю 120 кВт.

Пропульсивний комплекс: два кормові азімутальні комплекси 4:2x8 Shottel SRP 3030 CP; носовий ПГ: 2x8 Shottle STT2 x 610 кВт.

2016 р., США. Пожежне судно «Protector» побудовано у 2016 р. компанією «Foss Shipyard». Це приклад сучасного пожежного судна. Воно обладнане пристроями та засобами хімічного, біологічного, радіологічного та ядерного (CBRN) захисту, у тому числі цитаделлю зі спеціалізованими фільтрами, душовими для видалення забруднення та хімічними детекторами.

Під час гасіння пожежі судно здатне подавати за допомогою насосного оснащення у складі 7 насосів 186 т/хв води. Поряд із цим, для гасіння пожежі у наземних берегових об'єктах розташовані по бокам судна чотиридюймові пожежні стволи, здатні подавати 136,4 т/хв води.

Головний двигун: 2 двигуна Caterpillar 35/2 з потужністю по 1500 кВт, допоміжні дизельгенератори, 2 двигуна Caterpillar c.7.2 потужністю по 150 кВт.

2015 р., Нідерланди. Вантажопасажирський пором «Stena Germanica» модернізований для роботи на метанолі.

Судно «Stena Germanica» довжиною 240 м, шириною 29 м, з осадкою 6,1 м, побудовано у 2000 році в Іспанії, водотоннажність судна складає 51 830 т, швидкість – 21,5 вузлів.

Як головні двигуни на судні застосовані двигуни компанії «Wartsila»: 4x6ZAL40S потужністю по 3600 кВт. Пропульсивний комплекс судна: 2 ГРК та 3 НПП.

«Stena Germanica» – перше морське судно, двигуни якого переобладнані для роботи на метанолі. Модернізація судна проведена на верфі у Польщі. Застосування для роботи двигунів суміші з 95 % метанолу дозволило знизити емісію SO_x на 99 %, NO_x на 60 % та 5 % MDD, діоксид вуглецю на 25 %, сажі на 95 %.

2016 р., Японія. Компанія «Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. Ltd (MES)» розробила перший у світі малообертовий двотактний дизельний двигун ME-GIE, що працює на

етані. Трипаливний двигун розроблено спеціально для встановлення на етановозі місткістю 3600 м^2.

2016 р., Південна Корея. На верфі компанії «Hyundai» Міро у м. Ульсані для норвезької компанії «Westfal-Larsen» побудоване спеціально спроєктоване для перевезення метанолу із заводів у Тринідаді, Єгипті, Луїзіані та Нової Зеландії судно «Lindanger», двигун якого використовує метанол як паливо. Судно стало першим із семи побудованих за проєктом ініційованим найбільшим у світі виробником метанолу – компанією «Methanex». За класифікацією цей хімічний танкер – метановоз, продуктовоз, має довжину 186 м, ширину – 32 м, осадку – 12,9 м, водотоннажність – 49 999 т, швидкість – 15,8 вузлів.

Як головний застосований двопаливний (метанол / нафтопродукти) двигун MAN / Hyundai B&W 6G50ME-9 потужністю 10,3 МВт. Використання метанолу, за твердженням виробників, дозволяє зменшити викиди сполук сірки 95 %, оксидів азоту на 3 %. Протягом двох місяців після хімовозу «Lindanger» введені в експлуатацію, споруджені за цим проєктом, ще два судна – «Mari Jone» та «Taranaki Sun».

2016 р., Південна Корея. Танкер «Lisboa» 157 000 т, призначений для перевезення до споживачів нафти та нафтопродуктів із плавучих зберігачів вуглеводневої сировини, які розташовуються у відкритому океані біля нафтових родовищ. Рівень динамічного позиціонування ДР-2. Вантажні насоси судна мають паротурбінний привід (2 насоси) та електричний привід (1 насос).

Головний двигун HWI MAN B&W 6S70ME-C85 потужністю 15 200 кВт.

ДЕС: 2хННІ: 7Н32/40 – по 3500 квт; 2хННШ 9Н32/40 по 450 кВт. ДКУ: 2КК Alfa Laval паропродуктивністю ДК 27 000 кг/год / УК –1400 кг/год.

Судно обладнано розвиненим пропульствним комплексом: ГРК діаметром 8,3 м, НПП: 1 Azimuth потужністю 2500 кВт, два тунельні по 2200 кВт; КПП -2ПП тунельного типу по 2200 кВт.

2017 р., Японія. Класифікаційне товариство Class NK розробило детальне керівництво, щодо безпечного конструювання та експлуатації газовозів для перевезення рідкого водню. Керівництво створено на базі рекомендацій IMO і є першим кроком до використання водню як суднового палива.

2017 р., Південна Корея. Побудований та зданий замовнику криголам «Cristophe de Margerie», одне з 15 суден за програмою «LNG Yomal progect». Судно відповідає класу Arc 7, найвищому льодовому класу транспортних суден. Воно може автономно пересуватися за товщини криги у 2,1 м. Потужність енергетичної установки складає 45 МВт, що практично відповідає потужності в сучасних криголамів з АЕУ. Характеристики судна: довжина (найбільша) складає 299 м, ширина – 50 м, висота (до вузької палуби) – 26,5 м, осадка проєктов – 11,7 м, водотоннажність – 126 700 тонн, дедвейт – 98 000 т, швидкість – 19 вузлів на чистій воді. Тип СЕУ: єдина електроенергетична установка. Комплектація СЕУ: ГД:4х12V50DF потужністю по 11 700 кВт, 29L50DF потужністю по 8775 кВт, потужність головних електрогенераторів 4х 11 250 кВт, 2х8450 кВт.

ДКУ: 2ДК Alfa laval Aalborg паропродуктивністю по 36 т/год за тиску пари 0,7 МПа, 2 термомасляних котли системи опалення Alfa laval industries (Busan) потужністю по 5500 кВт кожний. Пропульсивний

комплекс: 3 азімутальних ГСК типу Azipod.

2017 р., Південна Корея. Контейнеровоз «Mol Triumph» побудований для компанії «Mitsui». Судно призначено для перевезення 20 146 TEU. Для підвищення енергоефективності в конструкції судна застосовано:

оптимізована форма корпусу, що дозволяє знизити опір руху судна;

застосування високоефективних форм грибного гвинта та стерна. У цьому комплексі застосована система SAVER Statoz, яка генерує циркуляційні потоки, які спрямовані у напрямку, зворотному напрямку обертання гвинта.

Ці проєктні рішення дозволили судну «Mall Triumph» досягти показників витрат палива і відповідно викидів CO_2 на 20 % нижче, порівняно з (M000TEU) контейнеровозами.

Вантажні судна мають паротурбінний привід – 2 насоси з паровою турбіною компанії «Shinno» та електричний привід – 1 насос.

Характеристики судна: довжина (найбільша) складає 400 м, ширина – 58,8 м, висота (до верхньої палуби) – 32,8 м, осадка – 16 м, повна водотоннажність – 210 600 т, швидкість – 22,5 вузлів.

Головний двигун 1xMAN Diesel & Turbo 11 695ME-C95 потужністю 59 250 кВт. ДСЕС: 4x Nishishiba/ NTAKN потужністю по 4300 кВт. ДКУ: Kangrim x 5000 кг/год, УК: 1K Kangrim x4000 кг/год.

Пропульсивний комплккс: ГФК діаметром 10 400 мм, НПП: 2x2500 кВт.

2017 р., Фінляндія. Круїзний пором «Viking Grace» Обладнаний роторним вітрилом 24 м у висоту та 4 м у діаметрі.

«Viking Grace» круїзний пасажирський автомобільний пором місткістю 2800 пасажирів, який першим на Балтиці використовує ЗПГ, побудований у 2013 р. у Фінляндії. Водотоннажність судна складає 57 600 т, довжина – 218 м, ширина – 31,8 м, осадка – 6,8 м, швидкість – 22 вузли. Головні двопаливні двигуни: 4xWartsila 8L50DF потужністю по 7600 кВт. Використання ЗПГ як палива дозволяє мінімізувати шкідливі викиди: включаючи викиди оксиду сірки та сажі в навколишнє середовище, зменшити викиди оксида азоту на 90 %, діоксиду вуглецю на 20 %.

За прогнозами та оцінками фахівців застосування роторних вітрил та ЗПГ, як палива дозволить зменшити річні витрати вуглецю на 900 т.

2017 р., Японія. Автомобільно-пасажирський пором «Sunflower Furano» призначено для перевезення 590 пасажирів, 160 трейлерів та 100 пасажирських авто зі швидкістю 64 вузли. Судно має високі експлуатаційні характеристики ефективності завдяки оптимізованій формі корпусу та застосуванню енергоощадних технологій, таких як гвинти, що обертаються у протилежних напрямках. Судно обладнано гибридною пропульсивною установкою, яка приводить гвинти, що обертаються у протилежному напрямку (ГОПН) від головних двигунів, або від електричних двигунів.

За звичайного руху (ГОПН) проводяться від двох головних двигунів, які мають низьку питому витрату палива. Під час маневрування ГОПН приводяться двома електричними двигунами і бортові підрулюючі пристрої живляться від валогенераторів, які встановлені на двох головних двигунах. Гібридна пропульсивна установка для автомобільно-пасажирських поромів, для яких пріоритетними є не тільки режими руху, але й операції маневрування у портах.

Головні характеристики судна: довжина складає 199,7 м, ширина – 27,2 м, висота – 14,6 м, осадка – 6,85 м, дедвейт – 6964 т. Головні двигуни: SEMT-Pielstick 14PC2.68 2x10 500 кВт, оснащений двома генераторами.

Пропульсивный комплекс: 2 головні гребні гвинти ГФР з лопостями, що обертаються у зворотному напрямку, 2 НПК КНІ (з лівого борту), 2НПК (з правого борту).

2017 р., Китай. Судно «Guang Zhou Wan» призначено для перевезення бітуму (максимальна температура вантажу 200 °С та продуктивність переробки нафти (температура спалаху < 60 °С) у чотирьох незалежних вантажних блоках.

Кожен блок складається з двох вантажних трюмів. Судно виконано з двойним корпусом, у просторі між якими відбувається нагрівання вантажу за допомогою двох незалежних нагрівачів, розташованих у середині вантажних танків. Температура вантажу фіксується індивідуально. Висока ефективність судна підтверджується значенням показника EEDI, яке відповідає другому етапу вимог IMO. Поряд з цим, водяне змащення валопроводу радикально знижує ймовірність забруднення водного середовища витоками змащувального мастила. Характеристики судна: довжина (найбільша) складає 145,9 м, ширина – 11,8 м, осадка – 7,9 м, водотоннажність – 19 800 т. Головний двигун MAN B&W 6S40ME-B9.5 потужністю 4330 кВт. ДЕС: 3xWartsila Qiyao Diesel Company 645W4L20 потужністю по 680 кВт. Допоміжна котельна установка складається з 5 термомасляних котлів: 2xRMS8/27, 1xEXV5-40-60-57 800DD та 2xEXV3-25-29-33, тестовою потужністю, відповідно по 2000, 550 та 1400 кВт. Пропульсивний комплекс: ГФК діаметром 5,2 м, НПП Shotten потужністю 550 кВт.

Китай. Проєкт ЗПГ-газовозу на 30 000 м^3, розроблений GTT та Dalian Shipbuilding Industry Co., з проточною балатною системою (без баластних танків – ballast – free – був схвалений Lloyd's Register.

2018 р., Німеччина. «MAN Energy Solutions» розробла модель двотактного дизельного двигуна MAN B&W ME-LGIP, що може працювати на зрідженому вуглеводневому газі – пропані. Новий двигун був продемонстрований 3 вересня 2018 р. на презентації в Копенгагені. Стендові випробування показали, що двигун MAN B&W ME-LGIP має 18 % зниження викидів CO_2 і 90 % викидів твердих частинок, порівняно з роботою на важкому дизельному паливі.

Південна Корея. За станом на 2019 р. контейнеровоз «MSC GUlCUN» став найбільшим у світі судном з перевезення контейнерів – 23 756TEU: 13 968 на палубі та 9788 у трюмах, 2024 контейнери рефрижераторного типу. Він є першим представником нового класу з 11 суден які будуть побудовані у 2019–2021 рр.

Усунення ризику пожежі досягається застосуванням двобашенної системи з високопродуктивними насосами.

Новий клас суден за технічним оснащенням повністю відповідає стандартам ефективності, стабільності та безпеки, які передбачаються рівнем 3 EEDI. У подальшому планується виконати роботи з модернізації носової частини судна, що дозволить зменшити опір корпусу під час руху судна.

Головний двигун MAN B&W 11G-95ME-C9.5 з можливістю подальшої конверсії для роботи на ЗПГ.

Головний двигун потужністю 66 650 кВт за допомогою ГФК

діаметром 10,4 м за частоти обертання 80 хв$^{-1}$ Забезпечує швидкість судна у 23,3 вузлів. Для маневрування судна передбачено 2НППХ 3000 кВт.

Суднова електростанція: 3xSTX-MAN 9L32/40 і 2XSTC MAN-6L32/1D; (3x5400+2x3500) кВт. ДКУ: ДК Kangrim, 5 т/год.

Машинне відділення судна має кормове розташування.

Показники енергоефективності судна: реальний – 7454 гCO_2/TM; розрахунковий рекомендований – 13,132 гCO_2/TM.

Енергоощадні технології, застосовані під час створення судна: FIN, SAVER Gap protector, SARB, Vanable speed countrol for main cooling sea water pump and engine zoom supply, fan, intelliman ship, VFD.

2018 р., Данія. Датський оператор «Nordern» заявив про підтримку Датської асоціації судновласників (DSA), яка запланувала знизити емісію CO_2 із суден на 25 % з 2007 р. до 2020 р. Використовується индексатор енергоефективності IMO Energy Efficiency Operator (EEOI). Вона забезпечила зниження емісії CO_2 для чартерних суховантажних суден на 3 % та на 14 % для вантажних суден.

2019 р., Південна Корея. «Nissos Rhenia» – судно із серії дедвейтом 319 000 т. 8 танкерів для перевезення сирої нафти, побудованих на верфі Hyundai Heavy industry у м. Ульсан.

Довжина судна складає 333 м, ширина – 60 м, осадка – 22,6 м, Нафта перевозиться у 15 танках по п'ять з кожного борту та посередині судна, на танкері також передбачено два відстійні танки. Вантажні операції забезпечують 3 вантажні насоси продуктивністю 5000 м^3/год. Функціонування власної системи здійснюється трьома власними насосами продуктивністю 3000 м^3/год.

«Nissos Rhenia» оснащений головним двигуном Hyundai WINGD X82-B потужністю 33 250 кВт при 84 хв$^{-1}$ (24 500 кВт при 66 хв$^{-1}$).

Рух судна забезпечує ГФК діаметром 11,2 м, забезпечуючи сервісну швидкість 11,2 вузлів та щоденну витрату 83 т HFO. Максимальна швидкість «Nissos Rhenia» складає 14 вузлів.

Для виконання вимог IMO 2020 р. судно оснащено скруббером. «Nissos Rhenia» – перше судно, оснащене системою SCR для зниження оксидів азоту та скрубберами для зниження викидів оксидів сірки ще на стадії будівництва. SCR система забезпечує вимоги IMO Ties III на головному двигуні (система високого тиску) та на трьох допоміжних дизель-генераторах (система низького тиску). Скрубберна система Alfa laval Pure S установлена на ГД, ДЕГ, ДК.

2019 р., Німеччина. Судно «Spirit of Discovery» вантажомісткістю 58 120 т було побудовано як круїзне судно на 999 пасажирів. Рівень облаштування судна дозволив власнику позиціонувати його як найбільш комфортабельне. Одним із прикладів цього є те, що вікна всіх кают виходять у зовнішні боки судна, кожна з них облаштована власним балконом. незважаючи на те, що «Spirit of Discovery» має фінсько-шведський льодовий клас 1С з можливістю працювати у високих широтах, розпочинаючи з 2020 р. Круїзна програма судна буде включати в себе вояж до Гренландії, плавання в її холодних водах та повернення у пункт базування. Цікаво, що круїзний менеджмент повернувся до цієї високоширотної програми через 10 років після її скасування. У питаннях захисту навколишнього середовища на судні реалізований пакет енергоощадних технологій, які дозволили досягти значення EEDI на рівні 10,158 г CO_2/TM

порівняно зі значеннями EEDI відповідно до існуючих вимог IMO-15 871 г CO_2/TM .

До таких технологій відносяться використання складної теплоти двигунів, LED- освітлення, очищення у скруббері відхідних газів від сірчастих газів, від сірчастих сполук тощо.

Як і на більшості круїзних суднах пропульсивна установка – дизель-електрична установка потужністю 21 600 кВт, яка покриває всі пропульсивні та загальносуднові енергетичні потреби.

Рух судна забезпечують дві рушійно-стернові азімутальні комплекси SISHIP SiPOD 10M потужністю по 6500 кВт з ГФК. Режими маневрування здійснюють 2 НПП компанії «Brunvol» потужністю по 2200 кВт.

2019 р., Норвегія. Норвезька інженерна компанія «Moss Maritime» у співробітництві з класифікаційним товариством «DNV GL» розробила концептуальний проєкт судна-бункерувальника зі скрапленим воднем.

2019 р., «Wartsila» анонсувала запуск нової моделі газового чотиритактного двигуна 31SG у морському виконанні, що працює лише на газоподібному паливі без необхідності запального рідкого палива. Новий двигун призначений для морських плавучих об'єктів. Проєкт базується на платформі «Wartsila 1» версія суднового двигуна на дизельному паливі була занесена у книгу рекордів Гіннеса як найперспективніший у світі чотиритактний дизельний двигун. Двигун Wartsila 31SG дозволяє знизити загальну вартість експлуатації та шкідливий вплив на навколишнє середовище суден, які працюють у регіонах з розвиненою газовою інфраструктурою.

Компанія отримала перше замовлення на цю модель двигуна ще в березні 2018 р., коли компанія Hanjin Heavy industries оприлюднила свої наміри стосовно будівництва двох супервеликих газовозів на замовлення бельгійського перевізника газу EXMAR. Судна місткістю 80 тис. $м^3$ будуть оснащені двигуном серії B&W 6G 60ME-L,Gip Mk 9.5. Зріджений нафтовий газ вибраний як паливо для газовозів класу VLGC, щоб відповідно до нових стандартів IMO по рівню сірки, які вступають у силу у 2020 році. Постачання двигунів заплановано на грудень 2019 р.

2019 р., Франція. «Bureau Veritas» (BV) випустило нові Правила класифікації для сучасних суден з вітрилами. Вони охоплюють судна з головними тепловими двигунами та вітрилами різних типів.

2019 р., Судноплавна компанія «Kawasaki Kisen Kaiska LTD» (K-Line) планує обладнати одне із своїх суден компактною демонстраційною установкою для уловлювання діоксиду вуглецю з відхідних газів суднових двигунів і котлів і буде проводити спільно з компанією «Mitsubishi Shipbuilding CO. LTD» та класифікаційним товариством «Nippon Kaiji Kyokai» (Klays NK) дослідження та випробування з метою створення компактної суднової установки. Концепція установки з уловленням частини викидів діоксиду вуглецю судна грунтується на береговій установці, яка успішно експлуатується. в межах даного проєкту. Перевірятимуть не тільки ефективність уловлювання та зберігання діоксиду вуглецю, але функціональність і безпечність таких установок для використання на морських суднах. Суднобудівна компанія «Mitsubishi Shipbuilding» приєднається до розробки та будівництва такої малогабаритної демонстраційної установки й усередині 2021 р. планує розпочати

її експериментальну експлуатацію на заводському стенді, після чого вона буде встановлена на вуглевозі «Corona Utility» зі складу флоту K-Line, який перевозить енергетичне вугілля. На кінець 2021 р. заплановано початок експлуатації демонстраційної установки в морських умовах.

Данія. У Данії створено консорціум для розробки двотактного двигуна на аміачному паливі. Планується створити цілісну систему енергетичної установки морського судна, яка буде працювати на альтернативному паливі.

Головним учасником консорціуму планується компанія «MAN Energy Solutions». До співпраці залучена і компанія «Eltronic Fueltech», відомі як постачальники паливних систем, технічний університет Данії та класифікаційне товариство «DNV GL». Закінчення робіт по створенню аміачного двигуна заплановане на 2024 р.

2021 р., Японія. Японський судновласник «Mitsui O. S.K. Lines (MOI)» спільно з компаніями «Namura Shipbuilding Co.» та «Mitsubishi Shipbuilding Co.» оголосили про початок спільної розробки великогабаритного екологічного судна для перевезення аміаку, що працюватиме на аміачному паливі.

Двигун, що використовуватиме аміак як основне паливо, буде мати значно менший рівень викидів парникових газів на суднах перевізника.

Аміак, який позиціонується як важливий компонент досягнення вуглецевої нейтральності має великі перспективи, як альтернативне паливо. За прогнозами, до 2030 р. річна потреба Японії у цьому паливі становитиме 3 млн т, до 2050 р. – 30 млн т.

2021 р., Китай. Перший у світі гібридний автомобілевоз «Auto Advance» взяла в експлуатацію норвезька компанія «United European Car Carriers» (UECC).

Довжина судна складає 169 м, ширина – 28 м, місткість – 3600 автомобілів, кількість вантажних палуб – 10. Судно здатне працювати як на ЗПГ, так і з використанням акумуляторної установки.

Це перший з трьох гібридних автомобілевозів, який UECC замовила у китайської верфі «Jiangnan Shipyard». Завдяки такому рішенню компанія «UECC» планує знизити викиди CO_2 до 2030 р. на 40 %. Уведення до дії інших суден заплановане на 2022 р.

2021 р., Японія. «Kawasaki Shipbuilding Corporation» розробила та побудувала перший у світі LH2- танкер «Suiso Frontier» («suiso» – «водень» японською мовою). судно спущено на воду у 2020 р. Перша партія зрідженого водню з Австралії повинна прийти в Японію навесні 2022 р. Усього «Kawasaki» планує побудувати 80 LH2-танкерів для перевезення 9 млн т зрідженого водню.

Судно призначено для транспортування морем на значні відстані зрідженого до 1/800 почасткового об'єму водню, охолодженого до –253 °С. Це стало можливим завдяки новому вантажному танку об'ємом 1250 м^3, з двойною оболонкою, між стінками якої підтримується вакуум. Танк створено на базі технологій, призначених для зберігання рідкого ракетного палива.

Довжина судна складає 116 м, ширина – 19 м, осадка – 4,5 м, дедвейт – 9000 т. Місткість вантажного танку становить 1250 м^3, вантажопідйомність – 75 т зрідженого H_2 за температури –253 °С.

Склад СЕУ: головні двигуни: 3xDaihatsu DE-23 по 1320 кВт; ДЕС: два ДДГ потужністю по 1360 кВт. Швидкість судна становить 13 вузлів.

2021 р., Швеція. Суднобудівна компанія «Candela» розробила проєкт

електричного порома Р-30 на підводних крилах, який стане найбільшим електричним судном у світі.

Пором довжиною 12 м зможе перевозити до 30 пасажирів і буде приводитись до руху двома електричними двигунами потужністю по 60 кВт.

Максимальна швидкість порома становитиме близько 30 вузлів, літієва батарея у 180 кВт забезпечить більше 60 миль без підзаряджання. Ходові випробування Р-30 заплановані на 2022 р., початок комерційної експлуатації на 2023 р.

У компанії «Candela» заявили: «Наша иета – довести, що наші електричні пороми на підводних крилах набагато дешевші, зручніші та універсальніші за звичайні судна. Це не просто альтернатива іншим суднам, це принципово інший підхід до громадського транспорту».

2021 р., Норвегія. У норвезькому місті Тронхейм у 2022 р. планують запустити безпілотний електричний пором «Zeabuz» з нульовим рівнем викидів у навколишнє середовище. Пором буде курсувати через канал міста Тронхейм, який розділяє порт і центр міста та подібно ліфту. На кожній стороні канала пасажири зможуть натиснути кнопку, щоб визвати пором. Пором «Zeabuz» вміщує 12 пасажирів та велосипеди, він долає канал за 60 с, надаючи пасажирам економію 15 хв ходьби. Поки пором чекає на причалі, він заряджається.

Розробники автономного порома – науковці з норвезького університету науки і технологій. Його будівництво буде здійснювати спеціально створена компанія «Zeabuz». Пором «Zeabuz» буде мати низькі експлуатаційні витрати, що дозволить зробити поїздку на ньому безкоштовною. Подібні електричні безпілотні плавучі засоби здатні скоротити трафік у великих містах, поліпшити якість повітря, знизити рівень шумового забруднення.

2021р., Південна Корея. Уведено в експлуатацію 325 000-тонний рудовоз «Zea Saushan», перше у світі великовантажне судно обладнане п'ятьма роторними вітрилами «Norsepower» висотою 30 м та діаметром 4 м.

Використання цих роторних вітрильних систем дозволило на 8 % підвищити енергетичну ефективність судна та зекономити близько 900 т палива щорічно, що еквівалентно зменшило емісії CO_2 близько 2000 т за рік. Ротори, розміщені між вантажними люками судна, можуть повністю укладатися на палубу за допомогою гідравлічних систем.

Роторні вітрила Horsepower Rotor Sails – NPRS є модернізованою версією роторів Флеттнера. Ця технологія базується на використанні ефекта Магнуса. Використання вітрила Norsepower більш ефективна ніж застосування традиційних вітрил, тому що вони створюють більше тягове зусилля за набагато менших потреб у площі для їх розміщення, для керування ними не потрібно залучення зусиль багатьох членів екіпажу, вони керуються безпосередньо зі сходового містка. Оптимальна кількість та розміри вітрил Norsepower визначається розміром швидкістю та експлуатаційними операціями судна.

NPRS виготовляються у п'яти модифікаціях з довжиною роторів 18, 24, 28, 30 та 35 м. Складовими частинами підвітрильної системи є:

власне роторні вітрила NPRS, які створюють необхідне тягове зусилля.

Панель управління, яка надає капітану можливості контролювати операції та характеристики з NPRS, повністю автоматизована система керування, яка оптимізує характеристики NPRS, а також система

електропостачання забезпечують роботу кожного роторного вітрила.

За останні роки система NPRS установлена на наступних суднах:

2015 р. – судно «Estraden» фінської компанії «Bire's RoRo cargo ship»;

2018 р. – суховантажне німецьке судно «Fehn Pollux» (ротор довжиною 18 м);

2018 р. – танкер «Maesk Pelican» – чотири NPRS;

2020 р. – балкер «Atros» – чотири NPRS;

2021 р. – 5 NPRS 2становлені на рудовозі «Sea Zoushan».

2021 р., Японія. У Японії вперше випробувана технологія уловлювання CO_2 з вихлопних газів на морському вуглевозі «Croma Utility». Команда «Kawasaki Kisen Kaisha, LTD» («K» Line) успішно провела експеримент із сепарування та уловлювання діоксиду вуглецю з вихлопних газів, що виділяються на судні. Технологія була встановлена в рамках «CC-OCEAN» для перевірки системи уловлювання CO_2 на борту за програмою «Дослідження та розробки для просування технологій морських ресурсів». Над цією програмою працюють «Mitsubishi Shipbuilding Co., Ltd» та японське класифікаційне товариство «Class NK». Демонстраційний експеримент показав чистоту уловлювання CO_2 на рівні 99,9 %. Із середини вересня 2021 р. екіпаж судна проводить експлуатацію обладнання експериментальної установки.

2021 р., Норвегія. У Норвегії взяли в експлуатацію перший у світі гібридний автомобілевоз. Судно отримало назву «Auto Advance». Довжина автомобілевозу складає 169 м, ширина – 28 м, кількість автомобілів – 3600, кількість палуб – 10. Судно здатне працювати як на СПГ, так і з використанням акумуляторної установки. Завдяки цьому рішенню норвезька компанія «UECC» (United Europian Car Carriers) планує зменшити на 40 % викиди діоксиду вуглецю до 2030 р.

Це перший з трьох гібридних автомобілевозів які «UECC» замовила на китайській верфі «Jiangnan Shipyard».

2021 р., Норвегія. У листопаді здано в експлуатацію вперше у світі повністю електричне автономне вантажне судно «Yara Birkeland».

80-метрове судно водотоннажністю у 3200 т розпочало дворічні робочі випробування. Спочатку воно буде експлуатуватись за участю помічника капітана, який буде налаштовувати управління судном, щоб у подальшому воно працювало повністю автономно. Судно повинно орієнтуватись у вузькому фйорді, проходячи між двома мостами, з урахуванням течій та інтенсивності руху торгових і прогулянкових суден. Після чого пришвартуватись в одному із найбільш завантажених портів Європи. Наступні декілька місяців судно буде здійснювати рейси без вантажів. «Передусім ми повинні визначити, наприклад, що це безпечно, а потім визначити, що з ним робити» – вважають дослідники.

2022 р, Норвегія. Норвезька компанія «TECO 2030 ASA» спільно зі своїми партнерами «Umos Mardal» та «BLOM Martime» розробляє проєкт високошвидкісного пасажирського катамарана на вуглеводневому паливі з нульовим рівнем викидів.

Судно буде оснащене системою генерування енергії на базі паливних елементів від TECO 2030. Компанія «Umos Mardal» розробила дизайн катамарана з низьким рівнем енергоспоживання. Катамаран буде перевозити 300 пасажирів зі швидкістю понад 35 вузлів. Пілотний варіант судна планується здати в експлуатацію у 2020 р.

2022 р., Компанія «CMA CGM» запустила у Сінгапурі проєкт бункерування 32 контейнеровозів, що експлуатуються в азійському регіоні, сумішшю 24 % біопалива (метилестер використаної кухарської олії) з морськими нафтовими паливами.

2022 р., Франція. Класифікаційне товариство «Bureau Veritas» видало нові Правила для суден, що використовують паливні елементи як основні та допоміжні джерела енергії.

2022 р., Франція. Верфь «Chantiers de Atlantique» у м. Сен-Назер здала замовнику – компанії «Royal Caribbean» круїзний лайнер «Wonder of the Seas» – п'яте судно класу «Oasis».

Після першого головного судна цього класу «Oasis of the Seas», побудованого у Фінляндії у 2009 р., були побудовані наступні судна:

друге – «Allur of the Seas», 2010 р., Фінляндія, м. Турпу;

третє – «Harmony of the Seas», 2016 р., Франція, м. Сен-Назер;

четверте – «Symphony of the Seas», 2018 р., Франція, м. Сен-Назер.

У 2019 р. компанія «Royal Caribbean» уклали контракт з південнокорейською компанією «Samsung Heavy Industries» на побудову шостого судна класу «Oasis» – круїзного лайнера «Utopia of the Seas». Отримання судна замовником заплановано на жовтень 2023 р. Усі судна є конструктивно подібними, відмінність у розмірах корпусу та водотоннажності не перевищує 0,5 %.

Певна відмінність є наявною у складі судової електростанції, якщо на «Oasis of the Seas» і «Allur of the Seas», «Symphony of the Seas», «Harmony of the Seas» та «Wander of the Seas» установлено 6 дизель-генераторів компанії «Wartsila» приблизно однакової сумарної потужності, то встановлена потужність дизель-генераторів на судні «Utopia of the Seas» є на 20 % менше. Також є певні відмінності у складі пропульсивного комплексу судна «Utopia of the Seas». На ньому застосовано три ГСК «Azipod» та три НПП, у той час як на всіх інших сестринських суднах – по 3 «Azipod» та 4 НПП.

Характеристики сучасних суднових двигунів внутрішнього згоряння

Модель двигуна	Цикл	Кількість циліндрів, їхнє розміщення: L – рядне V – V-подібне	Діаметр циліндра	Хід поршня	Частота обертів, хв$^{-1}$	Потужність, кВт		Питома витрата умовного палива г/(кВт×год)
			мм			циліндрова	агрегатна	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Caterpillar Marine Power Systems								
Cat 3056	4	6 L	100	127	2100…2600	15,5…25,5	93…153	222,3…280,7
Cat 3508	4	8 L	170	190	1200…1800	65,8…107,1	526…857	216,8…217,4
Cat 3512	4	12 V	170	190	1200…1800	75,0…108,8	900…1305	211,8…225,9
Cat 3516	4	16 V	170	190	1200…1800	74,7…102,5	1195…1640	201,2…220,3
Cat C280-6	4	6 L	280	300	900…1000	287,5…338,7	2300…2710	–
Cat C280-16	4	16 V	280	300	900…1000	281,5…338,7	–	–
MaK M20C	4	6, 8, 9 L	200	300	900…1000	170…190	1020…1710	186…190
MaK M25C	4	6, 8, 9 L	255	400	720/750	290…330	1800…2970	183…184
MaK M32C	4	6, 8, 9 L 12, 16 V	320	480	600	480…500	2880…4500	177…179
MaK M 43C	4	6, 7, 8, 9 L 12, 16 V	430	610	500/514	900…1000	5400…9000 18 800…16 000	175…178
Cummins Engine Company Ltd								
KTA 19-M4	4	6 L	159	159	2100	87	522	220,0
QSK 19-M	4	6 L	159	159	1800…2100	82,0…99,5	492…597	218,8…230,5
KTA 38-M1	4	12 V	159	159	1600…1800	55,9…68,4	671…821	204,7…212,5
KTA 50-M2	4	16 V	159	159	1600…1950	65,3…87,4	1044…1398	204,6…213,0
QSK 60-M	4	16 V	159	190	1600…1900	93,3…116,5	1492…1884	204,1…207,9
Daihatsu Diesel MFG Co. Ltd								
M2G	4	6 L	120	150	1200…1800	9,3…15,2	56…91	269…272
M3SG	4	6 L	140	160	1200…1800	33,0…44,0	198…264	238

Продовж. дод. В

1	2	3	4	5	6	7	8	9
M5SG	4	6 L	145	160	1200…1800	36,1…51,3	220…308	231
5DK-20	4	5 L	200	300	720…900	122…160	610…800	192
6DK-20	4	6 L	200	300	720…900	133…173	800…1046	192,0…193
8DK-20	4	8 L	200	300	720…900	133…170	1065…1360	192
6DK-28	4	6 L	280	390	720…750	332	1990	190
16DK-28	4	16 L	280	390	720…750	313	5000	189
5DC-17	4	5 L	170	270	900…1000	97,0	486	190…197
8DC-32	4	8 L	320	400	720…750	481	3844	183
Hanshin Diesel Works Ltd								
6L42GSH	4	6 L	240	400	400	80	480	201
6LUS40	4	6 L	400	640	340	466	2794	190
6LF54A	4	6 L	540	850	235	674	4045	184
LH28	4	6 L	280	460	395	172	1029	193
LH30	4	6 L	300	600	300	221	1323	192
LH34L	4	6 L	340	640	300	270	1618	186
LH36L	4	6 L	360	670	250	294	1765	184
LH38L	4	6 L	380	760	250	368	2206	184
LH41L	4	6 L	410	800	225	405	2427	179
Makita Corporation								
M30M	4	6 L	300	480	315	184,2	1105	196,0
LS38L	4	6 L	330	640	290	245	1470	189,0
LS42L	4	6 L	420	840	227	416,7	2500	183,0
S26MC	2	4…12 L	260	980	250	400	1600…4800	179,0
L35MC	2	4…12 L	350	1050	210	650	2600…7800	177,0
S35MC	2	4…12 L	350	1400	173	740	2960…8800	181,5
L42MC	2	4…12 L	420	1360	176	995	3980…11 940	177,0
S42MC	2	4…12 L	420	1764	136	1080	4320…12 960	180,4
S46MC-C	2	4…8 L	460	1932	129	1310	5340…10 480	174,3

Продовж. дод. В

1	2	3	4	5	6	7	8	9
S50MC	2	4…8 L	500	2000	127	1580	6320…12 640	174,3
S50MC-C	2	4…8 L	500	2000	127	1580	6320…12 640	174,3
MAN B&W Diesel Group								
K108ME-C6	2	6…14 L	1080	2660	94	6950	32 040…97 300	162
K98ME7	2	6…14 L	980	2660	97	6230	27 780…87 220	162
K98MC7	2	6…14 L	980	2660	97	6230	27 780…87 220	162
S90ME-MC-C7	2	6…9 L	900	3188	76	4890	18 840…44 010	160
K90ME9	2	6…12 L	900	2550	94	5720	24 540…68 640	164
S80ME-C9	2	6…9 L	800	3450	78	4510	18 300…40 590	160
S80MC6	2	5…12 L	800	3056	79	3640	11 870…43 680	155
K80ME-C9	2	6…12 L	800	2600	104	4530	19 680…54 360	164
S70MC-C8	2	5…8 L	700	2800	91	3270	11 050…26 160	162
L70ME-C8/ MC-C8	2	5…8 L	700	2360	108	3270	11 000…26 160	163
S60MC6	2	5…8 L	600	2292	105	2040	4900…16 320	158
L60ME-C7/ MC-C7	2	5…9 L	600	2022	123	2230	7600…20 070	164
S50MC6	2	5…8 L	500	1910	127	1430	3400…11 440	169
S50ME-B8	2	5…9 L	500	2000	127	1660	5650…14 940	163
S46MC-C8	2	5…8 L	460	1932	129	1380	4700…11 040	169
S42MC7	2	5…12 L	420	1764	136	1080	36 500…12 960	172
S35MC7	2	5…12 L	350	1400	173	740	2525…8800	173
L35MC6	2	5…12 L	350	1050	210	650	2200…7800	172
L+V51/60DF	4	6…9 L 12…18 V	510	600	514	1000	5850…18 000	189
L48/60B	4	12…18 V	480	600	514	1200	14 400…21 600	173
L40/54	4	6…9 L	400	540	550	720	4200…6480	181
L28/32A	4	6…9 L	280	320	775	245	1470…2205	187

Продовж. дод. В

L21/31	4	6…9 L	210	310	1000	215	1290…1935	181
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Mitsubishi Heavy Industries Ltd								
UEC37LA	2	4…8 L	370	880	158…210	280…520	1120…4160	168…175
UEC45LA	2	4…8L	450	1350	119…158	480…890	1920…7120	163…170
UEC52LA	2	4…8 L	520	1600	100…133	640…1180	2560…9440	160…167
UEC60LA	2	4…8 L	600	1900	83…110	840…1550	3360…12 400	159…166
UEC60LS	2	4…8 L	600	2200	75…100	950…1770	3800…14 160	159…166
UEC37LS11	2	5…8 L	370	1290	140…186	419…773	2095…6180	169…175
UEC50LS11/ Eco	2	4…8 L	500	1950	95…127	780…1445	3120…11 560	160…167
UEC50LSE/ Eco	2	5…8 L	500	2050	99…124	1060…1660	5300…13 280	166…171
UEC60LS11/ Eco	2	4…8 L	600	2300	79…105	1110…2045	4440…16 360	159…166
UEC75LS11	2	4…9 L	750	2800	63…84	1595…2940	6380…26 460	158…165
UEC85LS11/ Eco	2	5…9 L	850	3150	54…76	1980…3860	9900…34 740	156…163
MTU Friedrichshafen GmbH								
700	4	4, 6 L	94	100	3800	24…39	126…235	–
2000	4	8, 10, 12, 16 V	135	156	2250…2450	90…112	720…1790	–
4000	4	8, 12, 16 V	165	190	1500…2100	87…170	700…2720	–
595	4	12, 16 V	190	210	1750…1800	225…270	3240…4320	–
1163	4	12, 16, 20 V	230	280	1200…1300	300…370	4440…7400	–
8000	4	20 V	265	315	1150	410…450	8200…9000	–
Rolls-Royce Marine AS, Engines-Bergen								
C25:33P	4	6, 8, 9 L	250	330	720…750 900…1000	250 330	1440…2250 1920…3000	–
B32:40A	4	6, 8, 9 L 12, 16 V	320	400	720…750	500	2880…8000	–

Продовж. дод. В

B35:40PG	4	12, 16, 20 V	350	400	750	437	5250…8750	–
1	2	3	4	5	6	7	8	9
KRGS-G4	4	6, 8, 9 L	250	300	900…1000	220	1190…1990	–
KVGS-G4	4	12, 16, 18 V	250	300	900…1000	220	2380…3970	–
B35:40AG	4	12, 16, 20 V	350	400	720…750	437	5050…8750	–
SEMT Pielstick								
PA4-185VG	4	6, 8 L 6, 8, 12, 16, 18 V	185	210	1500	123	740…2215	–
PA5	4	4, 5, 6, 8 L 12, 16, 18 V	255	270	1000	220	880…3960	–
PA6	4	6, 8, 9 L 12, 16, 18, 20 V	280	290	1050	325	1950…6500	–
PA6BSTC	4	12, 16, 18, 20 V	280	330	1050	405	4860…8100	–
PC2.6B	4	12, 14, 16, 18, 20 V	400	500	600	750	9000…15 000	–
PC4.2	4	10, 12, 14, 16, 18 V	570	620	430	1215	12 150…21 870	–
PC4.2B	4	10, 12, 14, 16, 18, 20 V	570	660	430	1400	14 000…28 000	–
Volvo Penta AB								
D3	4	5 L	81	93,2	3000…4000	16,2…28,0	81…140	–
D4	4	4 L	103	110	2800…3500	33,00…55,25	132…221	–
D5A	4	4 L	108	130	2300	23,75…29,50	118	–
D6	4	6 L	103	110	3500	38,0…53,3	228…320	–
D9	4	6 L	120	138	2200…2600	52,2…70,5	313…423	–
D12	4	6 L	131	150	1800…2300	36,0…95,0	216…570	–
D25A	4	6 L	170	180	1650	80,8…86,7	485…520	–
D30A	4	6 L	170	220	1400	81,7…88,3	490…530	–
D34A	4	12 V	150	160	2000	58,4…64,7	701…776	–
D49A	4	12 V	170	180	1650…1800	80,8…88,7	970…1040	–

Продовж. дод. В

D65A	4	16 V	170	180	1650…1800	80,6…86,3	1290…1380	–
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Wärtsilä Corporation								
Wärtsilä 20	4	4, 6, 8, 9 L	200	280	1000	180…200	720…1620	184…193
Wärtsilä 26	4	6, 8, 9 L 12, 16 V	260	320	900…1000	325…340	1950…2925 3900…5200	182…184
Wärtsilä 32	4	6, 7, 8, 9 L 12, 16, 18 V	320	400	750	500	3000…4500 6000…9000	173…180
Wärtsilä 32DF	4	6 L 12, 18 V	320	350	720…750	335…350	2010 4020…6300	–
Wärtsilä 38	4	6, 8, 9 L 12, 16 V	380	475	600	675…725	4350…6525 8700…11 600	173…175
Wärtsilä 46F	4	6, 7, 8, 9 L 12, 16 V	460	580	600	1250	7500…11 250 15 000…2000	170…173
Wärtsilä 46	4	6, 8, 9 L 12, 16 V	460	580	500…514	975…1050	5850…8775 11 700…15 600	170…177
Wärtsilä 50F	4	6, 8, 9 L 12, 16, 18 V	500	580	500…514	950	5700…8550 11 400…17 100	–
Wärtsilä 64	4	6, 7, 8 L	640	900	327,3	2150	12 900…17 200	164
Wärtsilä RTA48TB	2	5, 6, 7, 8 L	480	2000	102…127	1020…1455	5100…11 640	163…171
Wärtsilä RT-Flex50	2	5, 6, 7, 8 L	500	2050	99…124	1130…1760	5650…12 960	165…171
Wärtsilä RTA52U	2	5, 6, 7, 8 L	520	1800	108…135	1090…1560	5450…12 480	166…171
Wärtsilä RTA58TB	2	5, 6, 7, 8 L	580	2416	84…105	1530…2180	7560…17 440	162…170
Wärtsilä RT-Flex60	2	5, 6, 7, 8, 9 L	600	2250	91…114	1690…2420	8450…21 780	164…170
Wärtsilä RTA68D	2	5, 6, 7, 8 L	680	2720	76…95	2190…3130	10 950…25 040	161…169

Продовж. дод. В

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Wärtsilä RTA84TD	2	5, 6, 7, 8, 9 L	840	3150	61…76	2940…4200	14 700…37 800	160…169
Wärtsilä RT-Flex96C	2	6…14 L	960	2500	92…102	4000…5720	24 000…80 080	163…171
Yanmar Diesel Engine Co. Ltd								
6HYM-ETE (H)	4	6 L	132,9	165	1950	61,33	368	201
6HYM-ETE (M)	4	6	132,9	165	2100	73,50	441	206
6HYM-ETE (S)	4	L	132,9	165	2200	85,83	515	211
6AYM-ETE	4	6 L	155	180	1900	101,67	616	202
6RY17P-GV	4	6 L	165	219	1500	122,67	736	202
6N18A	4	6 L	180	280	900…950	73,50…122,67	441…736	194…197
8N21A	4	8	210	290	800…900	128,75…165,50	1030…1324	193…194
6EY26	4	6	260	385	750	245,17…320,00	1471…1926	188
8N280M	4	8	280	380	720	239,00…294,25	1912…2354	192
6N330	2	6	330	440	620	367,83…429,00	2207…2574	198
8N330	2	8	330	440	620	367,75…413,75	2492…3310	198

ДОДАТОК С

Характеристики морських газотурбінних двигунів провідних світових виробників

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГТД	GE MARINE, США					ISHIKAWAJIMA – HARIMA HEAVY INDUSTRIES, ЯПОНІЯ				
	LM 500	LM 1600	LM 2500	LM 2500+	LM 6000 PC	501 – KF5	601 – KF9	601 – KF11	LM 500	LM 500
Рік початку серійного випуску	1980	1987	1969	1998	1997	1986	1997	1997	1986	1987
Потужність за умовами ISO, кВт:										
максимальна	—	14 700	—	—	—	—	—	—	—	—
номінальна	420	14 100	24 300	29 800	42 200	4150	6380	7730	4100	14 100
Питома витрата палива, кг/(кВт · год)										
на максимальній потужності	—	0,231	—	—	—	—	—	—	—	—
на номінальній потужності	0,285	0,236	0,231	0,220	0,204	0,312	0,257	0,257	0,280	0,236
Коефіцієнт корисної дії (ККД), %	29,5	35,7	36,5	38,3	41,3	27,0	32,8	32,8	30,1	35,7
Температура газів, °С:										
на вході в ТВТ	—	1243	1243	—	—	—	—	—	—	—
на вході в силову турбіну	785	763	872	842	845	—	—	—	—	—
на виході з двигуна	565	514	570	522	459	585	529	504	565	504
Міра підвищення тиску	14,4	21,4	19,3	22,2	28,5	10,1	15,0	19,8	14,4	21,4
Масова витрата повітря, кг/с	16,3	47,2	70,3	85,8	124,0	15,6	23,6	25,6	15,9	46,3
Частота обертання силової турбіни, $хв^{-1}$	7000	7000	3600	3600	3600	14 200	11 500	11 500	7000	7000
Суха маса двигуна, кг	904	3720	4680	5240	8220	1134	1202	1600	610	3425
Габарити, м:										
довжина	2,9	4,2	6,7	6,7	7,3	2,7	2,0	2,4	2,1	4,6
ширина	0,9	2,0	2,0	2,0	2,5	1,4	0,8	0,8	1,0	2,0
висота	0,9	2,0	2,0	2,0	2,5	1,4	1,0	1,0	1,0	2,1

Продовж. дод. С

Характеристики ГТД	Ishikawajima – Harima Heavy Industries, Японія			Kawasaki Heavy Industries, Японія				MAN Turbo AG, Німеччина		MHI, Японія
	LM 2500	LM 2500+	LM 6000 PC	Tyne RMIC	Olympus TM3B	Spey SM1A	Spey SM1C	THM 1304 – 11	FT 8 Marine	MFT – 8
Рік початку серійного випуску	1969	1997	1997	1975	1973	1980	1987	1999	1990	1994
Потужність за умовами ISO, кВт:										
максимальна	—	—	—	—	20 600	13 800	19 250	11 600	27 100	27 000
номінальна	24 300	29 800	42 200	3930	15 800	12 600	17 770	11 050	24 600	25 480
Питома витрата палива, кг/(кВт · год)										
на максимальній потужності	—	—	—	—	0,296	0,214	0,230	0,276	0,24	0,222
на номінальній потужності	0,231	0,220	0,204	0,291	0,318	0,244	0,232	0,278	0,224	0,223
Коефіцієнт корисної дії (ККД), %	36,5	38,3	41,3	28,9	26,5	34,5	36,3	30,3	37,6	37,8
Температура газів, °С:										
на вході в ТВТ	—	—	—	—	—	—	—	995	—	—
на вході в силову турбіну	—	—	—	891	855	880	908	—	—	—
на виході з двигуна	557	518	456	442	433	408	461	509	465	470
Міра підвищення тиску	19,3	22,2	28,5	12,5	10,5	18,5	21,9	11,0	18,0	20,4
Масова витрата повітря, кг/с	69,9	85,8	124,0	21,0	108,5	58,3	66,7	49,0	83,3	84,8
Частота обертання силової турбіни, $хв^{-1}$	3600	3600	3600	13 970	5660	5220	5500	8600	3600	5000
Суха маса двигуна, кг	4760	5240	7303	14 070	30 870	25 480	25 660	9000	8600	6630
Габарити, м:										
довжина	6,70	6,7	7,3	5,6	9,2	7,5	7,5	5,6	8,2	7,6
ширина	2,1	2,1	2,5	2,1	2,6	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4
висота	2,1	2,1	2,5	2,1	2,6	3,4	3,4	3,1	2,4	2,4

Продовж. дод. С

Характеристики ГТД	MTU Friedrichshafen GmBH, Німеччина			Pratt & Whitney Canada, Канада				Pratt & Whitney Power Systems, США	
	LM 1600	LM 2500	LM 2500+	STGL –794	STGL –812	ST –18A	ST – 40	FT 8	FT 8–3
Рік початку серійного випуску	1987	1969	1998	1976	1976	1995	1999	1990	1990
Потужність за умовами ISO, кВт:									
максимальна	—	—	—	666	830	2260	4840	27 190	29 250
номінальна	14 100	24 300	28 700	596	724	1940	3990	24 540	27 106
Питома витрата палива, кг/(кВт · год)									
на максимальній потужності	—	—	—	0,348	0,329	0,274	0,258	0,221	0,220
на номінальній потужності	0,236	0,231	0,221	0,355	0,341	0,284	0,262	0,224	0,222
Коефіцієнт корисної дії (ККД), %	35,7	36,5	38,1	23,7	24,7	29,7	32,1	37,6	38,0
Температура газів, °С:									
на вході в ТВТ	1243	1243	—	—	—	—	—	—	—
на вході в силову турбіну	763	872	833	—	—	—	—	—	—
на виході з двигуна	509	560	526	565	546	536	548	465	485
Міра підвищення тиску	21,4	19,3	22,2	7,0	8,2	14,0	16,9	18,8	19,7
Масова витрата повітря, кг/с	46,3	70,3	82,6	3,1	3,7	8,0	13,9	83,3	86,2
Частота обертання силової турбіни, $хв^{-1}$	7000	3600	3600	33 000	33 000	18 900	14 875	3000 3600 5500	3000 3600 5500
Суха маса двигуна, кг	3430	4770	5080	104	136	350	525	8620	—
Габарити, м:									
довжина	4,6	6,7	7,02	1,25	1,30	1,53	1,71	5,7	—
ширина	2,0	2,1	2,1	0,43	0,43	0,67	0,67	2,4	—
висота	2,1	2,1	2,1	0,55	0,55	0,82	0,98	2,4	—

Продовж. дод. С

Характеристики ГТД	Rolls-Royce, Англія					Turbomeca, Франція	Vericor, США		
	AG 9140	RR 4500	Spey	WR 21	MT 30	Makila T 1	601 – KF9	601 – KF11	LM 500
Рік початку серійного випуску	1986	2004	1987	1997	2001	1988	1997	1997	1986
Потужність за умовами ISO, кВт:									
максимальна	—	—	—	—	—	1278	—	—	—
номінальна	3900	4440	19 250	24 900	35 800	1180	6380	7730	4100
Питома витрата палива, кг/(кВт · год)									
на максимальній потужності	—	—	—	—	—	0,304	—	—	—
на номінальній потужності	0,292	0,266	0,230	0,204	0,216	0,317	0,257	0,257	0,280
Коефіцієнт корисної дії (ККД), %	28,5	31,7	36,7	41,3	39,0	26,5	32,8	32,8	30,1
Температура газів, °С:									
на вході в ТВТ	—	—	—	—	—	—	—	—	—
на вході в силову турбіну	—	—	—	851	—	—	—	—	—
на виході з двигуна	556	519	461	358	478	515	529	504	565
Міра підвищення тиску	11,3	14,3	21,9	16,2	24,0	9,6	15,0	19,8	14,4
Масова витрата повітря, кг/с	15,6	20,9	66,7	73,1	116,7	5,6	23,6	25,6	15,9
Частота обертання силової турбіни, $хв^{-1}$	14 340	14 600	5500	3600	3300 3600	6300	11 500	11 500	7000
Суха маса двигуна, кг	—	—	—	54 430	—	440	1202	1600	610
Габарити, м:									
довжина	—	—	—	7,96	—	1,9	2,0	2,4	2,1
ширина	—	—	—	2,6	—	0,7	0,8	0,8	1,0
висота	—	—	—	4,5	—	0,7	1,0	1,0	1,0

Продовж. дод. С

Характеристики ГТД	ДП НВКГ «Зоря – Машпроєкт», Україна											
	UGT 3000	UGT 3000R	UGT 6000	UGT 6000R	UGT 6000+	UGT 10 000	UGT 15 000	UGT 15 000R	UGT 15 000+	UGT 16 000	UGT 16 000R	UGT 25 000
Рік початку серійного випуску	1981	1981	1918	1978	1997	1998	1988	1988	1988	1982	1982	1993
Потужність за умовами ISO, кВт:												
максимальна	4120	3900	8390	7800	9570	—	18 700	17 700	22 100	20 400	19 100	31 200
номінальна	3310	3120	6700	6260	8320	10 670	15 600	14 700	20 200	17 000	16 000	26 700
Питома витрата палива, кг/(кВт · год)												
на максимальній потужності	0,260	0,287	0,266	0,281	0,245	—	0,238	0,251	0,235	0,257	0,273	0,225
на номінальній потужності	0,273	0,300	0,269	0,289	0,255	0,238	0,245	0,258	0,251	0,266	0,282	0,235
Коефіцієнт корисної дії (ККД), %	31,0	28,5	31,5	29,4	33,0	36,0	34,6	32,9	36,0	31,9	29,2	36,4
Температура газів, °С:												
на вході в ТВТ	1020	1020	1015	1015	1092	1184	1035	1035	1160	–	–	1245
на вході в силову турбіну	—	—	—	—	—	—	—	—	—	865	865	—
на виході з двигуна	420	428	420	428	442	458	405	410	470	345	355	465
Міра підвищення тиску	13,7	13,7	13,9	13,9	15,7	19,6	18,6	18,6	19,4	12,8	12,8	21,0
Масова витрата повітря, кг/с	16,5	16,5	31,0	31,0	33,6	37,4	69,0	69,0	74,0	99,0	99,0	87,6
Частота обертання силової турбіни, $хв^{-1}$	7000	8800	3000 5300 7000 9300	4750 7200	7700	4900	5100	4400	3500	3900	3500	3300
Суха маса двигуна, кг	2500	2800	3500	3800	3500	4200	9000	9800	9000	16 000	16 900	14 000
Габарити, м:												
довжина	2,5	2,7	3,2	3,4	3,2	3,6	5,0	5,2	5,0	5,9	6,2	6,4
ширина	1,3	1,8	1,6	1,8	1,6	1,7	2,6	2,7	2,6	2,7	2,8	2,5
висота	1,3	1,8	1,8	1,9	1,8	1,9	2,8	3,0	2,8	3,1	3,2	2,7

Навчальне видання

ГОРБОВ Віктор Михайлович

ІСТОРІЯ СТВОРЕННЯ ТА РОЗВИТКУ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Навчальний посібник

Комп'ютерна правка й коректура *О. Г. Костенко*
Комп'ютерне верстання *Ю. С. Семенченко*

Формат 70×100/16. Ум. друк. арк. 45,18. Тираж 100 прим. Вид. № 40. Зам. № 0211-100.
Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54007
E-mail : publishing@nuos.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6402 від 19.09.2018 р.