

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET

DR. SC. PREDRAG KRALJ

BRODSKI ENERGETSKI SUSTAVI

Nastavni materijali za savladavanje kolegija *Brodski strojni sustavi* na studijskom smjeru Nautika i tehnologija pomorskog prometa usklađeni sa sadržajima STCW Model Course 7.01

RIJEKA, 16.11. 2017.

Izdavač
Sveučilište u Rijeci
Pomorski fakultet u Rijeci
51000 Rijeka, Studentska 2

Glavni urednik
Vesna Vranić Kauzlarić, dipl. ing.

Recenzenti
Prof. dr. sc. Serđo Kos
Prof. dr. sc. Ivica Šegulja

Lektura i korektura
Laida Bušljeta, prof.

ISBN 978-953-165-122-6

Web izdanje

Prvo izdanje

Objavljeno odlukom Povjerenstva za izdavačku djelatnost Pomorskog fakulteta u Rijeci (Klasa: 612-04/17-01/1; Urbroj: 2170-57-17-01-5).

Udžbenik je objavljen uz financijsku potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta.

Udžbenik je zaštićen autorskim pravima. Sva prava pridržana, neovisno radi li se o cjelini ili samo dijelu udžbenika, a posebno kada se radi o fotokopiranju, ponovnom korištenju originalnih nacрта, objavljivanju, raspačavanju u elektronskom ili bilo kojem drugom obliku, te pohranjivanju u bazama podataka. Autor i izdavač ne prihvaćaju odgovornost za moguće pogreške i štete nastale primjenom podataka navedenih u udžbeniku.

Odluku o objavljivanju ovog materijala, namijenjenog prije svega studentima smjera nautike i tehnologije pomorskog prometa Pomorskog fakulteta u Rijeci, donio sam usprkos činjenici da postoji odgovarajuća, obvezatna literatura na hrvatskom jeziku. Radi se o udžbeniku prof. dr. sc. Dragana Martinovića *Strojarski priručnik za časnike palube*, a do sada je objavljeno drugo, dopunjeno izdanje.

Jedan je razlog, manje neslaganje sadržaja udžbenika s trenutačnim programom kolegija i sadržajima koje zahtijeva konvencija, odnosno navedeni su u *Model Course 7.01*. Neka se područja brodskog strojnog kompleksa obrađuju pretjerano, u mjeri koja nije potrebna budućim časnicima palube. Razlozi su nedovoljna predznanja studenata ili priroda posla, koju će isti kasnije obavljati. Druge se teme, i to one s atributima praktičnih znanja potrebnih časnicima palube, ne obrađuju dovoljno.

U prvu bih grupu, sigurno svrstao brodske cjevovode. Te će se teme nastojati obraditi u maksimalno sažetom obliku, vodeći prije svega računa o stvarno potrebnim znanjima, odnosno povezanosti indikacije na komandnom mostu broda s pojedinim elementom brodskog cjevovoda. Druga grupa, nedovoljno objašnjenih tema su postupci pripreme glavnog porivnog stroja, dizelskih (ili drugih) generatora električne struje te brodskih generatora pare. Iako se navedeni postupci ne mogu direktno povezati sa zanimanjem časnika palube, može ih se povezati sa sustavima daljinskog upravljanja na mostu, s različitim, nužnim postupcima u kriznim situacijama ili sustavima automatske zaštite i mjerama predostrožnosti. Također, u navedenom se udžbeniku ne obrađuju sustavi protupožarne zaštite na brodu. U izvjesnoj mjeri to je obrađeno u kolegiju *Sigurnost na moru*, no ovdje će biti dat tehnološki, inženjerski opis izvedbe i primjene.

Drugi, možda i važniji, razlog za objavljivanje, našao sam u značajnom neslaganju količine informacija dostupnih u obveznoj literaturi i razumijevanja navedenih činjenica od strane studenata. U nekim su slučajevima studenti izražavali negodovanje zbog previše informacija, dok je u nekim slučajevima bilo upravo suprotno. Odgovor na prvu primjedbku mogao bi biti da se zbog manjeg predznanja ovdje moralo ići u neke osnove, možda nepotrebne u takvom udžbeniku. Studentu, koji te osnove poznaje, to je nepotrebno i može preskočiti takve tematske cjeline. Ako je područje nedovoljno precizno obrađeno, studentima se preporuča dopunska literatura, sva na hrvatskom jeziku. To je po mom mišljenju previše gradiva jer se radi o nekoliko kolegija brodstrojarskog smjera (motori, generatori pare, toplinske turbine, pomoćni uređaji i cjevovodi).

Udžbenik je podijeljen u dva dijela. U prvom, naziva **Porivni sustavi i strojevi**, obrađuje se općenito poriv, stupnjevi iskoristivosti i elementi porivnih sustava te porivni strojevi s težištem na najčešće tipove, a u drugom, naziva **Pomoćni uređaji i sustavi**, obrađuju se u osnovnim crtama pumpe, kormilarski uređaji, uređaji kojima se sprječava zagađivanje morskog okoliša i drugi, te cjevovodi kojih su navedeni uređaji osnovni dijelovi.

Budući da će ovaj materijal u početku biti objavljen samo na internetskoj stranici www.pfri.hr/~pkralj pozivaju se čitatelji (posebno studenti i časnici palube s ovlaštenjima) na dobronamjerne primjedbe kako bi se mogle izvršiti korekcije u korist budućim generacijama studenata.

I PORIVNI SUSTAVI I STROJEVI

U ovom se dijelu razmatraju porivni sustavi, njihove karakteristike, tj. prednosti i mane, primjenjivost na pojedinim vrstama brodova, te svi elementi porivnih sustava. Elementi broskog porivnog sustava su: porivni stroj, propulzor, sredstvo prijenosa snage, odzivni ležaj i drugi.

Učestalost primjene pojedinog porivnog stroja na brodu određuje i obim gradiva koji će se posvetiti pojedinom elementu porivnog sustava. Neki su porivni sustavi na brodovima danas toliko rijetki, da je dato objašnjenje nekih elemenata porivnog sustava enciklopedijsko.

U to se mogu uvrstiti reduktori i izvrstive spojke. Karakteristike elektromotornog pogona i elemenata za prijenos snage istog, ovdje se također neće obrađivati jer su dio drugog (elektrotehničkog) područja kolegija.

Sadržaj dijela I

1. Porivni sustav...6

1.1. Tipovi brodskih porivnih strojeva...8

1.1.1. Karakteristike poriva sporookretnim dizelskim motorima....8

1.1.2. Karakteristike poriva srednjeokretnim dizelskim motorima...9

1.1.3. Karakteristike poriva parnim turbinama...10

1.1.4. Karakteristike poriva plinskim turbinama...11

1.1.5. Karakteristike kombiniranih porivnih sustava...11

1.1.6. Karakteristike elektromotornog poriva...13

1.2. Ostali elementi porivnog sustava...13

1.2.1. Prijenos snage...13

1.2.2. Reduktor...13

1.2.3. Radijalni ležajevi...14

1.2.4. Aksijalni (odrivni) ležaj...15

1.2.5. Propulzor...15

1.2.5.1. Prekretanje propelera s fiksnim krilima...17

1.2.5.2. Propeler u sapnici...17

1.2.5.3. Propeler s promjenjivim usponom krila...18

1.2.5.4. Pramčani propeler...19

1.2.5.5. Podtrupni potisnik...20

1.2.5.6. Vibracije...20

1.2.5.7. Aktivno kormilo...21

1.2.6. Spojke...21

1.3. Stupanj iskoristivosti poriva...22

1.4. Slip ili skliz...23

1.5. Mjerenje snage poriva...24

2. Porivni strojevi...27

2.1. Dizelski motori...27

2.1.1. Radne tvari...29

2.1.2. Toplinski proces u dizelskom motoru...32

2.1.3. Konstrukcijske karakteristike sporookretnih dizelskih motora...33

2.1.3.1. Sustav goriva motora...36

2.1.3.2. Podmazivanje motora...38

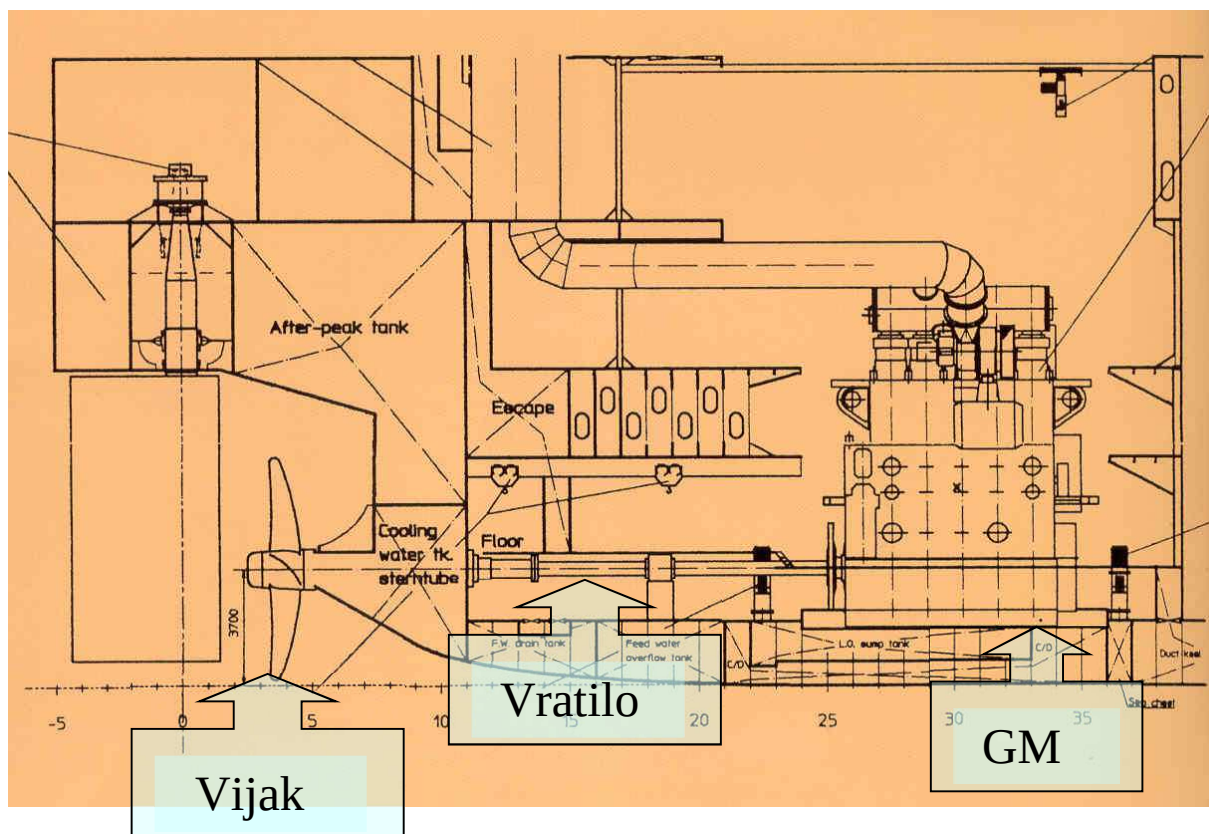
2.1.3.3. Sustav upućivanja motora...39

2.1.3.4.	<i>Sustav ispirnog zraka...</i>	41
2.1.3.5.	<i>Sustav ispušnih plinova...</i>	41
2.1.3.6.	<i>Prekretanje motora...</i>	42
2.1.4.	Protupožarna zaštita motora...	43
2.1.5.	Uređaj za polagano zakretanje...	44
2.1.6.	Razvoj sporookretnih motora...	44
2.1.7.	Upravljanje glavnim porivnim strojem...	46
2.1.8.	Priprema glavnog motora za pogon...	48
2.1.9.	Mjerenje utroška goriva...	50
2.1.10.	Primjeri postupaka u nuždi...	51
2.2.	Parnoturbinski porivni sustavi...	52
2.2.1.	Voda i vodena para...	53
2.2.2.	Primjena pare na brodu...	55
2.2.3.	Podjela brodskih generatora pare...	55
2.2.4.	Osnovne značajke brodskih generatora pare...	56
2.2.5.	Konstruktivne karakteristike i dijelovi...	58
2.2.5.1.	<i>Cirkulacija vode i pare...</i>	60
2.2.5.2.	<i>Cirkulacija zraka i dimnih plinova...</i>	61
2.2.6.	Opasnosti i postupci u nuždi...	62
2.2.7.	Automatski sustav loženja...	62
2.2.8.	Generatori pare na ispušne plinove...	64
2.2.9.	Parne turbine...	65
2.2.9.1.	<i>Utrošak pare, stupanj djelovanja i regulacija snage...</i>	68
2.2.9.2.	<i>Priprema parne turbine za pogon...</i>	69
2.2.9.3.	<i>Zaštita parne turbine...</i>	71
2.3.	Plinske turbine (primjena i konstrukcijske karakteristike)...	72
2.3.1.	Regulacija snage plinske turbine...	73
2.3.2.	Zaštita plinske turbine...	74

3. Literatura...75

1. PORIVNI SUSTAV

Porivni sustav broda sastoji se od porivnog stroja, elemenata za prijenos snage te propulzora. Postojanje drugih elemenata porivnog sustava ovisi o izvedbi istog, a napose vrsti porivnog stroja. Na slici 1 prikazan je uzdužni presjek strojarnice s oznakama porivnog stroja, vratilnog voda te broskog vijka.



Slika 1. Presjek trupa kroz strojarnicu

U velikoj se većini izvedbi prijenos snage ostvaruje vratilnim vodom¹. Isti se sastoji od propelnog vratila (najčešća izvedba propulzora jest brodski vijak ili propeler) te jednog ili više međuvratila. Ako je strojarnica u krmenom prostoru broj međuvratila je mali i suprotno. U slučaju elektromotorne propulzije prijenos snage ostvaruje se djelomično vratilom, djelomično električnim vodičem. Između generatora električne struje i elektromotora koji pokreće brodski vijak prijenos je ostvaren električnim vodičem, a između toplinskog stroja i generatora električne struje te između elektromotora i broskog vijka vratilom.

Kada je prijenos snage ostvaren vratilnim vodom, potrebni su i ležajevi. Radijalni, potrebni za oslonac samog voda pa preuzimaju njegovu težinu, i aksijalni ili odzivni, za preuzimanje porivne sile stvorene radom broskog vijka.

Odrivno vratilo s odzivnim ležajem može biti zasebno. To se rješenje tipično koristi kod brzookretnih strojeva kada u porivnom sustavu mora postojati reduktor. Drugo se rješenje koristi kod najčešćih porivnih strojeva - sporookretnih dizelskih motora i tada se odzivni ležaj ugrađuje u kućište motora. Kada se posmatra redoslijed elemenata porivnog sustava redom od broskog vijka prema stroju, odzivni je ležaj ispred reduktora ili prije koljeniastog vratila motora.

Odrivno se vratilo preko kliznih papučica naslanja na kućište ležaja. Kućište je učvršćeno na brodsku konstrukciju. Papučice su ugrađene s obje strane diska, ali se on naslanja samo na jednu stranu, u ovisnosti o smjeru vrtnje vijka, odnosno smjeru vožnje broda. Takvi su odzivni ležajevi tipa Mitchell.

Kod elektro propulzije vratila se pojavljuju u sklopu dizelgeneratorske jedinice, postoji također i propelerno vratilo. Isto se može nalaziti u podtrupnom potisniku (POD ili AZIPOD²).

Ukoliko porivni stroj nazivnu snagu ostvaruje s velikim brojem okretaja u porivni se sustav ugrađuje reduktor broja okretaja. To je sklop zupčanika pomoću kojega se ulazni broj okretaja (porivnog stroja) smanjuje na vrijednost prihvatljivu za propeler. Taj, izlazni broj okretaja, mora biti relativno nizak zbog čvrstoće i stupnja iskoristivosti broskog vijka. Reduktori se ne ugrađuju ukoliko se nazivna snaga postiže pri malom broju okretaja jer predstavljaju relativno veliku investiciju.

U sustavima s prijenosom snage pomoću vratila, potrebno je navesti i spojke. Sporookretni motori s vratilnim su vodom najčešće povezani neelastičnim spojkama. Radi se naprosto o prirubničkom spoju koji se, u normalnoj situaciji, neće i ne može, otpustiti. Za to nema vremena niti potrebe. Otpuštanje takvog, vijčanog spoja, učinit će se u slučaju neke nužde ili remonta. Uz takvu izvedbu bitno je spomenuti i mogućnosti promjene smjera vožnje broda. To se može riješiti na dva načina: prekretanjem³ stroja ili promjenom uspona krila vijka.

Kod nekih porivnih sustava spojka može biti izvrstiva (isključiva). To je bitna činjenica za postupak prekretanja jer se prekretanje ostvaruje bez opterećenja porivnog stroja. Naime, nakon što se zatvori dovod radnog medija (goriva, pare...) na stroj i isključi spojka, brod zbog svoje velike mase i dalje nastavlja kretanje u prvobitnom smjeru te more i dalje zbog nestrujava te okreće propeler. Međutim, zbog isključene spojke ne djeluje i na porivni stroj.

Brodске izvrstive spojke redovito su hidrodinamske ili elektromagnetske, ali se koriste i tarne. Pri tome, čitaoc treba izbjeći zamku zamjene navedenih tipova s načinima njihova uključivanja, što se često dešava. Velika je razlika između tarne spojke, koja se samo hidraulički uključuje, i hidrodinamske spojke.

² Radi se o azimut propulziji, a AZIPOD je zaštićeni naziv kompanije Asea Brown Boveri (ABB).

³ Promjenom smjera vrtnje koljeničastog vratila dizelskog motora ili rotora turbine.

1.1. Tipovi brodskih porivnih strojeva

U ovisnosti o primjenjenom porivnom stroju govori se o: motornoj propulziji, parnoturbinskoj propulziji, plinskoturbinskoj propulziji, elektromotornoj propulziji te kombiniranoj propulziji. U literaturi se sreće i pojam nuklearne propulzije, no nuklearni reaktor je izvor toplinske energije za proizvodnju pare pa je ovdje riječ o parnoturbinskoj propulziji.

Već je prije navedeno da su najčešći brodski porivni strojevi⁴ **sporookretni dizelski motori**. To se može izreći imajući u vidu ugrađenu snagu ili nosivost brodova koje pokreću. Prema podacima proizvođača motora barem 95% brodova posmatrano prema ugrađenoj snazi porivnih strojeva ili nosivosti brodova, pogonilo se sporookretnim dizelskim motorima. Taj se postotak mijenja zbog promjena cijena goriva, restriktivnih propisa o zaštiti morskog okoliša ili drugih razloga, no prednosti sporookretnih dizelskih motora sigurno će ih još dulje vrijeme činiti najprihvatljivijim brodovlasnicima. Propeler može biti s fiksnim ili zakretnim krilima.

Do sada je više puta spomenut pojam sporookretni (engl. slow turning) motor. O čemu se radi? Misli se na broj okretaja koljeničastog vratila motora. Ovakvi motori nominalnu snagu proizvode pri malom broju okretaja koljeničastog vratila, za razliku od srednje ili brzookretnih motora.

Porivni sustavi sa srednjeokretnim **dizelskim motorima** česti su na RO-RO brodovima ili na manjim plovnim objektima⁵, a na većim se brodovima ipak najčešće koriste za pogon generatora električne energije. Takav porivni sustav mora imati reduktor i zasebni odzivni ležaj.

Toplinske turbine (parne i plinske) rade sa znatno većim brojem okretaja te je u porivnom sustavu potreban reduktor velikog prijenosnog omjera. Postoje različite izvedbe kombiniranih sustava s jednom ili više parnih i plinskih turbina koje preko reduktora mogu pokretati jedno ili više propelernih vratila.

Kombinirani porivni sustavi sastoje se od više različitih toplinskih strojeva i elektromotora. U literaturi se tako navode CODOG, CODAG, CODLAG, COGES i drugi kombinirani porivni sustavi. Nazivi dolaze od obično početnih slova engleskog nazivlja (COmbined Diesel Or Gas, COmbined Diesel And Gas, COmbined Diesel eLectric And Gas, COmbined Gas Electric And Steam).

1.1.1. Karakteristike poriva sporookretnim dizelskim motorima

Prednosti koje su sporookretni dizelski motori imali, a koje su ih činile najinteresantnijim brodovlasnicima, zadržali su do danas. Radi se, u usporedbi s drugim toplinskim strojevima, o strojevima s najvećim toplinskim stupnjem korisnosti. Osim toga troše jeftino gorivo. Primjenom različitih sustavnih rješenja za iskorištavanje otpadne topline procesa pretvorbe kemijske energije goriva u mehanički rad, može se stupanj iskoristivosti podići iznad 50%. Što je daleko više od 40-tak% iskoristivosti parnoturbinskog ili 30-tak% iskoristivosti plinskoturbinskog poriva.

Proizvođači daju specifikacije potrošnje goriva u ovisnosti o režimu rada motora. Novi tipovi brodskih sporookretnih motora trebali bi, prema podacima proizvođača, imati specifičnu potrošnju čak i manje od 170 g/kWh. Radi se o tzv. ostatnom gorivu, tj. ostatku frakcijske destilacije nafte. Zove se, zbog znatne gustoće, teško dizelsko gorivo ili kraće teška nafta,

⁴ Ovdje se misli na poriv broda, a ne u širem smislu poriv nekih brodskih pomoćnih uređaja.

⁵ Brzohodni dizelski ili benzinski motori su najbrojniji po broju ugrađenih jedinica, no na manjim plovilima.

zatim prema ruskom nazivu 'mazut' ili se koristi naprosto kratica engleskog naziva HFO (engl. heavy fuel oil).

Osim ovih dvaju očitih i vjerojatno svima poznatih, sporookretni dizelski motori imaju i druge prednosti. Pouzdani su u radu i radi se o provjerenim i pouzdanim tehnološkim rješenjima. Danas postoje praktično tri proizvođača takvih motora, s neznatnim konstrukcijskim razlikama. Posade stroja su dobro upoznate s izvedbama, greškama, praćenju rada, održavanju i dr., a to sve pozitivno utječe na sigurnost pogona. Ako posada i nije u mogućnosti otkloniti kvar, servisi su osigurani u gotovo svim većim lukama svijeta.

Takvi porivni sustavi nemaju reduktor, što povoljno utječe na investicijske troškove. Održavanje reduktora povećava i eksploatacijske troškove, da se ne spominje troškove nekih težih havarija reduktora (ako se npr. sustav ulja za podmazivanje reduktora ne održava ispravnim).

Zbog manje potrošnje goriva, na brodu su potrebne manje zalihe goriva, dakle lakši je i brže plovi ili je ugrađena snaga porivnog stroja manja, ili ima veći radijus plovidbe.

Motori imaju relativno složeni stapni mehanizam koji pravocrtno gibanje stapa pretvara u kružno gibanje vratila. To je značajni izvor vibracija broskog trupa pa se rijetko ugrađuju na putničke brodove, posebno one visoke klase. Izvode se s križnom glavom⁶. Zbog toga su visoki i potrebna je visoka strojarnica u koju će biti smješteni. Mora se osigurati prostor za sam motor i prostor potreban za vršenje remonta motora (vađenje stapova). To ih čini praktično neupotrebljivim za RO-RO brodove, osim možda onih najvećih. Paluba vozila prolazi iznad strojarnice pa bi se javljao ili veliki neiskorišteni prostor ili bi se morale izvesti komplicirane ukrcajne rampe vozila, koje bi dodatno poskupile projekt. Buka koju stvara rad sporohodnog dizelskog motora i turbopuhala⁷ sigurno ne predstavlja prednost na putničkom brodu.

Manevriranje takvim brodom složen je postupak koji će se sastojati od, između ostalog, čestog upućivanja i zaustavljanja motora te promjene smjera vožnje. Time se troši zrak za upućivanje i energija za pogon kompresora zraka, a vjerojatnost otkazivanja sustava manevriranja je veća. Veliko je olakšanje ako se poriv ostvaruje propelerom sa zakretnim krilima tj. promjenjivim nagibom krila. Motor se tada uvijek okreće u istom smjeru, a brzina i smjer plovidbe određuju se promjenom nagiba krila propelera.

Cjevovodi koji direktno ili indirektno omogućuju rad dizelskog motora najsloženiji su u usporedbi sa cjevovodima kod drugih porivnih strojeva. Najviše je različitih cjevovoda potrebno, najviše ventila, najviše regulacijskih i kontrolnih elemenata te su takvi cjevovodi najskuplji i najteži za održavanje.

1.1.2. Karakteristike poriva srednjeokretnim dizelskim motorima

Iako je najčešća primjena srednjeokretnih motora na brodu za pogon generatora električne struje, kako je već navedeno kod nekih brodova primjena ove vrste pogonskih strojeva ima određenih prednosti. Manje, kompaktnije strojarnice pogodne su na RO-RO brodovima, a manje vibracije i buka pogoduju primjeni na putničkim brodovima. Nekada su u usporedbi sa sporookretnim strojevima morali koristiti bolje (skuplje) gorivo, no danas je ta razlika daleko manja. Sustavi goriva jednaki su kod obje vrste ovih motora, a srednjeokretni motori također koriste tešku naftu.

⁶ Konstrukcijska izvedba kojom se postiže veći omjer S/D (visina stapaja / promjer cilindra), a koja će biti objašnjena kasnije.

⁷ Danas se redovito izvode s turbopunjenjem, a turbopuhalo je izvor prilično neugodne buke.

Manje su jedinične snage te je kod nekih brodova potrebno ugraditi više porivnih strojeva. To je investicijski trošak, posebno ako se ubroji i reduktor, no predstavlja povoljnije rješenje u smislu sigurnosti poriva.⁸ Prednosti navedene za sporookretne motore, kao poznata tehnološka rješenja i uhodanost posade te dostupnost servisa u svjetskim lukama, vrijede i u ovom slučaju.

1.1.3. Karakteristike poriva parnim turbinama

U ne tako davnoj prošlosti za veće su se porivne snage koristile parne turbine. Jedinična snaga sporookretnih motora povećana je na oko 75 MW (100000 KS)⁹, čime je ova prednost parnih turbina izgubljena. Međutim, za ovakve je snage nužno izvesti turbinu u više kućišta. Zbog elastičnosti rotora turbine isti ne može biti predugačak. Osim toga, postoje i toplinski razlozi za višekućišno rješenje. Zbog takve izvedbe strojarnice mogu biti kraće, a to znači više prostora za teret. Time je ujedno povećana i sigurnost poriva.

Turbine su rotacijski strojevi te nema potrebe pretvarati pravocrtno gibanje radnog elementa u kružno gibanje vratila, odnosno ne postoji stapni ili klipni mehanizam. Uslijed toga, proizvode manje vibracija te se često primjenjuju na putničkim brodovima.

Konstruktivski su jednostavnije od motora pa su jednostavniji i cjevovodi koji ih opslužuju. Investicijski su troškovi zbog toga manji, ali nažalost, potreban je reduktor većeg prijenosnog omjera (turbine rade i s nekoliko tisuća okretaja u minuti). Izvedbe i veličine strojarnica ovise o izvoru toplinske energije za proizvodnju pare. Nuklearna propulzija daje veću neovisnost broda o opskrbi 'gorivom'. Ipak, zbog potrebnog biološkog štita takve su konstrukcije teže od konvencionalnih, a zbog opasnosti po zdravlje ljudi i okoliš primjena u civilnom pomorstvu izuzetno je rijetka.

Ako generator pare koristi energiju ispušnih plinova nužno je postojanje nekog drugog toplinskog stroja koji ih stvara. Budući da to može biti dizelski motor ili plinska turbina radi se o kombiniranom porivu. Iz svega slijedi da generator pare za parno turbinsku propulziju redovito koristi neko fosilno gorivo. Kruto gorivo (ugljen) koristi se na vrlo malom broju brodova i to najčešće za prijevoz ugljena, a izgaranje je ostvareno u fluidiziranom sloju¹⁰.

Iako ima nekih prednosti, takva je izvedba rijetka. Generatori pare na plinovito gorivo ugrađuju se na brodove za prijevoz prirodnog ukapljenog plina (LNG). Budući da je prirodni plin smjesa plinova s najviše (od 70-99%) metana, radi se o čistom i energetski vrijednom gorivu. Rješenje je utoliko pogodnije što se teret (prirodni plin) najčešće ne hladi¹¹ pa bi se zbog održavanja tlaka u tankovima ispareni plin morao ispuštati u atmosferu. Energetski je daleko učinkovitije koristiti ga kao gorivo.

Ipak, najčešće je riječ o tekućem fosilnom gorivu, naziv kojega je već naveden. Radi se o istom gorivu koje koriste sporookretni dizelski motori. Sustavi pripreme goriva razlikuju se utoliko što su kod generatora pare dopuštene više vrijednosti kinematičkih viskoziteta, tj. niže temperature. Budući da je iskoristivost parnih turbina niža potrebne su veće zalihe goriva, veći skladišni tankovi, odnosno manji prostor za teret.

⁸ Kod modernih pogona sa sporohodnim motorima ugrađuje se 'take-me-home-device'. To je u osnovi hidromotor privješen na vratilni vod, kojemu je za rad potrebna 'samo' električna energija za pogon pumpe hidrauličkog sustava.

⁹ Wärtsilä-Sulzer proizvela je za najveći kontejnerski brod tada (2006. godine) Emma Maersk motor 14RTFLEX96-C koji daje 80,08 MW (108920 KS).

¹⁰ U ložište gdje se ugljen dozira mehaničkim dozatorima, kroz perforirane se cijevi (rešetke ložišta) dovodi primarni zrak, a iznad užarenog sloja goriva dovodi se sekundarni zrak. Uslijed odgaranja, grumenovi ugljena postaju sve manji pa ih struja zraka i vrućih plinova izgaranja podiže.

¹¹ Novije gradnje imaju rashladni sustav za ukapljivanje prirodnog plina. Radi se o visokotlačnim sustavima s dušikom, pomoću kojih se postiže temperatura od oko -163°C.

Može se zaključiti da se parnoturbinski porivi primjenjuju na velikim putničkim brodovima zbog malih vibracija, na brodovima gdje je zbog velike nosivosti ili velike željene brzine plovidbe potrebna velika instalirana snaga te kada je izvor toplinske energije nuklearni reaktor.

1.1.4. Karakteristike poriva plinskim turbinama

Od do sada spomenutih toplinskih strojeva plinske turbine imaju najmanji toplinski stupanj korisnosti. To je razlog da su se uglavnom koristile na vojnim jedinicama. Na njima nije toliko bitna korisnost, a plinske turbine imaju jednu prednost pred svim ostalim toplinskim strojevima. Imaju, naime, najbolji omjer proizvedene snage i mase (P/m).

Osim toga, period za pripremu i startanje je relativno kratak. Nadalje, pomoćni sustavi su najjednostavniji, dakle najjeftiniji i najlakši za održavanje. Plinske turbine uglavnom koriste kvalitetnije i skuplje dizelsko gorivo¹² pa manje zagađuju okoliš.

Eksploatacijski troškovi su veliki jer tehnološki nije u potpunosti riješeno trošenje (odgaranje) lopatica rotora turbine. Gorivo izgara pri visokim temperaturama pa se lopatice statora hlade (zrakom), a lopatice rotora izrađuju od visoko legiranog čelika na koji se (na toplinski najopterećenijem dijelu lopatice) lijepe pločice *stelita*. Vijek trajanja, s obzirom na cijenu proizvodnje, čini se brodovlasnicima ipak premali.

Dakle, s obzirom na gore navedeno, rijetko se ugrađuju na brodove, osim kod kombiniranih porivnih sustava.

1.1.5. Karakteristike kombiniranih porivnih sustava

Na slikama 2 i 3 prikazana su dva rješenja s kombinacijama parnih i plinskih turbina. Kako je u podjeli navedeno, moguće je više kombinacija s različitim porivnim strojevima i zbog obima ostalog gradiva nema potrebe da se ovdje opisuju. Svi međutim pružaju veću sigurnost poriva, neovisno o činjenici da li je prijenos snage mehanički ili električki. Ako je ovaj drugi, takva se propulzija naziva elektromotorna, a u novije doba često se ugrađuje u putničke brodove.

Veći broj porivnih strojeva te reduktor, podižu cijene ovakvih izvedbi. Primjenjuju se na vojnim jedinicama, putničkim ili RO-RO brodovima. Ponekad veći broj strojeva preko reduktora pogoni jedan brodski vijak, a ponekad više brodskih vijaka¹³. U izvedbi s više strojeva i vijaka, svaki pogonski stroj može imati zaseban vratilni vod i pokretati jedan vijak, a mogu svi preko reduktora biti povezani s više vijaka.

Brodovi s više vijaka, osim veće sigurnosti poriva, imaju i veće manevarske sposobnosti. Ukoliko jedan stroj vozi naprijed, a drugi krmom, stvara se spreg sila koji brod okreće gotovo u mjestu. Pri tome veća snaga strojeva i veći razmak vijaka povećavaju manevarske sposobnosti, ali je opasnost od oštećenja vijaka, zbog položaja bliže boku broda, nešto veća.

¹² To za novije plinske turbine ne stoji, ali se primjenom lošijeg goriva povećava zagađenje.

¹³ Uobičajeno je s dva vijaka, ali ima rješenja i s tri.

1.1.6. Karakteristike elektromotornog poriva

Toplinski strojevi, bilo koje izvedbe, pokreću generatore, a poriv broda ostvaruje se istosmjernim ili izmjeničnim elektromotorima. Prijašnje su konstrukcije bile s istosmjernim, dok se novije izvode s izmjeničnim trofaznim elektromotorima (prema engleskom nazivu to je AC/AC propulzija).

Obje izvedbe omogućuju finu regulaciju broja okretaja propelera te stoga i fino podešavanje položaja broda. Strojarnice su organizirane na drugi način, u odnosu na izvedbe s najčešćim, sporookretnim dizelskim motorima. Ovdje nema relativno dugog vratila, generatorska stanica ne mora nužno biti u nastavku elektromotora koji pogoni brodski vijak pa je moguć potpuno drukčiji raspored prostorija strojeva. Na taj se način stvara veći prostor za teret, putnike ili posadu.

Pomoćni sustavi pogonskih strojeva su jednostavniji i jeftiniji. Pouzdanost poriva je veća. Zbog kvalitetnijeg goriva smanjeno je zagađivanje okoliša.

1.2. Ostali elementi porivnog sustava

Svrha je porivnog sustava prenijeti potrebnu snagu, odnosno moment na brodski vijak. To je potrebno ostvariti uz što manje gubitke, a također je potrebno postići i rad broskog vijka s najvećim stupnjem iskoristivosti. Stupanj iskoristivosti broskog vijka prema postojećim teorijama povećava se s povećanjem promjera vijka i smanjenjem broja okretaja. Promjer vijka ograničen je čvrstoćom materijala i mogućnošću smještaja.

1.2.1. Prijenos snage

Prijenos snage porivnog stroja na propeler može se ostvariti direktno ili indirektno. Direktan prijenos može biti krut ili elastičan. Krut se ostvaruje npr. krutom spojkom ili prirubničkim spojevima vratila, a elastičan isključivom (izvrstivom) spojkom. Spojke mogu biti elektromagnetske, hidrauličke spojke ili druge izvedbe. Indirektan prijenos može biti zupčanički (reduktor) i električni.

Vratilni vod se sastoji od jednog ili više međuvratila i propelernog vratila, a kod nekih porivnih sustava i od odzivnog vratila. Izložen je promjenjivom kombiniranom opterećenju (savijanje uslijed mase propelera i samog vratila, torzija zbog vanjskog momenta na propeleru, tlačno i vlačno opterećenje zbog porivne sile).

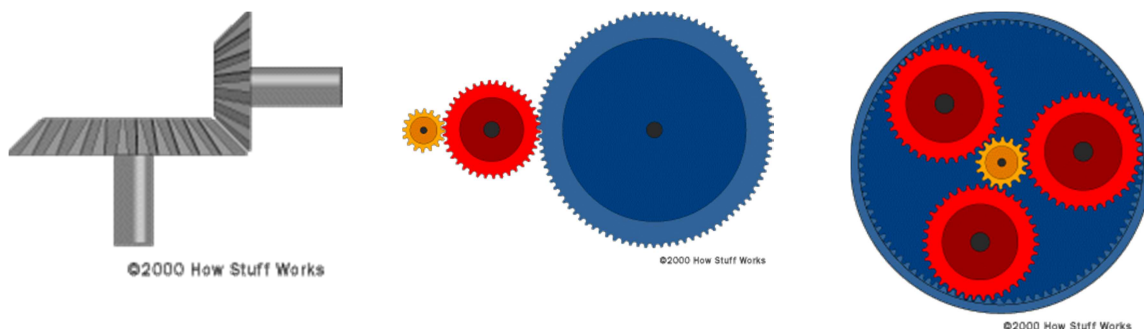
Presjek vratila može biti pun ili šupalj. Kod poriva s prekretnim propelerom mora biti šupalj zbog smještaja hidrauličkog sustava zakretanja krila propelera. Zbog velike se mase oslanja na radijalne ležajeve.

1.2.2. Reduktor

Pod pojmom reduktor podrazumijeva se sklop s ciljem smanjenja broja okretaja izlaznog (u ovom slučaju propelernog) vratila. Općenito se za zupčanički prijenos može reći da prenosi silu pri različitim brzinama, momentima ili u različitom smjeru u odnosu na pogonsko vratilo. Ovdje nema potrebe ulaziti u detalje izvedbe broskog reduktora (zupčanika), no treba

navesti karakteristike koje bi trebao imati: potreban prijenosni omjer u ovisnosti o broju okretaja pogonskog vratila i željenog broja okretaja brodskog vijka, čim veći stupanj iskoristivosti, trajnost i sigurnost u radu.

Na slici 4 prikazani su različiti zupčanički prijenosi: s koničnim zubima te su pogonsko i gonjeno vratilo pod pravim kutem; te dvije izvedbe s planetarnim zupčanicom (zupčanik, odnosno zupčanici crvene boje).



Slika 4. Konično ozubljenje, primjena više zupčanika, gdje se u prvom slučaju žuti i plavi zupčanik okreću u istom, a u drugom slučaju u suprotnom smjeru

Ako se za srednju sliku utvrdi da je promjer žutog zupčanika jednak polovini crvenog, a ovaj jednak polovini plavog zupčanika te da je žuti zupčanik pogonski, koliko će iznositi broj okretaja plavog zupčanika kada se žuti okreće s 500 okr/min?

Rješenje:

Prijenosni omjer definiran je kao $i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{z_2}{z_1}$, gdje n predstavlja broj okretaja, d promjer zupčanika, a z broj zubi. Iz $d_2 = 2d_1$ slijedi da je $n_2 = n_1/2$ te iz $d_3 = 2d_2$ da je $n_3 = n_2/2$ odnosno $n_3 = n_1/4$ ili 125 okr/min.

Iz datog se primjera jasno vidi da veliki prijenosni omjeri znače velike razlike u promjeru pogonskog i gonjenog zupčanika, velike razlike u broju zubi ili čak primjenu većeg broja zupčanika. To poskupljuje izvedbu, odnosno povećava investicijske troškove, ne samo zbog ukupne cijene zupčanika, već i zbog cijene potrebnog sustava podmazivanja reduktora te hlađenja ulja.

Mada se zbog najraširenijeg porivnog sustava – sporookretnim dizelskim motorm – reduktor rjeđe koristi u sklopu porivnog sustava broda, treba reći da se različite izvedbe reduktora često primjenjuju u pomoćne svrhe. Susreću se npr. kod palubnih vitala te separatora goriva i ulja za podmazivanje.

1.2.3. Radijalni ležajevi

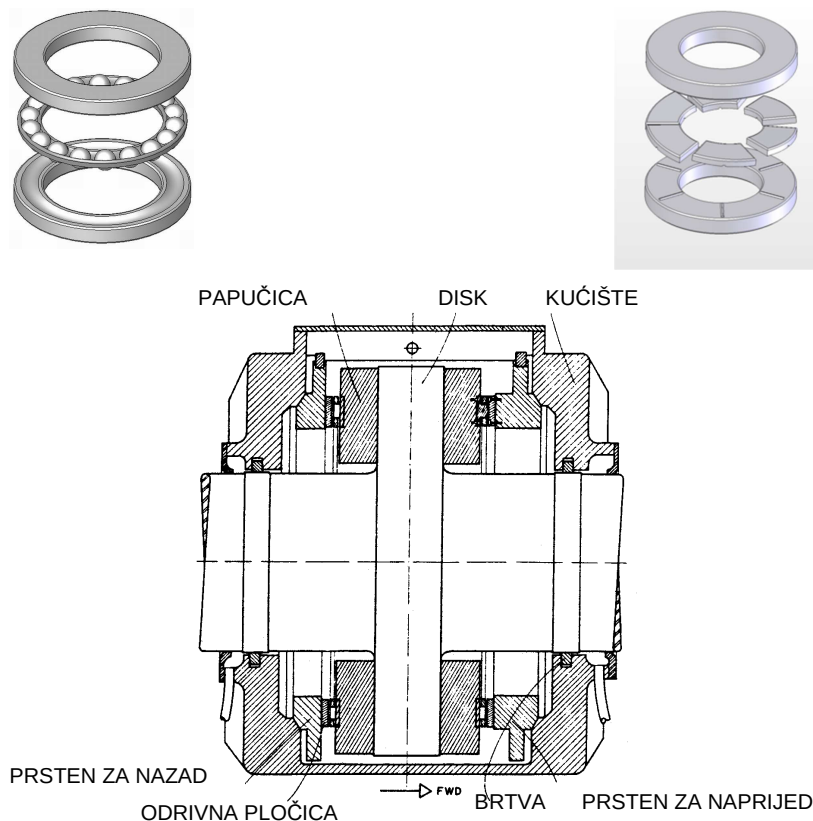
Ležajevi su nosači rotirajućih, oscilirajućih ili mirujućih strojnih dijelova. Prema izvedbi se dijele na klizne i kotrljajuće, a prema funkciji na aksijalne, radijalne ili radijalno-aksijalne. Radijalni ležajevi motora, turbina te osovinskog voda klizne su izvedbe.

1.2.4. Aksijalni (odrivni) ležaj

Preuzimaju porivnu silu stvorenu radom propulzora (brodskog vijka). Kao u slučaju radijalnih ležajeva za manje snage mogu se primjenjivati različite izvedbe, a za veće je redovito riječ o ležajevima tipa Michell¹⁴. Radi se o više slobodnih segmentnih elementata poslaganih oko vratila, koji se oslanjaju na rotirajući disk vratila. Između segmenata i rotirajućeg diska stvori se uljni film u obliku klina.

Kod propulzije sporookretnim dizelskim motorima ugrađuju se u kućište motora, obavezno između prvog temeljnog ležaja i ležaja zamašnjaka, a kod drugih porivnih sustava odzivni se ležaj ugrađuje na početku osovinskog voda.

Između prstena propelerne osovine i papučica (segmenata) ležaja stvara se prilikom rotacije tanki uljni film. Porivnu silu preuzimaju preko filma papučice i prenose je na prstenastu odzivnu pločicu, a s nje se, preko odzivnog prstena, sila prenosi na kućište ležaja. Kućište ležaja je na brodski trup spojeno vijcima koji u konačnici prenose porivnu silu propelera na brodski trup. U kućištu je ulje koje se može hladiti vodom, odnosno cijevnim izmjenjivačem topline uronjenim u ulje.



Slika 5. Lijevo gore je kuglični aksijalni, a desno gore aksijalni ležaj s kliznim segmentima. U donjem dijelu prikazan je odzivni brodski ležaj s odzivnom osovinom

1.2.5. Propulzor

Porivna sila nastaje kao rezultat kretanja propulzora kroz vodu. Vrste propulzora su:

- kola,

¹⁴ Čita se kao Mitchell. Riječ je o australskom inovatoru, koji ga je patentirao 1905. godine.

- vijčani,
- mlazni,
- cikloidni.

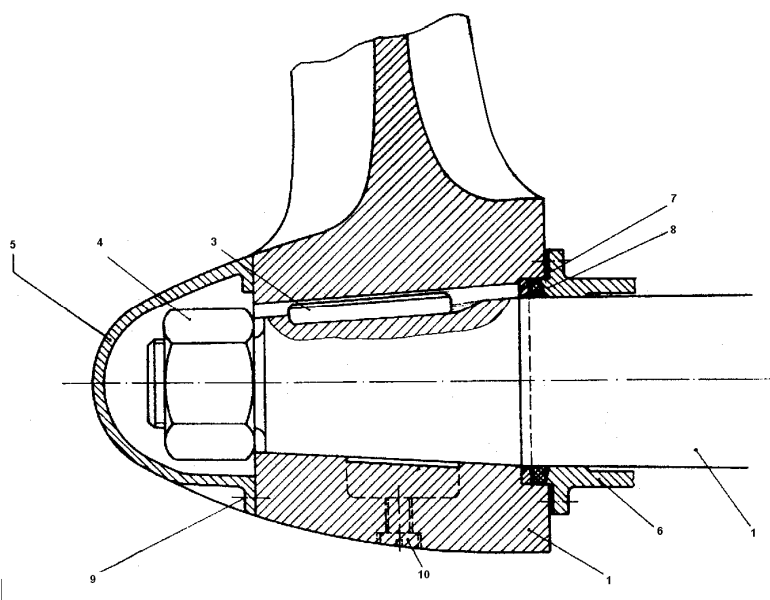
Za velike nosivosti brodova i velike instalirane snage, koristi se gotovo isključivo brodski vijak (propeler). Presjek krila broskog vijka je takav da se uslijed njegovog okretanja javlja razlika tlaka na prednjoj i stražnjoj strani krila. Zbog veće brzine strujanja vode uz pramčanu površinu krila propelera na krmenu površinu djeluje veći tlak te propeler gura brod prema naprijed.

Promjer, oblik, veličina ili broj krila odabiru se s ciljem postizanja najbolje iskoristivosti za određeni oblik broskog trupa. Broj krila kreće se od dva (samo mala plovila) do sedam (podmornice), a u trgovačkoj mornarici najčešće iznosi tri, četiri ili pet. Kod ovakvih propelera glavčina i krila propelera mogu biti jedno tijelo, ali ima izvedbi kod kojih se krila pričvršćuju na glavčinu. Prednost je takvog rješenja u lakšem održavanju.

Postoje propeleri sa zakretnim krilima ili promjenjivim usponom (CPP od engl. controlable pitch propeller). Prednost je u jednostavnijem postupku manevriranja brodom te manjim troškovima prilikom oštećenja jer ukoliko je oštećeno, može se skinuti samo jedno krilo.

Properi mogu biti desnokretni i lijevokretni. Kada se vijak, gledan iz pravca krme prema pramcu, u vožnji naprijed, okreće u smjeru kazaljke sata, naziva se desnokretni. Ukoliko se poriv ostvaruje s dva vijka, redovito je jedan desnokretni, a jedan lijevokretni. Ukoliko rotiraju u istom smjeru nazivaju se *tandem vijci*. Takođe, mogu se izvesti s prekrivanjem krila. Vijci tada imaju fazni pomak ili uzdužni pomak kako se krila ne bi doticala. Izvedba s dva vijka na istom vratilu, koji se okreću u suprotnim smjerovima, naziva se kontrarotirajući propeler.

Način učvršćenja vijka na vratilo prikazan je na slici 6. Glavčina (2) se na propelerno vratilo (1) pričvršćuje preko konusnog spoja, s ili bez klina. Koničnost ne smije biti veća od 1:12 za slučaj spoja s klinom (3) i ne veća od 1:15 za slučaj spoja bez klina¹⁵. Na kraju propelernog vratila (manjeg promjera) jest navoj za osiguravajuću maticu (4). Redovito je smjer navoja obrnut od smjera okretanja propelera pri vožnji naprijed. Na maticu se postavlja zaština kapa (5) protiv vrtloženja.

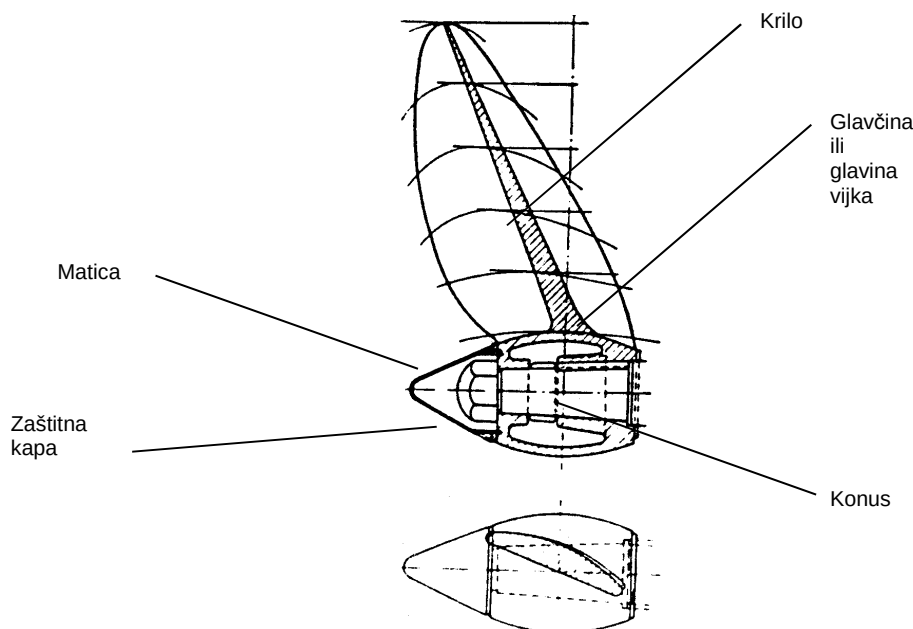


Slika 6. Konus propelernog vratila, tj. spoj s glavčinom propelera i oznaka konusa. Klin je opcija. Ostali dijelovi na slici: 6 – košuljica brtvenice, 7 – brtveni prsten, 8 – prstenasta brtva, 9 - svornjak, 10 - čep

¹⁵ Moment se s propelernog vratila na glavčinu prenosi trenjem, a ne klinom.

Brodski se vijci izrađuju iz bronce, mjedi (mesinga), lijevanog željeza ili čeličnog lijeva. Ako se krila pričvršćuju prirubnicom obično se izrađuju iz specijalne mjedi, a glavčina iz lijevanog željeza ili čelika. Zbog olakšanja konstrukcije glavčina vijka je šuplja, osim na mjestu klina.

Oblik, uspon i broj krila propelera može se približno odrediti prema prethodnim spoznajama za već izgrađene brodove sličnih karakteristika. Provjera uspješnosti izvedbe porivnog sklopa vrši se nakon što je brod izgrađen, mjerenjima na mjernoj milji.



Slika 7. Glavčina s krilom broskog vijka u dva pogleda

1.2.5.1. Prekretanje propelera s fiksnim krilima

Kada se radi o propeleru s fiksnim krilima, za vožnju unazad treba obrnuti smjer vrtnje propelera. To se može izvesti prekretnim reduktorom (manje porivne snage) ili preokretanjem porivnog stroja. Kod parnoturbinskih poriva postoji turbina za vožnju unazad pa se preokretanje izvodi relativno jednostavno. Elektromotori se također jednostavno okreću, promjenom redoslijeda faza¹⁶. Kod stapnih parnih strojeva preokretanje se izvodilo daleko jednostavnije nego kod dizelskih motora, no u oba se slučaja prilikom preokretanja javljaju velike sile na stapni mehanizam. U ovisnosti o nosivosti broda i plovidbenoj brzini potrebno je i nekoliko minuta kako bi se nakon prekida pogona brod dovoljno usporio te moglo izvršiti preokretanje.

1.2.5.2. Propeler u sapnici

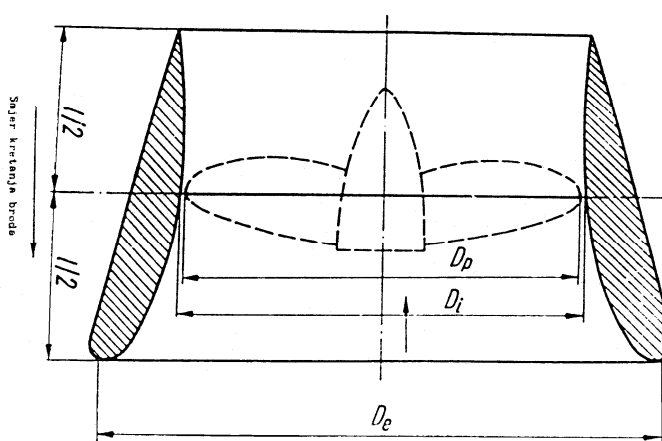
Sapnica se primjenjuje kako bi štitila propeler, usmjerila na propeler vodu, a povećava i stupanj iskoristivosti poriva¹⁷. Na slici 8 prikazan je propeler u sapnici. Takve su izvedbe česte kod brodova koji moraju imati veće manevarske sposobnosti (remorkeri).

¹⁶ Elektromotori izmjenične struje velikih snaga su trofazni pa se zamjenom dvaju faza mijenja smjer vrtnje.

¹⁷ Ne ulazeći u pretjerano teoretiziranje, oblikom presjekam sapnice (Kortova sapnica) može se proizvesti manja komponenta sile prema naprijed (poriv).

„Kortova“ sapnica predstavlja tunel u obliku mlaznice. Upadni brid je zaobljen, a izlazni oštar. Oblik presjeka sapnice sličan je obliku krila propelera ili avionskog krila. Može se izvesti na način da ubrzava strujanje vode na propeler¹⁸ ili da ju usporava (decelerirajuća, zbog kavitacije). Oblikom kao na slici strujanjem morske vode oko sapnice postiže se i porivna sila, tj. povećava se iskoristivost propulzije. Na slici je profilirana strana okrenuta prema unutrašnjosti, ali ima sapnica s vanjskom profiliranom stranom. Vijak se smješta na polovici duljine sapnice, na mjestu najmanjeg promjera.

Sapnica povećava iskoristivost poriva jer usmjerava veću količinu vode na propeler¹⁹. Kod nekih se konstrukcija zbog njezinog oblika stvara i aksijalna sila u smjeru kretanja broda te se kod nekih izvedbi može postići 10 %-tna ušteda snage uz isti stupanj iskoristivosti.



Slika 8. Propeler u sapnici: l – duljina sapnice, D_p – vanjski promjer propelera, D_i – najmanji unutarnji promjer sapnice, D_e – upadni promjer [8]

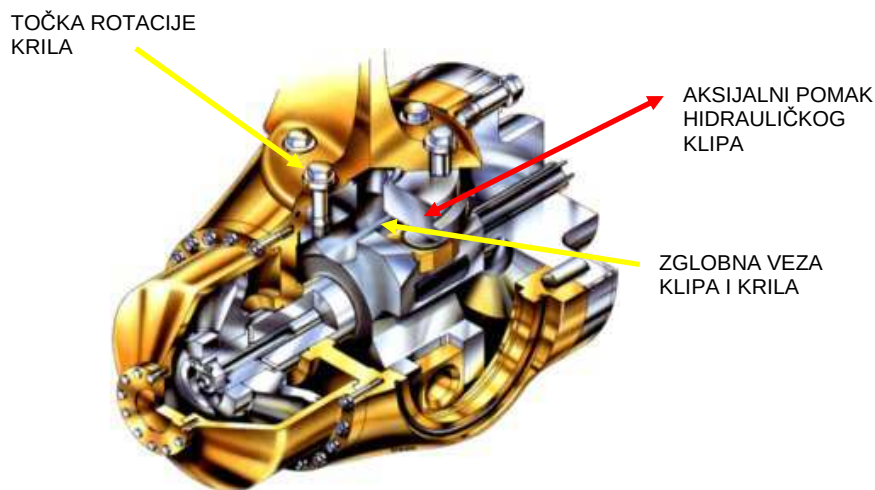
1.2.5.3. Propeler s promjenjivim usponom krila

Na slici 8 lijevo, također se vidi da je riječ o propeleru sa zakretnim krilima tj. s promjenjivim nagibom krila. Za časnike palube to je važna činjenica jer se ostvarenje promjene brzine i smjera vožnje postiže bitno drukčije nego kod propelera s fiksnim nagibom.

Sljedeća slika prikazuje djelomični presjek glavčine i mehanizam za zakretanje u njezinoj unutrašnjosti. Svako krilo može rotirati oko centralne osi uslijed čega dolazi do promjene uspona krila.

¹⁸ Kao na slici.

¹⁹ Upadni promjer je veći od vanjskog promjera propelera.

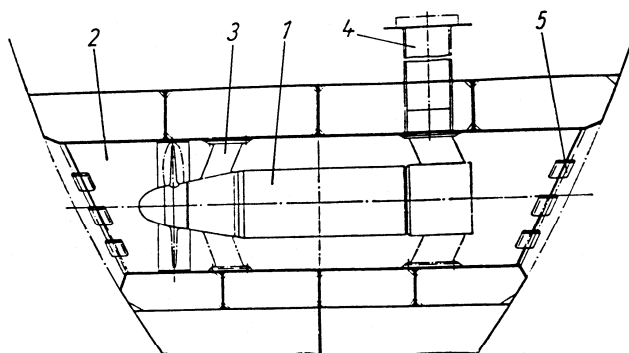


Slika 9. Glavčina propelera sa zakretnim krilima i mehanizam u unutrašnjosti iste [8]

1.2.5.4. Pramčani propeler

Funkcija je pramčanog propelera povećanje manevarskih sposobnosti broda, a nije poriv broda. Ispod vodene linije u pramčanom se dijelu brodske konstrukcije ugrađuje jedna ili više tunelskih cijevi te u svakoj od njih pramčani propeler kako je to u tlocrtu prikazano na slici 10. Radom pramčanog propelera stvara se aksijalna sila okomita na uzdužnu os broda te se njegovim radom lakše zakreće pramac broda.

Nekada su se pramčani propeleri ugrađivali samo na brodove koji su morali imati veće manevarske sposobnosti (plovidba kanalima i rijekama, česta uplovljavanja i isplovljavanja), dok je danas gotovo nezamisliv brod bez pramčanog propelera. Motorne jahte duljine svega 10-tak metara (i manje) imaju, tvornički ugrađene, pramčane propelere.



Slika 10. Pramčani propeler u tunelu: (1) pogonski elektromotor s vijkom, (2) tunel, (3) nosači ležajeva, (4) cijev za kablove i cijevi, (5) zaštitna rešetka

Pramčani se propeleri mogu pogoniti elektromotorima ili, danas vrlo često, hidromotorima²⁰. Pogon je prekratan kako bi se moglo mijenjati smjer strujanja vode kroz tunel. Zaštita od mehaničkih oštećenja izvodi se s rešetkama ili zaklopkama. Zaklopke u potpunosti zatvaraju tunel kada uređaj ne radi²¹.

²⁰ Primjena hidrauličkih sustava na brodu je posebno poglavlje.

²¹ U vrijeme pisanja ovog udžbenika, najveći putnički brod - 'Queen Mary 2', opremljen je s tri pramčana propelera. Zbog veličine otvora tunela javljali su se veliki hidrodinamički gubici te su otvori morali biti zatvoreni klapnama.

1.2.5.5. Podtrupni potisnik

Poriv broda ostvaruje se pomoću propelera s fiksnim krilima smještenim na kućište čahurastog ili mahunastog oblika (engl. pod), koje se može okretati u svim horizontalnim smjerovima (360°)²². Cjelokupni sklop čahurastog kućišta i propelera naziva se podtrupni potisnik, ali se vrlo često koristi naziv jednog od proizvođača - azipod.

Propeleri se najčešće postavljaju s prednje strane čahure kako bi se postiglo bolje nastrujavanje vode, ali ima izvedbi gdje su sa stražnje strane ili s obje. U odnosu na klasičan sistem propeler – kormilo, ova izvedba pruža bolje manevarske sposobnosti, smanjuju se troškovi i bolje koristi brodski prostor.

U osnovi postoje dvije izvedbe: s mehaničkim prijenosom i s električnim prijenosom snage. U ovisnosti o smjeru ulaznog vratila tj. izlaznog vratila pogonskog stroja mehaničko rješenje se naziva L-pogon ili Z-pogon. Kod prvoga je ulazno vratilo okomito, a izlazno (propelerno) horizontalno, dok je u drugom slučaju i ulazno horizontalno te mora postojati vertikalno postavljeno međuvratilo.

Kod električne izvedbe prijenosa snage u čahuru se smješta i pogonski stroj – elektromotor. Danas su to trofazni elektromotori. Budući da je propeler s fiksnim krilima, brzina broda se regulira promjenom broja okretaja propelera tj. promjenom broja okretaja elektromotora. Vrlo fina regulacija postiže se primjenom pretvarača frekvencije. Tvrtka *Asea Brown Boveri* zaštitila je naziv AZIPOD, zakretni podtrupni potisnik s električnim prijenosom snage.

Na slici 11 desno vide se dva propulzora smještena na desnom boku broda 'Queen Mary 2'. Ukupno ih je četiri, snage 20 MW svaki, od čega su dva fiksna i dva zakretna podtrupna potisnika.

1.2.5.6. Vibracije

Propeler je pored glavnog sporookretnog dizelskog motora najveći izvor vibracija broskog trupa. Vibracije propelera su torzione ili okretne te uslijed savijanja vratila. Torzione vibracije javljaju se uslijed naizmjeničnog djelovanja krila propelera, dok su vibracije savijanja posljedica ovješivanja propelera i različitih sila na krila propelera u ovisnosti o uronjenosti istih. Na intenzitet vibracija znatno utječe oblik broskog trupa, vrste strujanja fluida oko propelera i lista kormila te zapljuskivanje krme.



Slika 11. Primjeri podtrupnih potisnika

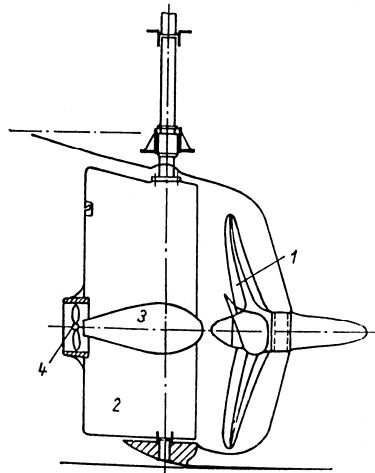
²² Ima rješenja i s fiksnim potisnikom.

1.2.5.7. Aktivno kormilo

Na listu kormila, poput prikazanog na slici 12, izvodi se strujno kućište u koje se smješta pogonski elektromotor direktno spojenog kormilarskog propelera u sapnici. Ovakvom se izvedbom povećavaju manevarske sposobnosti plovila, a zakretanje krme može se izvesti i u mirovanju broda. Klasično kormilo ne djeluje u mirovanju.

Ovakvo će kormilo biti to efikasnije što je kut otklona bliži 90° pa se kormilarski stroj mora izvesti s tim, povećanim, otklonom. Osim za kormilarenje, kormilarski se propeler može koristiti kao glavni propulzijski propeler kada se zahtijevaju male plovidbene brzine.

Primjenjuje se kod remorkera, trajekata, peljara i sl.



Slika 12. Aktivno kormilo: (1) glavni brodski vijak, (2) list kormila, (3) strujno kućište kormilarskog propelera, (4) kormilarski propeler u sapnici

1.2.6. Spojke

Spojke su strojni elementi kojima se povezuju vratila i prenosi moment. Kada se radi o porivu broda vratilo pogonskog stroja povezuje se s propelernim vratilom. Spojkom se prenosi moment s jednog na drugo vratilo. Uobičajeno je mišljenje da spojka podrazumijeva mogućnost isključivanja i uključivanja. To su uključive – isključive ili izvrstive spojke. Budući da se poriv brodova većih nosivosti ostvaruje najčešće sporookretnim motorima spojke u tom slučaju nisu isključive.

Spojke se mogu razvrstati u više kategorija, no sistematizacija nije jednoznačna pa će se ovdje spomenuti neki tipovi. Iz grupe krutih spojki, zbog vrlo česte primjene u brodskim pogonima, treba istaknuti kolutne ili tanjuraste spojke. Izvedene su u obliku prirubničkog spoja i za rastavljanje treba aksijalni pomak jednog od vratila (npr. propelernog). Pogonsko i gonjeno vratilo moraju biti dobro centrirana jer će se u protivnom javljati deformacije i oštećenja.

Primjenjuju se i druge izvedbe krutih spojki, ali i spojke koje omogućuju manje aksijalne, radijalne ili kutne pomake. Također, postoji više izvedbi izvrstivih spojki: kandžasta, lamelna tarna, hidrodinamička, elektromagnetska (indukcijska) i dr.

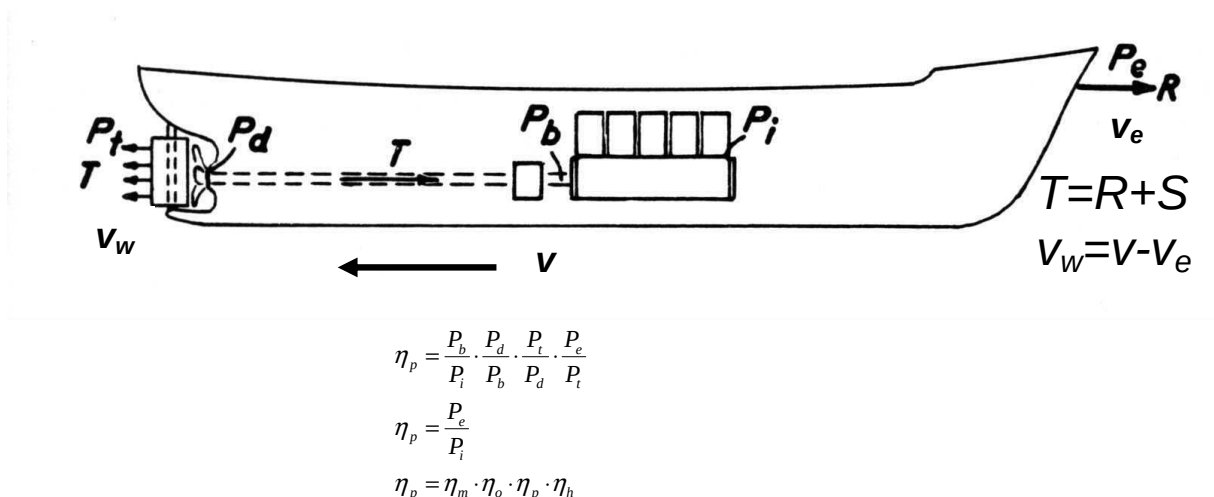
1.3. Stupanj iskoristivosti poriva

Toplinski stroj proizvodi indiciranu snagu P_i , koja se kod sporookretnih dizelskih motora izračunava na osnovi snimljenog stvarnog indikatorskog dijagrama. Na izlaznoj je prirubnici snaga manja P_b jer se dio gubi na savladavanje trenja i pogon privještenih uređaja. Ovdje je oznaka za b – brake jer se dobije na ispitnom stolu tvornice motora pomoću vodene kočnice. Omjer tih dvaju snaga predstavlja mehanički stupanj iskoristivosti motora η_m .

Dio snage potroši se na savladavanje trenja u ležajevima vratilnog voda te se na propeler dovodi samo snaga P_d . Odnos dobijene P_d i dovedene P_b je stupanj iskoristivosti vratila η_o . Zbog stupnja iskoristivosti propelera η_p od dovedene se snage iskoristi samo P_t , a zbog oblika i stanja trupa (korodiranosti i obraslosti s morskim organizmima) samo se efektivna snaga P_e iskoristi za poriv.

Efektivni stupanj iskoristivosti poriva može se izraziti kao umnožak omjera dobijenih i dovedenih snaga svakog elementa porivnog sustava, kao omjer iskorištene snage za poriv P_e i u proces dovedene snage P_i te kao umnožak stupnjeva iskoristivosti pojedinog elementa porivnog sustava.

Na shematskom prikazu na slici 13 su također naznačene sile i brzine, koje su, iako vektorske veličine, označene kao skalarne jer se smatra da su u pravcu gibanja broda. Sila poriva T prenosi se vratilnim vodom na odzivni ležaj, no samo se jedan njezin dio iskoristi za pogon broda prema naprijed – R .



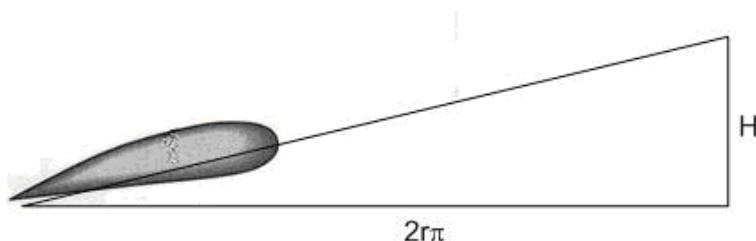
Slika 13. Osnovni tehnički pojmovi porivnog sustava, gdje su P_i – indicirana snaga porivnog stroja, P_b – snaga na prirubnici porivnog stroja (indicirana snaga umanjena za gubitke zbog trenja u samom stroju), P_d – snaga na propeleru (snaga na prirubnici umanjena za gubitke prijenosa, odnosno u ležajevima vratilnog voda, u reduktoru ako postoji), P_t – snaga koja se na propeleru iskoristi za poriv (P_d umanjena zbog stupnja iskoristivosti propelera), P_e – snaga koja se efektivno iskoristi za poriv broda (P_t umanjena zbog oblika i stanja trupa), v – brzina nestrujavanja mora, v_e – efektivna brzina broda, v_w – brzina s kojom more ima na izlazu iz propelera (kada bi $v=v_e$ iznosila bi 0), T – porivna sila stvorena radom propelera, R – sila koja se iskoristi za poriv broda, S – sila koja se može definirati kao sila šlepanja, odnosno sila koja bi se javila u užetu prilikom šlepanja, η_m – mehanički stupanj iskoristivosti porivnog stroja, η_o – stupanj iskoristivosti sustava prijenosa snage (vratilnog voda), η_p – stupanj iskoristivosti propelera, η_h – stupanj iskoristivosti trupa [8]

U drugim se izvorima koriste drukčiji pristupi u definiranju stupnja iskoristivosti. Neki autori uključuju toplinski stupanj iskoristivosti porivnog stroja. Takva definicija ima opravdanje, posebno ako se želi istaknuti efikasnost istog. Nadalje, na vratilni se vod mogu privjesiti uređaji koji oduzimaju snagu, npr. *osovinski* generator ili pumpe pa se i to može uzeti u obzir.

Ako je riječ o elektromotornom porivu, umjesto vratilnim vodom, snaga se prenosi električnim vodičem. Gubitak u istom analogan je gubicima u ležajevima vratilnog voda. Neki autori u stupanj iskoristivosti poriva ne svrstavaju iskoristivost trupa.

1.4. Slip ili skliz

Skliz je veličina koja uspoređuje stvarnu brzinu²³ broda s njegovim teoretskim napredovanjem. Kada bi se vijak kretao kroz kruto tijelo za jedan bi se puni okret pomaknuo prema naprijed (u smjeru plovidbe) za veličinu H [m] kao na slici 14. Veličina H naziva se uspon vijka. Većinom je uspon konstantan po cijeloj visini krila, ali ima izvedbi gdje je uspon veći na glavčini i pada prema obodu krila. U tom se slučaju pod pojmom *uspon vijka* podrazumijeva srednji uspon.



Slika 14. Uspon vijka H za jedan okret [8]

Vijak se međutim okreće u fluidu te se u stvarnosti brod giba stvarnom brzinom v_e [m/s; čv].

Skliz se računa prema izrazu

$$s_p = 1 - \frac{v}{\frac{Hn}{60}},$$

ako je broj okretaja propelera n izražen po minuti. Desna strana može se množiti sa 100 kako bi dobili %-tke.

Primjer: Ako motor daje 90 okr/min, uspon krila iznosi 5 m, a brod plovi brzinom od 13,5 čv, koliko iznosi slip?

Rješenje:

Uvrštavanjem odgovarajućih mjernih jedinica dobije se

$$s_s = 1 - \frac{v_e}{\frac{Hn}{60}} \Rightarrow s_s = 1 - \frac{13,5 \cdot 1852}{\frac{5 \cdot 90}{60}} = 0,074 \text{ ili } 7,4 \, \%.$$

Slip je pri pokretanju broda najveći i iznosi 100 %, a s povećanjem brzine se smanjuje. Slip je najmanji pri optimalnoj plovidbenoj brzini i mirnom moru, ali ovisi i o obliku uronjenog dijela trupa, stanju podvodnog dijela i dr. Prividni se obično kreće u rasponu od 10 do 15 %, a stvarni je veći i kreće se u rasponu od 15 do 25 %. Brod koji plovi u balastu, kod jako nemirnog mora ima veliki slip. Komandant može odlučiti nakrcati dodatni balast pa tako tankeri, iako je cjevovod balasta potpuno odvojen od tereta, koriste tankove balasta u nuždi (engl. heavy weather ballast tanks) - tankove tereta predviđene za ovu svrhu.

²³ Brzina broda može se mjeriti pitot-ovom cijevi, satelitskim sustavom i dr. O načinu mjerenja ovisi i preciznost metode jer brzina kretanja broda i brzina u suprotnom smjeru nautrujavanja vode nije jednaka.

1.5. Mjerenje snage poriva

Osovinski se vod uslijed momenta na vijak deformira. Mjerenjem deformacija²⁴, uređajem koji se zove torziometar (npr. Brolichev torziometar) te za poznate parametre plovidbe slijedi

$$P_s = M_t \omega$$

$$\omega = 2\pi n$$

gdje je ω [s⁻¹] kutna brzina, a M_t [Nm] torzioni moment na vijku. Torziono naprezanje na vratilu dato je izrazima

$$\tau = \frac{M_t}{W_p},$$

te prema Hookovom zakonu

$$\tau = E\varepsilon,$$

gdje je W_p otporni moment vratila, E modul elastičnosti materijala vratila, a ε relativna deformacija vratila. Izjednačavanjem gornjih dvaju izraza, sređivanjem za M_t i uvrštavanjem u izraz za snagu slijedi

$$P_s = E \cdot W_p \cdot \varepsilon \cdot 2\pi \cdot n,$$

pa je lako uočiti da je mjerenjem broja okretaja vratila (vijka) n i deformacije vratila ε moguće izračunati snagu. Može se pisati

$$P_s = K \cdot f(\varepsilon \cdot n)$$

pri čemu je K konstanta ovisna o karakteristikama materijala i dimenzijama vratila.

Osim tenzometarskom trakom mogu se deformacije vratila mjeriti i optički, no princip izračunavanja snage je isti.

Nedostatak ovih dvaju metoda leži u činjenici da se mjerenje vrši na vratilu. Tako izmjerena snaga manja je u odnosu na snagu motora zbog gubitaka uslijed trenja u ležajevima vratilnog voda. Drugim riječima, niti indicirana snaga samog stroja niti snaga na izlaznoj prirubnici vratila nisu poznate.

Snaga dizelskih motora može se izračunavati snimanjem stvarnog indikatorskog dijagrama. Na glavi svakog cilindra, između ostalog, nalazi se i indikatorski pipac na kojega se postavi uređaj indikator. Mogu se snimati otvoreni, zatvoreni te češljasti²⁵ dijagram. Za mjerenje snage potreban je zatvoreni dijagram svakog cilindra. Na osnovi površine zatvorenog dijagrama te konstante indikatora određuje se srednji indicirani tlak te indicirana snaga svakog cilindra prema izrazu

$$P_i = \bar{p}_i \frac{D^2 \pi}{4} \cdot \frac{S \cdot n}{30} \cdot \tau,$$

gdje je D [m] promjer cilindra, S [m] stapaj (hod stapa ili klipa, razlika između gornje i donje mrtve točke), n broj okretaja u minuti te τ taktnost (za dvoradne motore iznosi 1, za dvotaktne

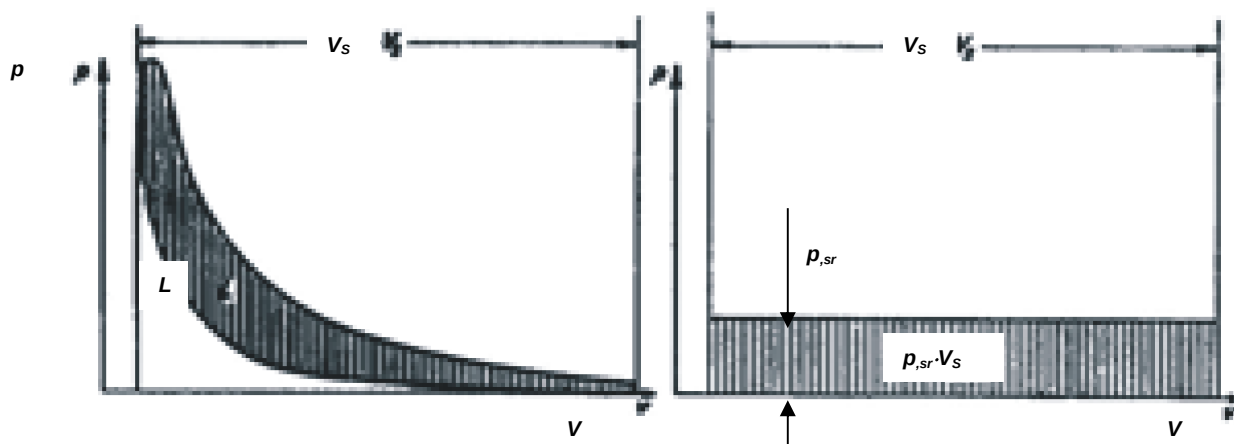
²⁴ Na vratilo se lijepi tenzometarska traka koja se deformacijom vratila također deformira jer da električni otpor vodiča ovisi o duljini i promjeru istog, a deformacijom se mijenja električni otpor trake te u konačnici jakost struje u strujnom krugu kojega je traka dio.

²⁵ Može se snimati i dijagram sa slabom oprugom kako bi se iscrtao detalj usisa, koji je zbog malih razlika tlaka na normalnom zatvoranom dijagramu nevidljiv.

$\frac{1}{2}$, a za četverotaktne $\frac{1}{4}$). Ukupna indicirana snaga motora je za k cilindara jednaka

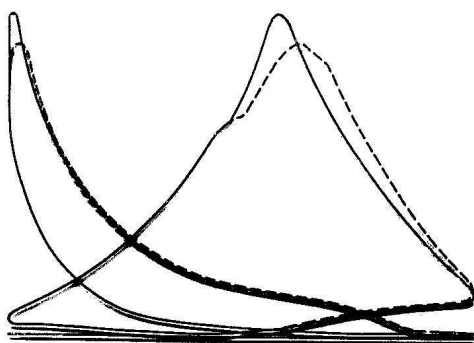
$$P_{i,uk} = \sum_{i=1}^k P_i.$$

Postupak je složen i zahtijeva dosta vremena, kako za snimanje dijagrama tako i za određivanje površine snimljenih dijagrama tj. srednjeg indiciranog tlaka te se danas koristi samo kao kontrola. Površina unutar zatvorene krivulje dijagrama predstavlja rad jednog ciklusa pa iz pravokutnika jednake površine i duljine, slijedi visina pravokutnika koja odgovara srednjem indiciranom tlaku, kako je prikazano slikom 15.

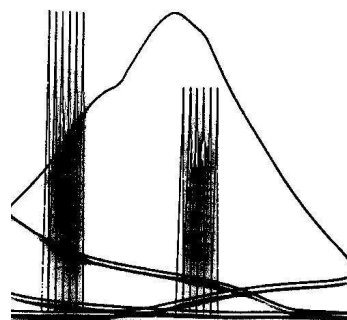


Slika 15. Indikatorski dijagram te pravokutnik jednake površine visine srednjeg indiciranog tlaka

Osim za mjerenje indicirane snage, iz snimljenih se indikatorskih dijagrama mogu uočiti karakteristične veličine procesa – maksimalni tlak (izgaranja) te tlak kompresije, kao i nepravilnosti u radu motora. Na slikama 16 i 17 prikazani su otvoreni i zatvoreni dijagrami te češljasti dijagrami, koji se obično snimaju za četverotaktne motore. Crtkana krivulja otvorenog i zatvorenog dijagrama na slici 15 pokazuje smanjeni tlak izgaranja. Krivulja otvorenog pokazuje još i jednak tlak kompresije, ali kasnije ubrizgavanje. Posljedica toga je smanjeni maksimalni tlak te u konačnici, smanjena iskoristivost motora.



Slika 16. Otvoreni i zatvoreni indikatorski dijagram [7]



Slika 17. Češljasti dijagrami pokazuju tlak izgaranja te pri prekinutoj dobavi goriva u cilindar tlak kompresije [7]

Budući da se praćenje rada strojnog kompleksa vrši uz pomoć računala, danas postoji i znatno jednostavniji, pouzdaniji te po potrebnom vremenu izračuna, daleko povoljniji način mjerenja snage glavnog stroja. Zbog elektroničke regulacije rada motora mora se elektronski

mjeriti broj okretaja koljениčastog vratila motora te njezin položaj (kut koljena). Ako je poznat i tlak u cilindru moguće je dobiti digitalnu verziju stvarnog indikatorskog dijagrama (na monitoru ili se, po pozivu, može ispisati na pisaču).

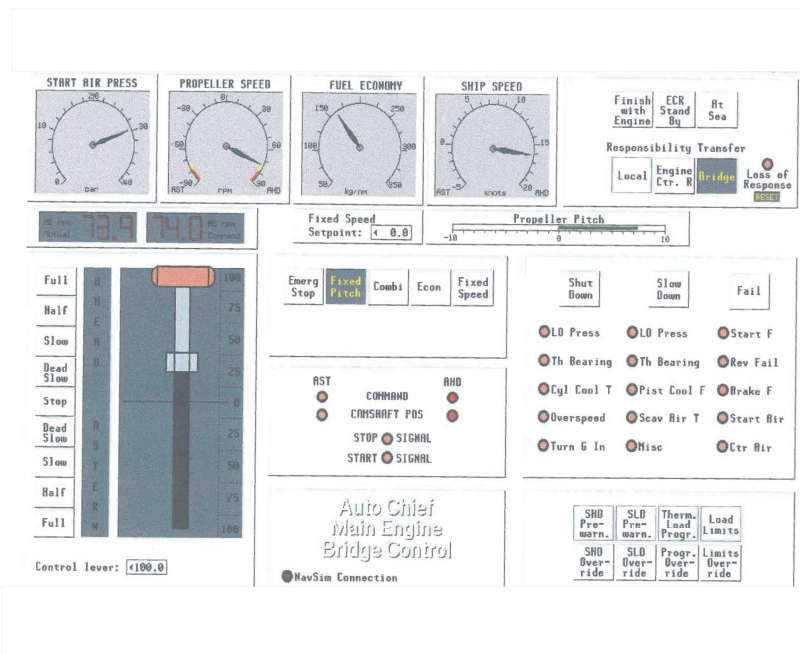
Srednji indicirani tlak u cilindru mjeri se mjerenjem deformacija kotvenih vijaka glave cilindra²⁶. Novije izvedbe motora imaju kontinuirano mjerenje trenutnog tlaka u cilindru pa se može dobiti kompletan indikatorski dijagram, a svi se podaci mogu izračunati.

²⁶ I u ovom se slučaju na vijak lijepi tenzometarska traka. Deformacije vijka su proporcionalne srednjem indiciranom tlaku, a ne trenutnom tlaku (jer su promjene tlaka prebrze).

2. PORIVNI STROJEVI

Za razliku od obvezne literature ovdje će se dati samo osnovne teoretske postavke i konstrukcijske karakteristike, dok će se više pažnje posvetiti upravljanju, kontroli, zaštiti u radu porivnih strojeva te postupcima koje izvršava, u normalnom radu ili nuždi, časnik palube.

Naravno, zbog više puta istaknute učestalosti primjene, najviše će se pažnje posvetiti sporookretnim dizelskim motorima. Na slici 18 prikazana je upravljačka konzola glavnog porivnog stroja na mostu. Osim manjeg broja analognih indikatora gotovo je identična upravljačkoj konzoli glavnog motora u kontrolnoj prostoriji strojarnice.



Slika 18. Upravljačka konzola na mostu

Na konzoli se nalaze samo najosnovniji indikatori: tlaka startnog zraka, broja okretaja propelera tj. glavnog stroja, potrošnje goriva i brzine broda, ali i zaštitni parametri koji dovode najprije do automatskog smanjenja broja okretaja, a zatim i do zaustavljanja ili onemogućuju upućivanje. Ovdje je konzola prikazana samo kao argument za potrebu podučavanja budućih časnika palube osnovnim znanjima o porivnim strojevima.

2.1. Dizelski motori

Dizelski motori su (toplinski) strojevi u kojima se kemijska energija goriva pretvara u mehanički rad. Kemijska energija sadržana u gorivu izgaranjem (oksidacijom) pretvara se u toplinsku. Ekspanzijom plinova djeluje se na stap ili klip, čije se pravocrtno kretanje uzduž košuljice pomoću stapnog ili klipnog mehanizma pretvara u kružno gibanje koljeničastog vratila.

Do zapaljenja i izgaranja goriva dolazi najčešće u samom cilindru, ali kod nekih konstrukcija u pretkomorama ili vrtložnim komorama stoga se svrstavaju u motore s unutrašnjim izgaranjem. U tu grupi svrstavaju se i motori koji koriste lake frakcije nafte (benzinski, Otto motori), no ovdje se neće razmatrati.

Podjela dizelskih motora može se provesti prema više kriterija i data je u sljedećoj tablici. Karakteristike koje prevladavaju ispisane su podebljano. Dakle, dizelski motori koji se najčešće koriste za poriv brodova imaju sljedeće karakteristike: dvotaktni su, jednoradni, koriste tekuće gorivo (uglavnom teško), s turbopunjenjem, direktnim ubrizgavanjem goriva u cilindarski prostor, izvode se s križnom glavom, i sporookretni su.

Tablica 1. Podjela dizelskih motora [8]

Prema odvijanju radnog ciklusa	2^t (dvotaktni)
	4 ^t (četverotaktni)
Prema načinu djelovanja	Jednoradni
	Dvoradni
	Tekuće
Prema vrsti goriva	Plinovito
	Dvojno (engl. dual fuel)
	S prednabijanjem
	Bez prednabijanja
Prema punjenju cil. zrakom	Jednokomorni prostori za izgaranje (direktno ubrizgavanje)
	Dvokomorni prostori za izgaranje (s pretkomorom ili vrtložnom komorom)
Prema geometriji prostora izgaranja	S križnom glavom
	Bez križne glave
Prema konstrukciji	Prekretni
	Neprekretni
Prema preketanju	Sporookretni (do 200 ili 300 okr/min)
	Srednjeokretni (od 200-300 do 800-1000 okr/min)
Prema okretnosti	Brzookretni (više od 800 do 1000 okr/min)
	Glavni (poriv broda)
	Pomoćni (Pogon generatora električne struje)
Prema namjeni (brodski)	Ostalo (čamci za spašavanje i dr.)
	Linijski
	V, W
Prema rasporedu cilindara	Ostalo (L, zvjezdasti i dr.)
	Pravocrtno
	Okretno (wankel)
Prema gibanju radnog elementa	

Iz oznaka sporohodnih motora triju vodećih svjetskih proizvođača:

- Sulzer tj. Wärtsilä-Sulzer tip 6RTA84 i 9RTFLEX60C,
- MAN B&W tipovi 7S50ME-C i 7S50MC-C te
- MITSUBISHI

moгу se odrediti brojevi i promjeri cilindara te Oznake serije kao i neke konstrukcijske karakteristike. Oznaka modernog motora RTFLEX serije ima značenje kao što slijedi

$\underbrace{9}_{\text{broj cilindara}} \underbrace{\text{RTFLEX}}_{\text{oznaka serije}} \underbrace{60}_{\text{promjer cilindra}}$
, gdje je promjer izražen u centimetrima, a oznaka serije upućuje da se u

osnovi radi o RTA konstrukciji, ali s izmjenjenim sustavom ubrizgavanja goriva i otvaranja ispušnog ventila te elektronskom regulacijom. Slično je i s proizvođačem MAN B&W gdje je MC serija konstrukcijski ista kao ME, ali s elektronskom regulacijom. Svi navedeni motori imaju linijski raspored cilindara.

Bitna je **maksimalna trajna snaga**²⁷ (**MCR** – engl. maximum continuous rating) te **broj okretaja**, kao i neke termodinamičke veličine procesa u cilindrima motora (tlakovi i temperature). Uobičajeno je korištenje pogonskog stroja s opterećenjem kod kojega ima najveći stupanj iskoristivosti, odnosno najmanju specifičnu potrošnju goriva, a iznosi oko 80 % MCR. U iznimnim situacijama opasnosti motor se može neko vrijeme (do 1 h) i preopteretiti do 110 % MCR.

Tlakovi kompresije (po završetku kompresije ubrizgava se gorivo) kreću se između 9 i 12 MPa (120 bar), **maksimalni tlakovi izgaranja** oko 15 MPa (150 bar) i više, a **srednji indicirani tlak** do 2 MPa.

2.1.1. Radne tvari

Za rad dizelskog motora potrebno je gorivo (fosilno, bio), ulje za podmazivanje, voda za hlađenje te zrak za izgaranje goriva. U cilindru motora dolazi do izgaranja goriva, odnosno do pretvaranja kemijske energije goriva u toplinsku energiju. Kvalitetnije gorivo, gorivo veće ogrjevne moći ili vrijednosti, dat će potpunim izgaranjem više topline. Obično se daje podatak **donja ogrjevna moć** - H_d i za dizelska goriva o kojima je riječ kreće se u rasponu od 39000 – 42000 kJ/kg goriva. Za gorivo koje ima veću ogrjevnu moć kaže se da je kaloričnije te rad motora s takvim gorivom rezultira manjom potrošnjom.

Gustoća je odnos mase i volumena tvari - ρ [kg/m³; t/m³] i obrnuto proporcionalno je ovisna o temperaturi²⁸. Stoga za relevantnost podatka o gustoći mora biti navedena temperatura. Obično je za gorivo referentna gustoća kod 15°C. Svi veći proizvođači goriva daju tablične ovisnosti ili matematičke izraze za određivanje gustoće goriva iz svoje palete proizvoda kod različitih temperatura. Situacija kod koje je bitno znati ovisnost gustoće i temperature goriva jest ukrcaj (u žargonu 'bunker'). Skladišni tankovi pune se do vrha (98 % visine). Sondiranjem se mjeri visina u tanku, a zatim se iz *plana kapaciteta*²⁹ na osnovi visine određuje volumen goriva u tanku. Razmislite, što bi se desilo u situaciji kada dobavljač goriva tvrdi kako je isporučeno gorivo temperature 60°C, a gorivo je u stvari zagrijano na 70°C (što časnik nije uočio)?

Viskozitet (viskoznost, žitkost) je svojstvo fluida da se opire gibanju. I za ovu je fizikalnu veličinu bitna temperatura. Obično se koristi **kinematički viskozitet** - ν [St, cSt]. i u slučaju tekućina obrnuto je proporcionalan temperaturi, tj. ako je gorivu potrebno smanjiti viskozitet grije ga se i obratno. Gorivo se grije kako bi se moglo transportirati pumpama³⁰, kako bi se moglo pročititi u separatorim ili fino raspršiti u cilindrima motora. U sustavima goriva ugrađuju se osjetnici za mjerenje i reguliranje viskoziteta.

Tvari prisutne u gorivu mogu biti štetne po rad motora, odnosno za neke dijelove motora, ili što je možda još i važnije, mogu biti štetne po okoliš. Dizelska goriva sadrže sumpor. Izgaranjem sumpora (**S**) nastaju sumporni oksidi (SO₂, SO₃), a izgaranjem vodika (H) nastaje vodena para (H₂O). Kod nižih temperatura u cilindru (završetak takta ekspanzije) dolazi do kondenzacije vodene pare te može nastati sumporna kiselina (H₂SO₄) ili sumporasta kiselina (H₂SO₃). To se naziva **niskotemperaturna korozija**. Košuljice se štite podmazivanjem

²⁷ Teoretski, kada ne bi bilo zastoja u radu, motor bi tu snagu mogao davati tijekom neograničenog vremena. Motor se može i preopteretiti pa postoji i pojam maksimalna kratkotrajna snaga. Budući kupci manjih dizelskih motora (za manja plovila) trebaju paziti na deklaracije proizvođača motora jer neki navode upravo ovu, kratkotrajnu snagu.

²⁸ Gustoća se odnosi obrnuto proporcionalno prema specifičnom volumenu $\rho \sim 1/\nu$, a većina se tehničkih materijala pa tako i gorivo s povećanjem temperature šire.

²⁹ Za sve brodske tankove tablice daju ovisnost visine tekućine u tanku i volumena.

³⁰ Teška nafta kod sobne temperature može biti čak kruta.

posebnim (lužnatim³¹) cilindarskim uljem i hlađenjem visokotemperaturnom slatkom rashladnom vodom. Osim toga u atmosferi se stvaraju tzv. kisele kiše.³²

U gorivu mogu biti prisutni i metali vanadij (**V**) i natrij (**Na**). Jedna o teorija tvrdi da vanadij oksidira u vanadijev pentoksid (V_2O_5). Čestica istog prilikom ispuha iz cilindra ostane zarobljena između pladnja ispušnog ventila i njegovog sjedišta pa kako ventil zbog nje ne nasjeda dobro, vrući izgarni plinovi novog ciklusa prolaze, užare česticu koja kod novog otvaranja ventila biva odnešena zajedno s materijalom ventila. To se naziva **visokotemperaturna korozija**. Zbog oštećenja nastalih zbog visokotemperaturne korozije ispušne je ventile potrebno brusiti. Kako se brodovi u odredišnim lukama zadržavaju kraće od vremena potrebnog za skidanje, rastavljanje, brušenje i ponovnu montažu ispušnog ventila, na brodu se nalazi jedan potpuno ispravan sklop ispušnog ventila. Istrošeni ili oštećeni se tako zamjenjuje s ispravnim u kratkom roku, a tijekom plovidbe se istoga servisira i priprema za sljedeću zamjenu.

Štetni po okoliš su i dušični oksidi, no dušika je znatno više u zraku (79%) nego u gorivu. Udio NO_x spojeva u ispušnim plinovima raste s porastom temperature izgaranja te bi se s ciljem smanjenja emisije istih, toplinski proces trebao voditi s nižim tlakovima i temperaturama izgaranja. Nažalost, to je u suprotnosti s težnjom da proces ima najveći toplinski stupanj iskoristivosti.

Plamište je temperatura kod koje će se gorivo zapaliti kada se dovede vanjski izvor topline i gorjeti barem pet sekundi. Postoji metoda utvrđivanja kod otvorene i zatvorene posude, što mora biti naznačeno i za dizelska je goriva vrijednost relativno visoka. Vrijednosti plamišta dizelskih goriva su više od 60-tak°C. To bi empirijski značilo da se u otvorenu posudu s dizelskim gorivom sobne temperature može ubaciti šibica ili opušak, ali neće doći do zapaljenja.

Točka paljenja je temperatura pri kojoj će se gorivo ako mu se prinese vanjski izvor plamena zapaliti i nastaviti gorjeti, no za dizelski je proces značajnija veličina **točka samozapaljenja**. Kod te se temperature gorivo pali samo, a upravo je takva situacija u cilindru dizelskog motora kada se gorivo ubrizgava u cilindar u kojem je zbog kompresije visoka temperatura zraka.

Voda prisutna u gorivu umanjuje energetska vrijednost procesa jer mu voda isparavanjem oduzima toplinu. Bitna je jer se zbog grešaka u sustavu goriva (npr. pušta grijač dnevnog tanka) može pojaviti u većem udjelu. Tada se javljaju poremećaji u regulaciji viskoziteta, zaribavaju klipovi visokotlačnih pumpi i igle rasprskavača, okretaji motora padaju, a u drastičnom slučaju motor staje. Nove konstrukcije motora koriste vodu u procesu izgaranja s ciljem smanjenja maksimalnih temperatura (kako bi se smanjio udio dušičnih oksida). Voda se može dodavati ovlaživanjem ispirnog zraka³³, dodavanjem gorivu (stvaranjem emulzije) ili ubrizgavanjem direktno u cilindarski prostor.

Fosilna goriva imaju veću ili manju tendenciju stvaranja **koksnih naslaga** u prostoru izgaranja ili ispušnom vodu. Pojava je štetna jer se manja količina energije pretvara u toplinsku, a i naslage su opasne. Metode određivanja su Ramsbottom ili Conradson.

Oktanski broj goriva za benzinske motore pokazuje otpornost goriva na samozapaljenje. Goriva smjesa u otto motorima mora se paliti iskrom (svjećice). Za dizelska je goriva bitan podatak **cetanski broj** koji pokazuje zapaljivost goriva. Za sporookretne motore, gdje je gorivu na raspolaganju dulje vrijeme da potpuno izgori, koriste se goriva cetanskog broja 30, a kod brzohokretnih motora 70. Cetanski broj nekog goriva određuje se traženjem smjese

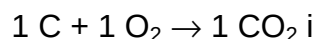
³¹ Zašto lužnatim?

³² Može se tretirati gorivo pa isto ima manje sumpora ili se ugrađuje katalizator koji tretira ispušne plinove.

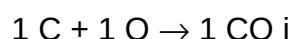
³³ Zrak za izgaranje. Zove se ispirni jer najprije istjeruje zaostale ispušne plinove iz cilindra i hladi cilindarski prostor.

cetana (cetanskog broja 100) i alfametilnaftalina (cetanskog broja 0) koja će dati iste karakteristike na ispitnom stroju (cooperation fuel research engine).

Zrak je smjesa plinova s približno 79% dušika (N_2) i 21% kisika (O_2), uz vrlo mali udio ugljičnog dioksida, plemenitih plinova (argona) i dr. Dušik je inertan plin, a kisik iz zraka potreban je za izgaranje. U proces izgaranja mora ući dovoljno kisika kako bi se postiglo **potpuno izgaranje**. Potpuno izgaranje ugljika (C) karakterizira nastajanje ugljičnog dioksida, a nepotpuno ugljičnog monoksida (CO). Za svaki element od kojeg se neko gorivo sastoji i koji sudjeluje u procesu izgaranja može se postaviti kemijska jednadžba i stehiometrijska jednadžba kao što je dolje dato za potpuno i nepotpuno izgaranje ugljika:



1 mol C + 1 mol $O_2 \rightarrow$ 1 mol CO_2 za slučaj potpunog izgaranja te



1 mol C + 1/2 mol $O_2 \rightarrow$ 1 mol CO za slučaj nepotpunog izgaranja.

Proizvođač goriva deklarira koliko u gorivu ima težinskih postotnih udjela ugljika, vodika, sumpora itd. Iz toga se točno može odrediti koliko je kisika potrebno za potpuno izgaranje 1 kg goriva te koliko je teoretski potrebno zraka. Zbog sigurnosti se u proces uvijek uvodi količina veća od teoretski potrebne i taj se omjer naziva **pretičak**. Dat je izrazom

$$\lambda_i = \frac{L_{stv}}{L_{teor}},$$

gdje je L_{stv} stvarna količina zraka, a L_{teor} teoretski potrebna količina za potpuno izgaranje. Gornji izraz vrijedi za sve procese izgaranja (plinske turbine, generatore pare, spaljivače smeća). Kod motora, posebno dvotaktnih, zrak najprije ispire cilindre pa su vrijednosti pretička veće. Osim toga, snaga dizelskih motora regulira se promjenom količine goriva, pri čemu se količina zraka ne mora bitnije mijenjati. Pretičak zraka može se kretati od vrijednosti 1,8 pri normalnom opterećenju do 8 pri vrlo malom opterećenju.

Ukupni pretičak jednak je umnošku pretička izgaranja i ispiranja pa je dan izrazom

$$\lambda_{II} = \lambda_i \cdot \lambda_s.$$

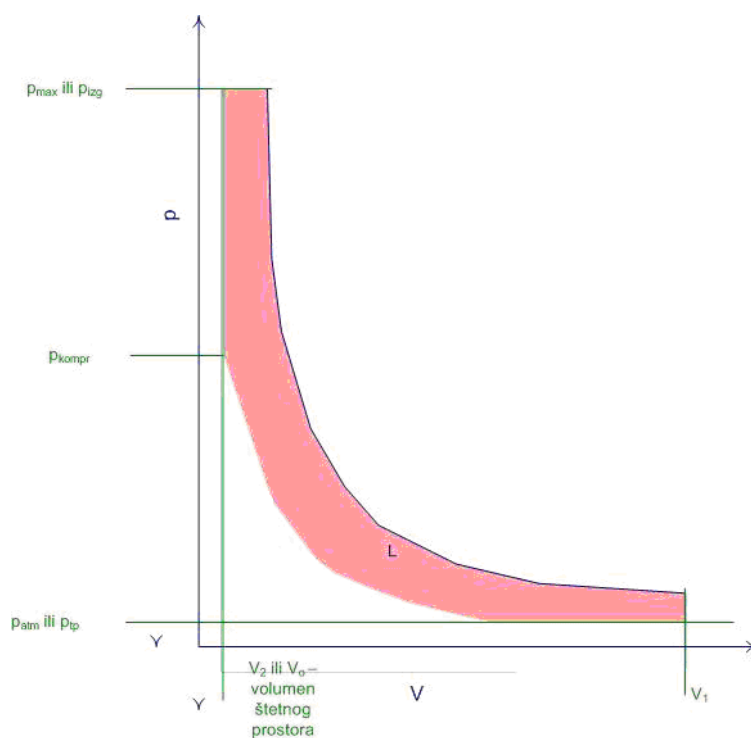
Za rad motora važna su i ulja za podmazivanje. Gustoća i kinematički viskozitet ulja za podmazivanje motora mijenjaju se s temperaturom na isti način kao kod goriva. Kinematički viskozitet ulja je daleko bitnija veličina. Ulje koje ima nisku vrijednost viskoziteta, zbog velikog površinskog pritiska, neće moći održati uljni film na mazivim površinama, dok će se hladno ulje visokih vrijednosti kinematičkog viskoziteta slabije razmazivati po površinama. Obje situacije rezultiraju ubrzanim trošenjem. Budući da viskozitet ulja ovisi o temperaturi, potrebno je znati kako će se on mijenjati s promjenom temperature. Gradijent promjene kinematičkog viskoziteta u ovisnosti o promjeni temperature iskazuje se **indeksom viskoznosti** (IV). Najbolja su ona ulja kojima se viskozitet slabo mijenja s temperaturom ($IV > 110$). Takva su višegradna (multigradna) ulja.

Neka svojstva ulja se postižu ili poboljšavaju dodavanjem **aditiva**. Uljima se dodaju aditivi protiv starenja, antioksidansi, disperzanti, protiv pjenjenja i drugi. Nadalje, ulja za dizelske motore su lužnata (jer su goriva zbog prisustva sumpora kisela), a posebno je to izraženo kod cilindarskog ulja.

2.1.2. Toplinski proces u dizelskom motoru

Stvarni proces koji se odvija u cilindrima modernih dizelskih motora najbliži je teoretskom procesu Sabathe' ili Seiliger. Slika 19³⁴ prikazuje teoretski suvremeni dizelski ciklus u p-V dijagramu.

U točki volumena V_1 , koji odgovara najvećem volumenu cilindra (stap je u donjoj mrtvoj točki) i tlaka p_{atm} (atmosferski tlak ili pretlak ako motor radi s prednabijanjem), uslijed gibanja stapa prema gornjoj mrtvoj točki započinje kompresija i teoretski traje do točke tlaka p_{kompr} i volumena V_2 ili V_o . To je kompresioni volumen. Kompresijom se zraku poveća temperatura, koja mora biti toliko da se ubrizgano gorivo zapali. Zbog toga dizelski motori rade s većim stupnjem kompresije (20-22) nego benzinski (12-13). Teoretski, tada se ubrizga gorivo i započinje gorenje pri konstantnom volumenu do točke maksimalnog tlaka izgaranja p_{izg} . Izgaranje goriva nastavlja se i nakon što se stap počne spuštati prema donjoj mrtvoj točki pri konstantnom tlaku. Gorivo ubrizgano u cilindarski prostor ne može, iz više razloga, izgoriti trenutno, već je za to potrebno izvjesno vrijeme. Stvarni se proces izvodi tako da se gorivo ubrizga nešto prije gornje mrtve točke. Po završetku izgaranja nastavlja se ekspanzija plinova do točke kojoj odgovara volumen cilindra kad je stap u donjoj mrtvoj točki - V_1 . Pri tom volumenu odvija se ispuh plinova. Stvarni se proces u dvotaktnom motoru dosta razlikuje od teoretskog, a prije svega zbog trenutka ubrizgavanja goriva te načina ispiranja clindara, tj. izmjene radnog medija.



Slika 19. Teoretski indikatorski dijagram Sabathe' procesa

Zatvorena osjenčana površina predstavlja korisni rad L jednog ciklusa. Predstavlja razliku između dobivenog rada (rad izobare produženog izgaranja i rad adijabate do početka ispuha) i utrošenog rada kompresije (adijabatska kompresija do početka ubrizgavanja goriva). Poznavajući početni tlak i temperaturu, kompresijski omjer, odnos tlaka izgaranja i kompresije te omjer ekspanzije može se odrediti toplinski stupanj korisnosti procesa η .

³⁴ Treba upozoriti da su krivulje adijabatske kompresije i ekspanzije crtane priručnim alatima te su prikazane izlomljeno.

Usporedbom površina teoretskog i stvarnog procesa (stvarnog indiciranog dijagrama, slika 14) dobije se stupanj savršenosti procesa η_s prema izrazu

$$\eta_s = \frac{A_i}{A_t} < 1,$$

a umnožak toplinskog stupnja iskoristivosti i stupnja savršenosti predstavlja indicirani stupanj korisnosti

$$\eta_i = \eta_t \cdot \eta_s,$$

a definiran je kao omjer stvarne indicirane snage i dovedene topline

$$\eta_i = \frac{P_i}{Q_{dov}}.$$

Daleko značajniji za procjenu rada motora je efektivni stupanj iskoristivosti i definira se kao omjer efektivne snage i dovedene topline, pri čemu je efektivna snaga $P_e = P_i - P_{tr}$, dakle indicirana snaga umanjena za snagu potrebnu za pogon privješanih uređaja, savladavanje trenja i dr.

$$\eta_e = \frac{P_e}{Q_{dov}} \text{ ili } \eta_e = \eta_t \cdot \eta_s \cdot \eta_m.$$

Efektivnu je snagu relativno lako izmjeriti na ispitnom stolu.

Proizvođači motora deklariraju η_m pa se iz izmjerene indicirane snage prema

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i}$$

može izračunati efektivna snaga ili deklariraju p_{tr} – tlak potreban za savladavanje trenja u motoru te se izračunava srednji efektivni tlak p_e prema $p_e = p_i - p_{tr}$, te konačno, prema donjem izrazu, efektivna snaga jednog cilindra:

$$P_e = p_e \frac{D^2 \pi}{4} \cdot \frac{S \cdot n}{30} \cdot \tau.$$

Čitalac se može prisjetiti izraza za efektivni stupanj propulzije gdje se ne uzima u obzir toplinski stupanj iskoristivosti niti stupanj savršenosti procesa. Ako ih se uzima u obzir slijedi drugi način definiranja

$$\eta_{e,pr} = \underbrace{\eta_m \cdot \eta_t \cdot \eta_s}_{\eta_e} \cdot \eta_o \cdot \eta_p \cdot \eta_h.$$

2.1.3. Konstrukcijske karakteristike sporookretnih dizelskih motora

Na slici 20 prikazane su dvije moderne konstrukcije sporookretnih dizelskih motora. Ključni sklop motora, onaj koji pretvara pravocrtno gibanje stapa u kružno gibanje koljeničastog vratila, naziva se stapni mehanizam³⁵ i kod ovih se konstrukcija sastoji od: (1) **stapa**, (2)

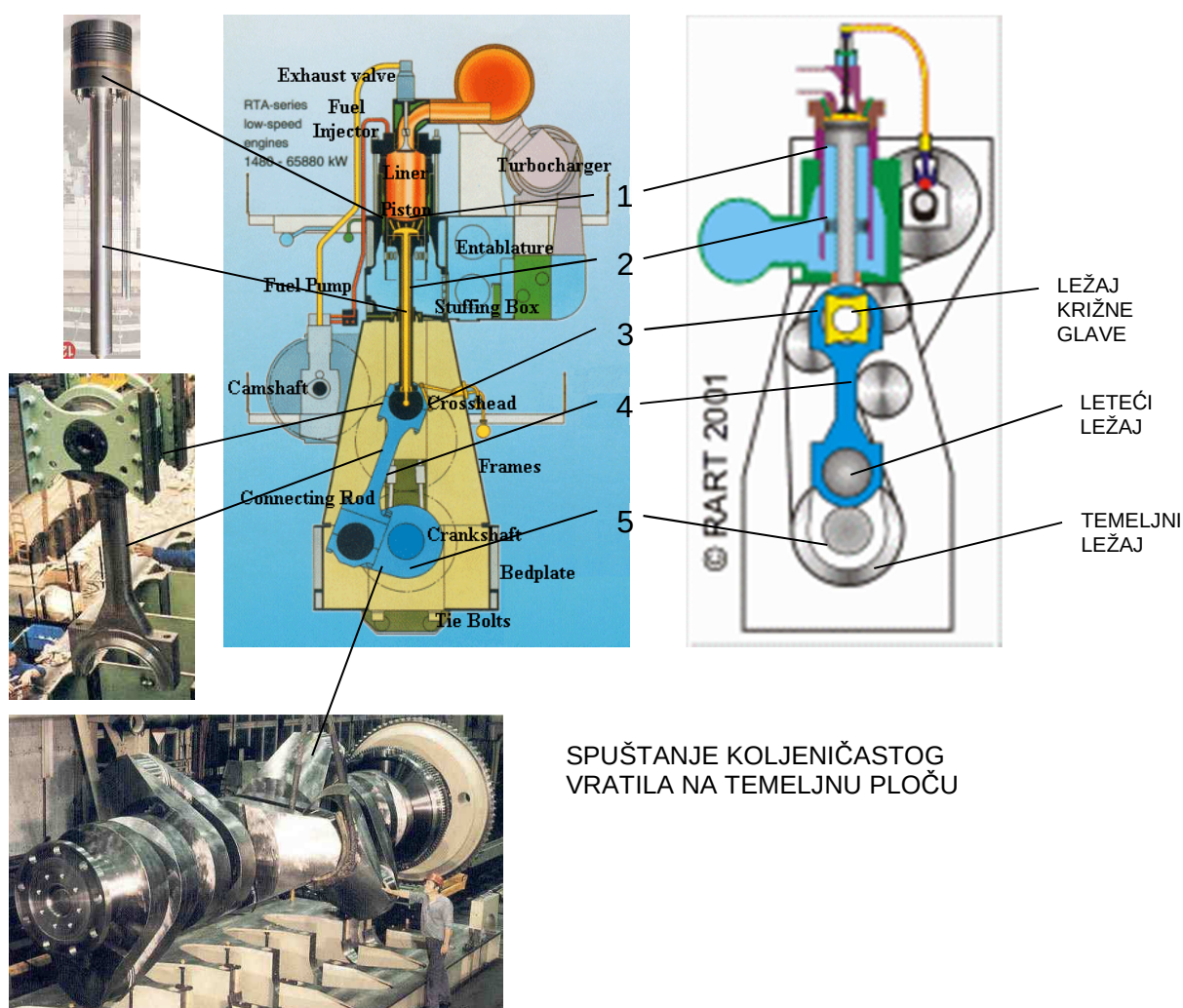
³⁵ Općenito je prihvaćena podjela da se vrlo slični cilindrični oblici nazivaju stap kada je odnos promjera i visine mali, a klip kada je taj odnos velik.

stapajice, (3) **križne glave** s ležajem ojnice³⁶ koja osigurava pravocrtno gibanje stapa i stapajice, (4) **ojnice**, s jedne strane pričvršćene u ležaju križne glave, a s druge na leteći ležaj koljeničastog vratila te samog (5) **koljeničastog vratila**.

Koljeničasto se vratilo oslanja na temeljnim ležajevima koji su sastavni dio temeljne ploče. Temeljna se ploča pričvršćuje na brodsku konstrukciju.

Ispod temeljne ploče pričvršćena je **uljna tava** u koju se slijeva ulje iz ležajeva. Ovi motori imaju tlačno podmazivanje i ulje se ne zadržava u tavi, već se iz nje slijeva u slivni tank, smješten najčešće u dvodnu, ispod motora.

Na temeljnu ploču pričvršćeni su **nosači** (ili zbog oblika A-nosači) cilindarskog bloka, na vanjskim stranama motora i između svakog cilindra. Stare konstrukcije su imale lijevanu temeljnu ploču i nosače, dok se kod novih proizvoda zavarivanjem³⁷. Temeljnomo pločom, A-nosačima i bočnim stranicama zatvoreno je kućište motora. Na bočnim stranicama nalaze se otvori za ulaz čovjeka pri održavanju motora te eksplozijska ili zaštitna zaklopka.



Slika 20. Poprečni presjek dvaju modernih konstrukcija sporohodnih dizelskih motora i dijelovi stapnog mehanizma

³⁶ Klip svojim izduženim oblikom osigurava pravocrtno gibanje. Kada ne bi postojala križna glava, sile koje se javljaju u stapnom mehanizmu zakretale bi stapajicu i stap.

³⁷ Manja je mogućnost škarta.

Najdonji stapni prsten struže cilindarsko ulje kako bi na košuljici ostao samo tanki film. Sastrugano se ulje sakuplja u ispirnom prostoru i odvodi u poseban tank za sakupljanje. Na nosačima se nalazi **cilindarski blok** odnosno **kućište košuljice**. Kod malih motora može biti izliven iz jednog komada. Kod ovih se konstrukcija radi pojedinačno za svaki cilindar, a zatim se spajaju kotvenim vijcima. Na njega dolazi **košuljica** i glava cilindra. Na lijevoj je slici žutom bojom označen uljni prostor. Svjetloplava boja unutar bloka i ispod cilindra, predstavlja ispirni prostor ili prostor zraka za ispiranje.

Cilindarski prostor zatvoren je s donje strane stapom, košuljicom i odozgo **glavom cilindra**, i na slici je označen crvenom bojom (pokazujući na taj način prostor procesa izgaranja i visoke temperature).

Glava cilindra ima rashladne kanale, prostor za smještaj **ispušnog ventila** i kanal ispušnih plinova, u nju se smješta jedna ili više **rasprskaača**, **indikacijski pipac**, **sigurnosni** i **uputni ventil**, instrumente i dr.

Na slikama se nadalje, vidi u presjeku i bregasto vratilo. Kod izvedbe na lijevoj slici pogonjeno je zupčastim prijenosom, a na desnoj se slici vidi lančani prijenos. Bregasto vratilo pokreće klipove **visokotlačnih pumpi goriva**, osigurava otvaranje **ispušnih ventila** (kod 4^t motora i usisnih), te upravlja radom **uputnih ventila**. Ispušni su se ventili na starim konstrukcijama otvarali mehanički ("klackalicom"). Na ovima je otvaranje hidrauličko, a zatvaranje, zračnom oprugom.

Obje izvedbe imaju prednabijanje izvedeno turbopuhalom iako to na desnoj slici nije prikazano. Turbopunjenje je s konstantnim tlakom. Ispušni se plinovi sakupljaju u spremniku ispušnih plinova pa zatim idu u turbinu. Time se postiže jednolik tlak ispušnih plinova³⁸ koji ulaze u turbinu, konstantan broj okretaja turbine, tj. puhala i u konačnici, (približno) konstantan tlak ispirnog zraka. Puhalo tlači zrak kroz rashladnik u kolektor ispirnog zraka te u ispirni prostor. Povećanje tlaka ispirnog zraka iznosi od 2 do 4 puta. Izvjesno manje prednabijanje postiže se spuštanjem samog stapa, a neke su starije konstrukcije (FIAT) imale privještene stapne pumpe.

Zašto gotovo svi moderni dizelski motori imaju sustav prednabijanja i zašto se zrak prije ulaska u cilindre hladi? Koliko zraka stane u cilindarski prostor? Približno, količina zraka određena je volumenom cilindra kada se stap nalazi u donjoj mrtvoj točki, a u stvarnosti je volumen manji zbog visine ispirnih kanala na dnu košuljice koje stap mora prekriti i kasnijeg zatvaranja ispušnog ventila. Masa zraka koja se može 'smjestiti' u taj volumen ovisi o tlaku i temperaturi, tj. o gustoći zraka. Kompresijom se zraku poveća gustoća, tj. smanji specifični volumen te u volumen cilindra stane veća masa. Time se omogućuje ubrizgavanje veće količine goriva uz potpuno izgaranje, a time i veća snaga motora.

Hlađenje zraka radi se s istim ciljem iako nije zanemariva niti činjenica da ispirni zrak u početku procesa hladi košuljicu. Hlađenjem se zraku također smanjuje specifični volumen te u volumen cilindra stane veća masa zraka. Kod modernijih izvedbi može se izvesti regulacija hlađenja ispirnog zraka na način da se po upućivanju motora zrak ne hladi, kako bi se što prije postigle normalne temperature radnih dijelova motora, a kako rastu okretaji i opterećenje motora hlađenje postaje sve intenzivnije.

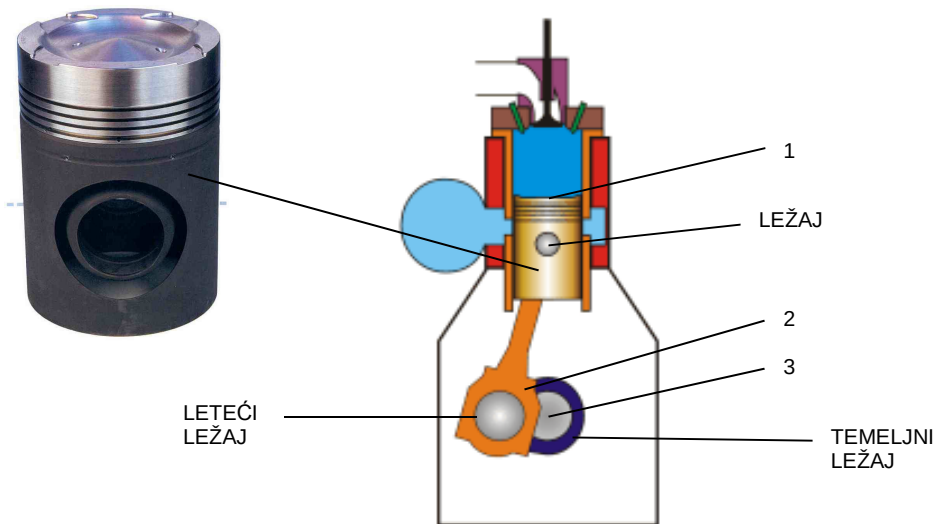
Na glavi cilindra smješten je ispušni ventil, a na dnu se košuljice nalaze ispirni otvori ili kanali. Zrak struji s dna cilindra prema vrhu, tj. ispušnom ventilu potiskujući pred sobom izgarne plinove nastale u prethodnom ciklusu. Takvo se strujanje zraka i ispušnih plinova, tj. ispiranje cilindra zove uzdužno. Svi moderni dvotaktni sporookretni motori imaju takvo, uzdužno ispiranje. Starije su konstrukcije bile bez ispušnog ventila. Takvo ispiranje cilindra može biti poprečno ili poprečno-povratno (okretno), a takvi se motori mogu na prvi pogled prepoznati

³⁸ Količina plinova iz jednog cilindra ne utječe značajnije na promjenu tlaka u ispušnom kolektoru zbog njegove veličine.

jer nemaju ispušni ventil (na samom vrhu glave cilindra), već usisne i ispušne kanale na dnu košuljice.

Problem je uzdužnog ispiranja održavanje ventila. Zbog visokotemperaturne korozije dolazi do trošenja dosjedne površine ventila i nakon propisanog broja radnih sati potrebno ih je brusiti³⁹, no kako se brodovi danas kratko zadržavaju u lukama za to nema vremena. Takvi pogoni imaju rezervni, sklopljeni, ispušni ventil te se samo izvrši zamjena na jednom cilindru. Tijekom sljedeće plovidbe brusi se zamijenjeni ventil, sklapa, a zatim se, u sljedećoj luci zamijeni s trećim ispušnim ventilom itd. dok se ne izbruse i zamijene svi.

Klipni motori, poput ovog shematski prikazanog na slici 21, imaju manju vrijednost omjera S/D (duljina stapaja/promjer cilindra), zbog čega su nešto manje visine. Konstrukcijski su nešto jednostavniji, no i nižeg stupnja korisnosti.



Slika 21. Dvotaktni klipni motor: (1) klip, (2) ojnica, (3) koljeničasto vratilo

2.1.3.1. Sustav goriva motora

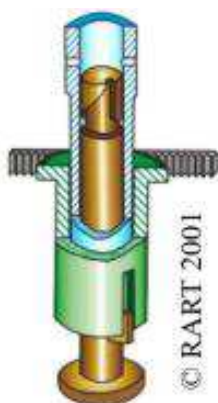
Ovdje se radi u dijelu sustava goriva pod visokim tlakom, tj. dijelu koji je smješten na samom motoru. Skladištenje, priprema i dovod goriva do potrošača obradit će se posebno. Gorivo se zagrijava i pročišćeno, pri tlaku do 1 MPa dovodi visokotlačnim pumpama klipne izvedbe. U visokotlačnim se pumpama tlak goriva povisi na 20-30 MPa ili kod modernijih sustava ubrizgavanja sa zajedničkom sabirnicom te s elektronskom regulacijom ubrizgavanja (eng. *common rail system*) i preko 200 MPa.

Klasični sustavi izvodili su se tako da jedna visokotlačna pumpa dobavlja gorivo do jednog ili više rasprskача jednog cilindra. Početak i završetak ubrizgavanja goriva određen je silom opruge rasprskача i tlakom goriva i mora biti u fazi s gibanjem stapa u cilindru. Kod ove se izvedbe to postiže zakrenutošću brijegova bregastog vratila koji podižu klipove visokotlačnih pumpi. Budući da je bregasto vratilo pokretano, nekom vrstom prijenosa, koljeničastim vratilom, točan kut (oblik) brijegova je osnova za pravovremeni početak ubrizgavanja goriva.

Količinom goriva ubrizganom u cilindar održava se željeni broj okretaja motora, odnosno propelera. Kod klasičnog sustava količina goriva regulira se zakretanjem klipa visokotlačne pumpe (*Bosch* sistem, koristi ga MAN – B&W) ili preljevnim ventilom (*Sulzer*).

³⁹ Zamjena vretena ventila bila bi preskupa.

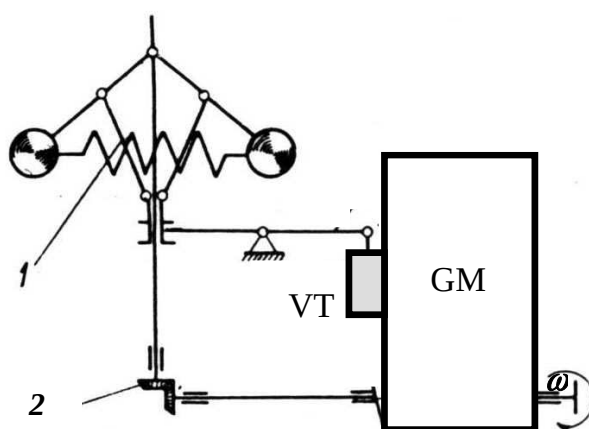
Klip *Bosch* pumpe (slika 22) izveden je s utorom (asimetričnim, ako mu je samo jedna strana skošena, ili simetričnim, ako su obje). Zub klipa uglavljen je u otvor zakretne košuljice kojom upravlja nazubljena letva. Pomicanje letve lijevo – desno dovodi do zakretanja klipa. Tlak počinje rasti kada klip, gibajući se prema gornjoj mrtvoj točki, u potpunosti prekrije otvore na košuljici pumpe, a dobava kada tlak nadjača silu opruge rasprskачa. Zbog skošenog utora, a u ovisnosti o kutu klipa, otvor na košuljici će se 'otkriti' čime će se ostvariti spoj tlačne i usisne strane. Tlak goriva pada pa ubrizgavanje završava.



Slika 22. Visokotlačna pumpa sa zakretnim klipom

Starije konstrukcije motora imaju mehaničko-hidraulički regulator broja okretaja (Woodward-ov regulator) koji djeluje na polužje visokotlačnih pumpi. Umjesto njega kasnije se ugrađivao elektronski regulator, koji je upravljanjem pneumatskim aktuatorom djelovao na polužje.

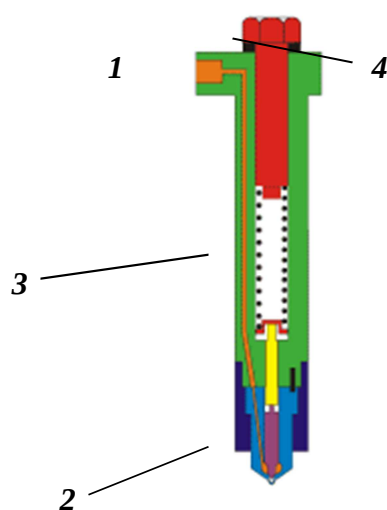
Na slici 23 prikazana je jednostavna izvedba regulatora broja okretaja. Ukoliko dođe do promjene momenta na propeleru, mijenja se kutna brzina koljeničastog vratila ω , a s njom preko prijenosa 2 i broj okretaja osovine regulatora. Smanjenje okretaja dovodi do sakupljanja kuglastih utega i promjene položaja polužja regulatora 1 tako da se poluga koja djeluje na visokotlačne pumpe zakreće u smjeru obrnuto od kazaljke sata i povećava količinu goriva. Ako su okretaji propelera preveliki regulator djeluje suprotno i smanjuje količinu goriva. Modernije izvedbe regulatora nisu mehaničke već hidrauličke izvedbe, utezi nisu kuglastog oblika, ali u osnovi rade na isti način.



Slika 23. Mehanički regulator broja okretaja motora [8]

Common rail sustav tj. sustav sa zajedničkom sabirnicom ima zajedničku pumpu i zajednički cjevovod za sve rasprskalice svih cilindara. I ovdje su početak i završetak ubrizgavanja u fazi s položajem stapa, no igle rasprskalice otvaraju se elektromagnetski. Kako ne postoji mehanička veza koljeničastog vratila i gibanja klipova visokotlačnih pumpi kao u klasičnoj izvedbi, osnova ispravnog rada je poznavanje položaja koljeničastog vratila. Koriste se elektronski osjetnici položaja (engl. pick up) prema čijim se signalima elektronski regulira ubrizgavanje goriva.

Jednostavan rasprskalič je prikazan na slici 24. Kroz otvor 1 ostvaren je dovod goriva. Kada tlak goriva nadvlada silu opruge 3, podiže se igla 2 te dolazi do raspršivanja goriva. Raspršivanje goriva vrši se kroz više otvora različitih dimenzija s ciljem što boljeg miješanja goriva i zraka te brzog izgaranja. Također, neki motori izvode se s više, a neki s jednim rasprskaličem po cilindru. Sila opruge rasprskalice, a time i početak ubrizgavanja goriva, podešava se vijkom 4 i podložnim pločicama.



Slika 24. Rasprskalič goriva.

Rasprskalice velikih sporookretnih motora koji rade s teškom naftom potrebno je hladiti. Prije su se hladili vodom, a moderni se hlade samim gorivom.

2.1.3.2. Podmazivanje motora

Podmazivanje međusobno pokretnih dijelova motora izvodi se zbog smanjenja trenja, odnosno smanjenja mehaničkih gubitaka koji se javljaju zbog trenja, te smanjenja njihovog trošenja, no ujedno se površine hlade, čiste, a ponekad maziva služe i za brtvljenje. Podmazivanje kliznih površina motora velikih snaga izvodi se tlačno, elektromotornim ili kod manjih motora privješnim pumpama. Samo motori malih snaga mogu se podmazivati 'bućkanjem'. Podmazuju se temeljni ležajevi i odzivni ležaj, leteći ležajevi, ležajevi i klizne staze križnih glava, ležajevi i brijegovi bregaste osovine, mehanizam pogona bregaste, ležajevi turbopuhala i dr. Sustav ulja za podmazivanje bregaste osovine ima zasebne pumpe, a osim za bregastu, dobavlja ulje za hidraulički sustav otvaranja ispušnih ventila. Ulje koje se teleskopskim cijevima dovodi na križne glave, kroz šuplju stapajicu dovodi se u unutrašnjost stapa za hlađenje. Turbopuhalo ima zatvoreni sustav ulja. Cilindri se podmazuju cilindarskim uljem. Ono se dovodi gravitacijski iz dnevnog tanka do mehanički pogonjenih mazalica

(lubrifikatora), koje tlače ulje kroz nepovratne ventile u cilindre. Dobava cilindarskog ulja također mora biti izvedena u fazi s položajem stapa kako bi stapni prstenovi razmazali isto po košuljici.

Cilindarsko ulje mora biti lužnatije (zbog većeg udjela sumpora u teškoj nafti) u odnosu na ulje u glavnom, cirkulacijskom sustavu. Dimenzije motora su takve da bi se teško moglo osigurati dobro podmazivanje bućkanjem, a osim toga ispirni prostor motora odijeljen je od uljnog prostora (stapajica prolazi kroz brtvenicu stapajice).

Kod starijih izvedbi motora dobava lubrifikatora se podešavala ručno. Veće količine potrebne su kod upućivanja i kod velikih opterećenja. Danas se lubrifikatorima upravlja automatski, prema broju okretaja i opterećenju motora.

Ulje osim podmazivanja (smanjuje se trošenje metalnih dijelova i trenje, čime se povećava stupanj korisnosti) čisti i hladi strojne dijelove, a ponekad i brtvi. Hlađenje je posebno značajno jer su klizne površine izrađene od legura niskih tališta pa i manja povećanja temperatura mogu dovesti do oštećenja. Zbog zaštite motora u slučaju pretjeranog povećanja temperature ulja ili pada tlaka ulja aktiviraju se **funkcije zaštite motora** te najprije dolazi do automatskog smanjenja broja okretaja (engl. SLOW DOWN), a zatim, u kratkom vremenskog periodu⁴⁰, i do zaustavljanja motora (engl. SHUT DOWN).

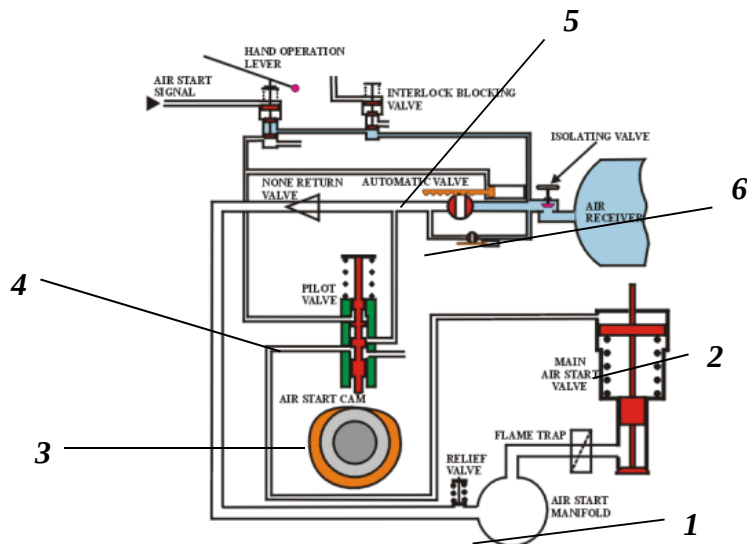
2.1.3.3. Sustav upućivanja motora

Kod motora je potrebno ugraditi sustav ili uređaj kojim će se postići početan broj okretaja te kako bi počeo s radom. Upućivanje velikih motora izvodi se zrakom. Taj zrak naziva se startni ili uputni zrak. Potrebno je postići oko 30 – 40 % nominalnog broja okretaja kako bi se motor zavrteo dovoljno brzo i počeo raditi na gorivo. U glavama cilindra nalaze se uputni ventili koji se otvaraju u ovisnosti o položaju stapa (u fazi su, kao i rad rasprskaga te ispušnih ventila). Na slici dolje prikazan je jedan sustav uputnog zraka.

Zrak za upućivanje dovodi se u glavni cjevovod 1 (zajednički za sve cilindre), a iz njega na uputni ventil 2. Kako bi se isti otvorio, pilot ventil 4 treba 'pustiti' zrak istog tlaka na klip uputnog ventila (slika 25). U ovoj izvedbi radom pilot ventila upravlja bregasto vratilo, a ono je u fazi s koljениčastim vratilom. Znak za upućivanje (s bilo kojeg upravljačkog mjesta) pušta zrak na pneumatski aktuator i otvara glavni startni ventil 5. Startni zrak dolazi kroz zaustavljač plamena u prostor iznad uputnih ventila svih cilindra, ali se svaki od njih otvara tek kada brijeg bregastog vratila podigne klip razvodnika (pilot ventila) i 'pusti' zrak na klip uputnog ventila. Time se savladava sila opruge i otvara uputni ventil.

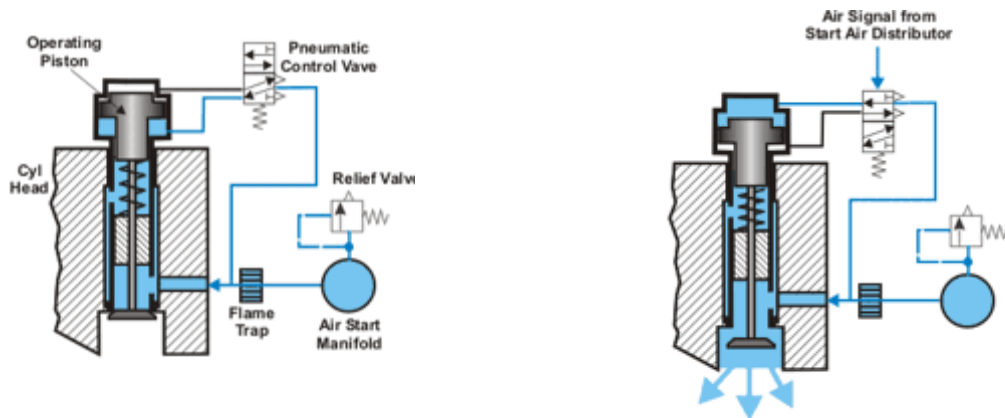
Osim glavnog ventila, postoji i ventil za polagano pokretanje motora 6 (engl. slow turn). Funkcionalno je isti, ali manjih dimenzija. Zbog toga je tlak zraka manji, što rezultira i manjim brojem okretaja motora. Polagano pokretanje koristi se pri pripremi za pogon kako bi se razmazalo ulje i propuhali cilindri.

⁴⁰ U krajnjem slučaju ovisno o proizvođaču, ali kreće se oko 30 s.



Slika 25. Uputni zrak: (1) cjevovod startnog zraka, (2) uputni ventil, (3) bregasto vratilo s brijegom za otvaranje uputnog ventila, (4) razvodnik ili pilot ventil, (5) glavni startni ventil, (6) ventil za polagano pokretanje

Slika 26 prikazuje uputni ventil u zatvorenom i otvorenom položaju. Uputni ventil u zatvorenom položaju drži opruga, ali preko kontrolnog ventila i tlak startnog zraka. Kada na kontrolni ventil dođe pneumatski signal iz razvodnika prekida se dovod zraka s donje strane klipa uputnog ventila, a pušta na gornju stranu.



Slika 26. Uputni ventil u zatvorenom i otvorenom položaju

Ako neki uputni ventil ostane blokiran u otvorenom položaju, a start motora uspije, kroz njega će u cjevovod ulaziti vrući plinovi iz cilindra. To bi moglo dovesti do zagrijavanja i deformacije glavnog startnog ventila te se na glavnom cjevovodu ugrađuje sigurnosni ventil.

Budući da se danas nakon pripreme motora upravljanje 'prebacuje' na most i upućivanje vrši s mosta, časnik palube mora biti obazriv prilikom manevriranja. Svakim se upućivanjem troši zrak pa ako tlak zraka u spremniku previše padne startanje će biti onemogućeno. O tome će se više reći kod objašnjenja daljinskog upravljanja motorom i cjevovoda komprimiranog zraka.

2.1.3.4. Sustav ispirnog zraka

Glavni motor je najveći potrošač zraka u strojarnici i do usisnog filtra puhala dolaze glavni kanali cjevovoda ventilacije strojarnice. Puhalo tlači zrak u rashladnik. Rashladni medij je morska ili, danas gotovo isključivo, slatka niskotemperaturna voda⁴¹.

Turbopuhalo se projektira tako da najefikasnije radi kod 80 % nominalnog opterećenja motora⁴². U početku rada motora broj okretaja turbopuhala je nedovoljan, slabo radi te je slabo ispiranje cilindara. Kako bi se dobava zraka, a time i izgaranje u cilindrima, poboljšala, na krajeve se spremnika ispirnog zraka ugrađuju elektromotorom pogonjena, pomoćna puhala. Oni se automatski startaju čim tlak ispirnog zraka postane niži od podešene vrijednosti.

Ovdje se može spomenuti jedna, u prošlosti prilično česta, situacija iz prakse. Prve konstrukcije motora nisu imale prednabijanje i moderne sustave automatskog upravljanja te zaštite kao sada. Rad dizelskih motora nije bio u potpunosti jasan niti časnicima stroja (koji su do tada plovili na parnim stapnim strojevima ili turbinašima), a još manje časnicima palube. Prilikom manevriranja bili su česti sudari i oštećenja zbog potrošenog startnog zraka. Naime, kod upućivanja motora, izgaranje goriva je loše jer nema dovoljno ispirnog zraka. Časnik palube, koji upravlja motorom, osjeti da okretaji motora padaju pa ručicu telegrafa gura u položaj za veći broj okretaja. Dešava se upravo suprotno jer je izgaranje loše zbog manjka zraka, a ne manjka goriva pa okretaji još više padaju. Guranje ručice telegrafa u položaj za još veći broj okretaja samo dovodi do 'zagušenja' motora jer problem nije u količini goriva koja se ubrizgava u cilindar, već u količini zraka potrebnog za izgaranje. Ponavljanje ove situacije nekoliko puta znači potrošen startni zrak i nemogućnost novog upućivanja dok kompresori ne nadopune spremnike startnog zraka.

2.1.3.5. Sustav ispušnih plinova

Ispušni plinovi sakupljaju se u spremniku ispušnih plinova, osim kod četverotaktnih, srednjehodnih motora, koji se češće izvode s impulsnim turbopunjenjem tj. bez spremnika ispušnih plinova. Na svakoj dovodnoj cijevi je pirometar⁴³ i kod modernih izvedbi davač temperature za daljinsku indikaciju i alarmiranje. Temperature ispušnih plinova kreću se u rasponu od 250 do 350°C za sporohodne 2^t i od 350 do 430°C za srednjehodne 4^t motore.

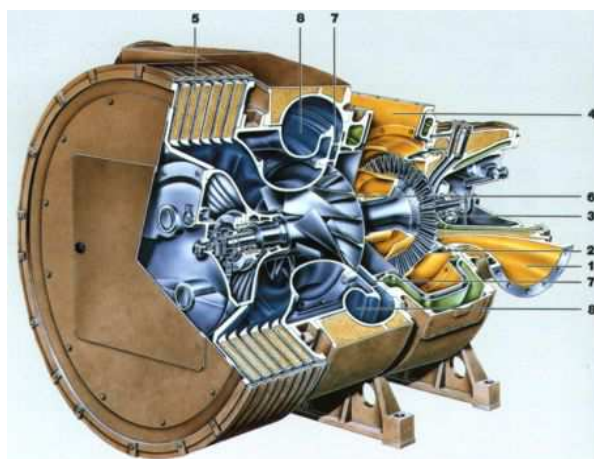
Iz spremnika plinovi idu na turbinsku stranu turbopuhala, a zatim u kotao na ispušne plinove (utilizator). Cjevovod je izoliran kako ne bi zračenjem pretjerano zagrijavao strojarnicu. Turbopuhalo je povremeno potrebno čistiti. Čisti se kemijski, pri radu motora smanjenom snagom, na otvorenom moru. Časnik palube mora znati da su mogući kvarovi turbopuhala, no da je rad motora bez turbopuhala moguć. Motor može raditi smanjenom snagom, odnosno s manjim brojem okretaja.

Konstrukcija turbopuhala prikazana je na slici 27. Na istom vratilu nalazi se rotor puhala (kompresora) i turbine, no prostori su mehanički odijeljeni. Na plinsku stranu dolaze ispušni plinovi motora (iz spremnika ili kod manjih motora direktno), a puhalo kroz usisni filter siše zrak iz strojarnice, te ga kroz rashladnik zraka tlači u ispirni prostor te u cilindre. U rashladnicima zraka starijih konstrukcija koristila se morska; a kod novijih konstrukcija slatka rashladna voda

⁴¹ S ciljem rekuperacije otpadne topline može se ispirni zrak hladiti termalnim uljem, a njime grijati gorivo i sl.

⁴² Režim s kojim će motor najčešće raditi.

⁴³ Termometar za visoke temperature.



- | | |
|----------------------|--------------------|
| 1. Gas Inlet Casing | 5. Silencer Filter |
| 2. Turbine Nozzles | 6. Compressor |
| 3. Turbine Wheel | 7. Diffuser |
| 4. Gas Outlet Casing | 8. Volute Casing |



Slika 27. Sklop turbopuhala: 1 – ulaz ispušnih plinova, 2 – lopatice turbine, 3 – turbinsko kolo, 4 – izlaz ispušnih plinova, 5 – filter zraka, 6 – puhalo (kompresor), 7 – difuzor (kinetičku energiju zraka pretvara u potencijalnu – tlak, 8 – kanal izlaza zraka te osovina sa zračnom i plinskom stranom

2.1.3.6. Prekretanje motora

Prekretanje motora znači promjenu smjera vrtnje koljeničastog vratila motora, a time i promjenu smjera okretanja propelera te pravca kretanja broda. To je jedini način promjene pravca kretanja broda koji je pokretan propelerom s fiksnim krilima. Potrebno je ugraditi sustav prekretanja. Sustav prekretanja motora ne ugrađuje se kod dizelskih generatora električne struje. Kod motora za poriv broda koji pokreću propeler sa zakretnim krilima takav se sustav ponekad ugrađuje, kao mogućnost u slučaju nužde⁴⁴ kada krila ostanu blokirana u nekom položaju.

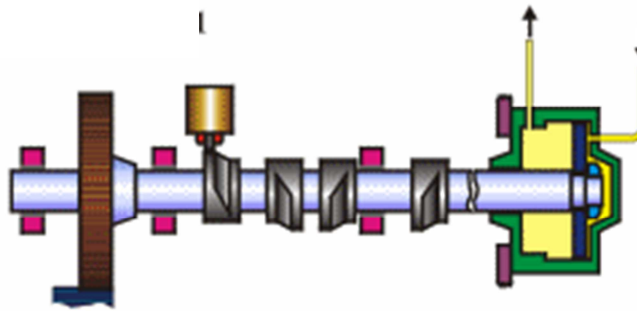
Kada se koristi prekretanje? Časnik palube izvršit će prekretanje motora kada želi promijeniti smjer vožnje broda ili kratkotrajnim prekretanjem želi smanjiti plovidbenu brzinu prilikom manevriranja. Svako prekretanje predstavlja utrošak zraka za startanje pa je potrebno paziti na vrijednosti tlaka u spremnicima⁴⁵.

Nadalje, prekretanje se u pravilu izvodi kod malih plovidbenih brzina i okreta motora. Budući da i nakon prekida dovoda goriva glavnom motoru isti nastavlja okretanje (jer brod zbog velike mase nastavlja gibanje u istom smjeru pa more nestrujava na propeler i zbog krutog spoja okreće i koljeničasto vratilo motora), treba znati da je, u ovisnosti o veličini (masi, nosivosti) broda, potreban značajan zaustavni put. Manji broj motora ima zračnu kočnicu koja upušta uputni zrak u cilindar u trenutku kada se stap još podiže prema gornjoj mrtvoj točki. Kod većine motora sustav upućivanja automatski sprječava prekretanje motora sve dok okretaji ne padnu kako se ne bi javljale prevelike sile na stapni mehanizam. Granični je slučaj 30 % nominalnog broja okretaja, tj. trebalo bi pričekati da plovidbena brzina padne, a zbog nje i broj okretaja motora.

⁴⁴ Ako otkaze hidraulički sustav promjene nagiba krila propelera.

⁴⁵ Kasnije će biti riječi o sustavu startnog zraka, no za sada je dovoljno reći da postoje dva spremnika ili dvije grupe spremnika startnog zraka. Časnik palube treba biti u dogovoru s upraviteljem stroja, kako se iste koriste. Jedan (ili jedna grupa) može biti izolirana, tj. zatvorenih ventila. Ako se 'potroši' zrak iz jedne postoji u tom slučaju rezerva, ali ako se koristi oba te rezerve nema.

Što ako tog slobodnog puta nema? Ispred broda je hrid ili drugo plovilo, a ne može se niti skrenuti. Vrijednost broda, tereta ili putnika, svakako je veća nego vrijednost porivnog stroja pa će se u tom slučaju pokušati prekrenuti motor i uz rizik teške havarije na istom⁴⁶.

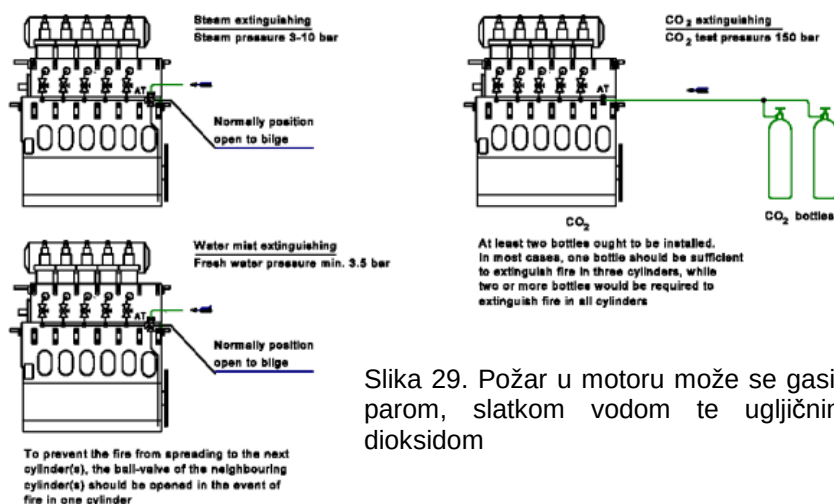


Slika 28. Sustav prekretanja. Bregasto vratilo može se pomicati aksijalno te na podigače (visokotlačnih pumpi, ispušnih ventila i dr.) djeluju zakrenuti brijegovi

Jedan od načina prekretanja prikazan je na slici 28. Osim ovakve izvedbe, aksijalnog pomaka bregastog vratila, može se izvesti hidrauličko zakretanje brijegova. Neovisno o izvedbi, brijegovi prekrenutog motora djeluju na uputne ventile, rasprskalice goriva tj. podigače visokotlačnih pumpi goriva i ispušne ventile⁴⁷ kako bi se koljeničasto vratilo motora okretalo u suprotnom smjeru.

2.1.4. Protupožarna zaštita motora

U prethodnim poglavljima spomenuta je mogućnost zapaljenja ugljikovodičnih isparenja nastalih iz uljnih naslaga koje se sakupljaju u ispirnom prostoru ili uljnih para u 'karteru' motora. U kućišta motora ugrađuju se osjetnici pojave uljnih para, no kada se zapaljenje ipak dogodi, postoji sustav gašenja požara. Na slici 29 prikazana su tri sustava gašenja požara u unutrašnjosti motora.



Slika 29. Požar u motoru može se gasiti parom, slatkom vodom te ugljičnim dioksidom

Zbog jednostavnosti danas se najčešće koristi izvedba s CO₂. Spremnici s CO₂ za gašenje u motoru smješteni su u strojarnici, u blizini samog motora i čvrsto fiksirani, kako se zbog valjanja broda ne bi pomicali.

⁴⁶ Kod nekih sustava daljinskog upravljanja glavnim motorom na upravljačkim konzolama takva se opcija (tipka za pokretanje funkcije) naziva 'crash manouvre'.

⁴⁷ Ako se uopće koristi, izuzetno je rijetka izvedba da se četverotaktni, srednjeokretni motori izvode kao prekretni.

2.1.5. Uređaj za polagano zakretanje

Okretanje pokretnih dijelova motora s malim brojem okretaja vrši se u dva slučaja: prilikom održavanja motora ili osovinskog voda kada je potrebno dovesti koljeničasto vratilo u određeni položaj zbog mjerenja istrošenosti dijelova ili njihove zamjene te prilikom pripreme za rad.

U prvom se slučaju koristi **uređaj za polagano pokretanje** (engl. turning gear). U osnovi, radi se o elektromotoru koji pokreće zupčanik malog promjera smješten na osovini koja se može aksijalno pomicati. Osovinu se dovodi u zahvat s nazubljenim dijelom zamašnjaka glavnog motora, a zatim se, lokalnim upravljačkim uređajem, vrši okretanje u smjeru naprijed ili nazad. Časnici stroja često ga koriste i prilikom pripreme glavnog motora, kako za polagano pokretanje ne bi trošili uputni zrak. Drugi je način polagano pokretati motor tijekom postupka pripreme za rad pomoću sustava uputnog zraka. Naime, u sustavu uputnog zraka glavnog motora, osim glavnog uputnog ventila postoji i ventil za polagano pokretanja (engl. slow turn valve). To se radi s ciljem propuhivanja cilindra te razmazivanja ulja za podmazivanje.

Za časnika palube važno je da na mostu postoji indikacija o zahvatu uređaja s motorom (engl. **turning gear in**). Kada je ta opcija uključena, startanje motora je spriječeno. Zašto i kako? Ako je uređaj u zahvatu, to može značiti da je član posade stroja u unutrašnjosti motora i ne smije doći do upućivanja. Neželjeno, slučajno upućivanje (zbog ljudske ili systemske greške) je spriječeno uključanjem osjetnika položaja kliznog vratila uređaja (ili poluge za blokiranje u isključenom položaju) u električni krug glavnog ventila za upućivanje.

Glavni ventil za upućivanje motora je elektromagnetski ili pneumatski upravljani (kada ima svoj elektromagnetski pilot ventil). Dakle, ako uređaj nije van zahvata zamašnjaka i poluga u položaju koji blokira vratilo uređaja za polagano pokretanje, strujni krug elektromagnetskog ventila za upućivanje ili njegovog pilot ventila je u prekidu te je upućivanje onemogućeno. Kada je uređaj za polagano pokretanje van zahvata i blokiran u tom položaju, startanje motora je moguće i na mostu se gasi indikacija *turning gear in*.

2.1.6. Razvoj sporookretnih motora

Iako imaju najveći toplinski stupanj iskoristivosti u odnosu na druge toplinske strojeve, nastoji ga se još povećati. To međutim znači da se toplinski proces mora izvesti s većim tlakovima i temperaturama izgaranja, a to je u suprotnosti s trendom smanjenja zagađivanja okoliša plinovima s brodova. Više temperature izgaranja rezultiraju većim udjelom dušičnih oksida u ispušnim plinovima motora. Najčešće se pod povećanjem stupnja iskoristivosti misli na cijeli strojni kompleks primjenom različitih metoda za rekuperaciju otpadne topline i sl.

Poboljšanje procesa izgaranja goriva izvodi se s ciljem smanjenja gubitaka kemijske energije s neizgorenim gorivom. Traže se optimalne izvedbe s različitim brojem rasprskaca, brojem, promjerom i rasporedom sapnica rasprskaca, izvedbom čela stapa (kako bi se dobila bolja cirkulacija i miješanje goriva i zraka) te regulacijom ubrizgavanja goriva. Ovo potonje je kod modernih konstrukcija do krajnosti precizno jer se izvodi s elektronskom regulacijom (*common rail*).

Nastoji se smanjiti nominalni broj okretaja kako bi se povećao stupanj iskoristivosti propelera te današnji sporohodni motori daju nominalnu snagu već kod 60 do 70 okr/min. Nadalje, jedan od većih nedostataka sporohodnih motora jest i otežan rad kod malog broja okreta.

Zbog tog je nedostatka manevriranje otežano, potrebne su skupe usluge pilota i remorkera ili se mora vršiti često preokretanje motora. Razvoj sporohodnih motora vodi k daljnjem smanjenju minimalnog broja okretaja pri kojem će pogon još uvijek biti pouzdan.

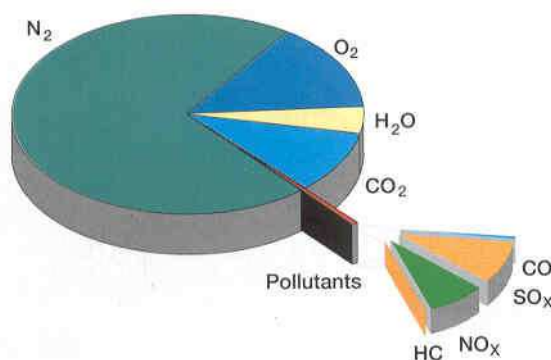
U smislu povećanja jedinične snage postignuto je puno jer nove konstrukcije uveliko premašuju vrijednosti snaga za koje su se nekad morale koristiti parne turbine. Prije je naveden motor izgrađen za pomorsku tvrtku Maersk Line koji to potvrđuje.

Kako bi postali prihvatljiviji brodarskim tvrtkama koje posluju s putničkim brodovima nastoji se smanjiti vibracije i buku, no tu će bitnije pomake biti teško očekivati. Problem je u neujednačenom radu (svega nekoliko cilindara). To se može promijeniti samo povećanjem broja cilindara, što je opet, povezano s cijelim nizom drugih nedostataka.

Prema MARPOL konvenciji potrebno je smanjiti emisiju štetnih plinova iako je njihov udio sasvim mali. Štetni plinovi su dušični i sumporni oksidi (NO_x , SO_x), ugljikovodici, ugljični monoksid i ugljični dioksid, a njihov je udio u ukupnoj emisiji plinova iz motora prikazan na slici 30.

Dušik je sa 79 % zastupljen u zraku te je i njegov udio u ispušnim plinovima najveći. Ugljični dioksid i vodena para rezultat su potpunog izgaranja goriva (ugljikovodici) te su neizbježni rezultat izgaranja, a kisik je posljedica prelička zraka. Na prisustvo ugljičnog monoksida i neizgorenih ugljikovodika nastoji se utjecati poboljšanjem procesa izgaranja, kao i poboljšanjem kvalitete goriva (npr. dodavanjem aditiva). Na emisiju dušičnih i sumpornih oksida može se utjecati primarnim i sekundarnim metodama. Primarne su:

- snižavanje temperature ispirnog zraka,
- snižavanje tlaka ispirnog zraka,
- veći kompresijski omjeri,
- kasnije ubrizgavanje,
- kasnije zatvaranje ispušnog ventila,
- izvedbe rasprskavača,
- tlak i trajanje raspršivanja,
- dodavanje vode gorivu.

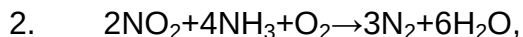
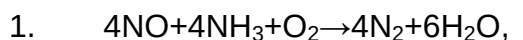


Slika 30. Emisija plinova dizelskog procesa [8]

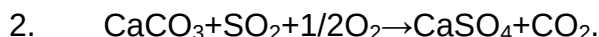
Neka od ovih rješenja bit će teško prihvaćena (od strane proizvođača i brodara) jer loše utječu na stupanj iskoristivosti procesa, no ima i prihvatljivih. To su različite izvedbe rasprskavača, regulacija procesa raspršivanja ili dodavanje vode. Ista se može dodavati

procesu ovlaživanjem ispirnog zraka, miješanjem s gorivom (stvaranjem emulzije) ili ubrizgavanjem u cilindarski prostor.

Postoje i sekundarne metode, tj. metode naknadne prerade ispušnih plinova. Radi se o katalitičkoj redukciji. Ispušni plinovi kemijski se tretiraju u katalizatorima pa se redukcija dušičnih oksida može provesti prema kemijskim reakcijama



a desumporacija prema reakcijama



Osim tih kemijskih reakcija u katalizatorima se sakupljaju čestice čađe, a može se vršiti i dodatna oksidacija, kako bi se spriječila emisija ugljičnog monoksida i ugljikovodika. Katalizatori se mogu ugrađivati na već postojeće motore.

Sustavi daljinskog automatskog nadzora i zaštite te dijagnostike kvarova predstavljaju, možda, najznačajnije unapređenje posljednjih godina. Posljedica je to ubrzanog razvoja sklopovske opreme (*hardware*) i programskih rješenja (*software*). Nastojanja su proizvođača motora i navedenih sustava⁴⁸ da se dijagnostika još unaprijedi, kako bi sustav mogao reagirati brže i preciznije, a time bi se smanjile štete uslijed havarija motora.

Ovdje se neće ulaziti u sve detalje modernih rješenja jer ona koriste prije svega časniku stroja, već će se dati samo jedan primjer. Prije je spomenuto da se na izlaznim cijevima ispušnih plinova ugrađuju osjetnici temperature. Kompjutorski se bilježe te se računa srednja vrijednost temperature ispušnih plinova. Zatim se računa odstupanje svake pojedinačno od srednje vrijednosti pa ako je veće od zadanog (dopuštenog, u programskom paketu podešenog) sustav daje dijagnozu: oštećenje ispušnog ventila ili curenje rasprskaca na cilindru.

2.1.7. Upravljanje glavnim porivnim strojem

Zadaća je prometnog sustava pa i broda, koji je njegov važan dio, prevesti ljude, teret ili informacije na brz i siguran način. Dužnost je časnika palube upravljati brodom na način koji je siguran za sve sudionike pomorskog prometa i morski okoliš. Jedna je od važnih funkcija tog procesa podesiti plovdbenu brzinu, tj. opterećenje glavnog porivnog stroja vanjskim uvjetima te operativnom stanju samog stroja.

Časnik palube na upravljačkoj konzoli na mostu ima indikaciju samo bitnih parametara glavnog stroja, ali je upravljački dio gotovo identičan konzoli u kontrolnoj prostoriji strojarnice. Ovdje će se navesti one važnije upravljačke funkcije. Na slici 17 prikazana je spomenuta konzola norveškog proizvođača NorControl.

U desnom gornjem kutu nalazi se polje naziva *RESPONSIBILITY TRANSFER* s opcijama *LOKAL*, *ENGINE CONTROL ROOM* (ECR) te *BRIDGE* jer se glavnim motorom može upravljati lokalno, iz kontrolne prostorije strojarnice ili s mosta. *ECR* je centralno upravljačko mjesto i ima prioritet pred ostalima. Što to znači časniku palube? Normalna je praksa da se prebacivanje odgovornosti (s jednog na drugo upravljačko mjesto) izvrši nakon što su ručice telegrafa, na oba upravljačka mjesta, u istom položaju. U suprotnom se javlja alarm, no kako

⁴⁸ Takve upravljačke sustave ne izrađuje nužno proizvođač motora, već se može raditi o specijaliziranim tvrtkama (Siemens, NorControl, Damatic i dr.).

se *ECR* nalazi u strojarnici pa je bliže mjestu događaja (motoru) u situacijama kada treba brzo reagirati (začuju se čudni zvukovi u motoru), časnik stroja preuzima upravljanje i zaustavlja motor. Neće gubiti vrijeme na dogovore s časnikom na mostu jer bi oštećenje motora, a time i troškovi popravka, moglo biti još veće. Pri tome bi časnik stroja trebao biti svjestan situacije u prometu (tjesnac, gust promet i sl.).

Primjer prebacivanja odgovornosti na *NorControl*-ovom sustavu upravljanja bi izgledao ovako:

- nakon što je primio komandu za pripremu glavnog motora te izvršio istu, časnik stroja izvršiti (lokalnom telefonskom linijom) časnika palube o izvršenom te mogućnosti da most preuzme upravljanje glavnim motorom;
- na konzoli u *ECR* pritišće tipku *BRIDGE* te ista počne svijetliti isprekidano (bljeskati);
- anlogna tipka *BRIDGE* na mostu također počne bljeskati, upozoravajući časnika palube da preuzme upravljanje glavnim motorom, pritiskom na tipku;
- po preuzimanju, kontinuirano svijetli tipka *BRIDGE* (na mostu i u *ECR*), pokazujući odgovorno mjesto;
- komandant broda upućuje glavni stroj s mosta nakon izvršene kompletne pripreme broda (vez, sidro itd.).

U polju ispod nalaze se indikatori alarma glavnog porivnog stroja. Obično njihov broj odgovara zahtjevima klasifikacijskog društva⁴⁹ prema kojima je brod građen, ali može biti nadopunjen nekima koje preporuča proizvođač motora ili je zahtijevao brodovlasnik.

Ispod tipke *FAIL* nalaze se alarmi povezani s neuspjelim upućivanjem motora. Uglavnom se radi o problemima sa startnim zrakom (ako indikacija tlaka startnog zraka pokazuje da je tlak zadovoljavajući, a nalazi se u lijevom gornjem kutu konzole, greška je u sustavu startnog zraka) ili s manevarskim zrakom⁵⁰.

Greška sljedećih parametara dovest će do smanjenja broja okretaja (*SLOW DOWN*): tlak ulja za podmazivanje⁵¹, temperatura (temeljnih) ležajeva, temperatura ispirnog zraka i drugo. Prema HRB do automatskog smanjenja broja okretaja (opterećenja) dolazi u slučajevima: niskog tlaka ulja za podmazivanje temeljnog i odzivnog ležaja, niskog tlaka ulja za podmazivanje križne glave, visoke temperature odzivnog ležaja ili ulja na izlazu, niskog protoka ulja za podmazivanje, niskog tlaka ili protoka ili visoke temperature rashladnog sredstva stapa, niskog tlaka ili visoke temperature rashladne vode cilindra, visoke temperature ispirnog zraka te visoke temperature ispušnih plinova.

Do automatskog zaustavljanja (*SHUT DOWN*) u slučaju kad: je nizak tlak ulja za podmazivanje⁵², visoke temperature ležajeva, temperature rashladne vode cilindra, prekoračenja dopuštenog broja okretaja (engl. overspeed)⁵³ te kada je uređaj za polagano pokretanje u zahvatu (engl. turning gear in). I u ovom slučaju se propisi HRB u manjoj mjeri razlikuju.

U najdonjem polju upravljačke konzole nalazi se indikacija aktivnosti zaštitnih programa i tipke za premoštenje istih. O čemu se radi? Normalan bi postupak uvođenja opterećenja,

⁴⁹ LLOYDS, ABS, DNV, BV su kratice nekih svjetskih. HRB je Hrvatski registar brodova.

⁵⁰ Radi se o sustavu upravljanja (startanja, prekretanja) motorom, koji je redovito pneumatski.

⁵¹ Može se, zbog izvedbe sustava ulja, raditi o više tlakova: (1) za temeljne ležajeve, (2) za križnu glavu, (3) za bregasto vratilo.

⁵² Ova se funkcija aktivira s nekom vremenskim zategom (30 s do 1 min) nakon funkcije smanjenja broja okretaja.

⁵³ Obično 110 % nominalnog broja okretaja.

odnosno povećanja brzine plovidbe, bio postepen. Ne samo zbog vanjskih uvjeta plovidbe (odlazak iz luke ili sidrišta, prolazak kroz tjesnace, kanale i sl.) već i zbog normalnog rada motora. Kako se motorom ne bi upravljalo na način koji nije ekonomski ni tehnološki opravdan, tako da ga se odmah jako ili čak maksimalno opteretiti, ugrađeni su programi zaštite koji se u tom slučaju aktiviraju. U tom slučaju položaj ručice telegrafa neće utjecati na povećanje broja okretaja dok se uvjeti zaštitnog programa ne ispune. To su tlak ispirog zraka (turbopuhala još ne rade optimalno), temperatura ulja ili ležajeva (nije još postignut ravnomjeran uljni film) te zagrijanost radnih dijelova motora. Okretaji (opterećenje) motora povećavat će se u skladu s položajem ručice telegrafa tek pošto se ispune uvjeti zaštitnog programa.

Kada je promptno uvođenje maksimalnog opterećenja opravdano jer treba hitno napustiti sidrište zbog npr. nadolazeće oluje, programi zaštite mogu se premostiti pritiskom na tipke *VERRIDE*.

Ako je iz nekog razloga upravljanje glavnim motorom s mosta onemogućeno, upravlja se iz *ECR* ili s lokalne konzole, a nalozi se izdaju telefonski ili radio vezom s mosta.

Ručica telegrafa analogna je mjenjaču automobila. Svakom položaju ručice odgovara određeni postotak nominalnog broja okretaja. Podjela ne mora nužno biti kao na NorControl-ovoj upravljačkoj konzoli. Druga opcija prikazana je u tablici dolje.

Tablica 2. Oznaka položaja ručice i odgovarajući broj okretaja [8]

Oznaka polja	Broj okretaja [% n_{nom}]
DEAD SLOW	30
SLOW	40
HALF	50
FULL	70
FULL SEA SPEED	100

Sustav s ručicom telegrafa i regulatorom broja okretaja predstavlja zatvoreni regulacijski krug (petlja). Primjer otvorenog regulacijskog kruga jest vožnja automobila. Vozač u ovisnosti o uvjetima na cesti djeluje na papučicu gasa i podešava, mijenjanjem broja okretaja motora, brzinu vozila. Ručica telegrafa, ili preciznije, svaki položaj ručice, predstavlja određenu podešenu (željenu) vrijednost broja okretaja (engl. set point). Kada se broj okretaja propelera (vrtila) poremeti, aktivira se regulator broja okretaja koji djeluje na visokotlačne pumpe goriva, tako da ponovno nastoji postići podešenu vrijednost. U ovakvom regulacijskom krugu čovjek nije potreban.

Broj okretaja se može fino regulirati. Dakle, moguće je postići vrijednosti broja okretaja unutar podjele kao u tablici. Ta je opcija najčešće ugrađena samo na upravljačku konzolu u *ECR*.

Startanje motora se vrši postavljanjem ručice telegrafa u položaj *SLOW* jer *DEAD SLOW* u većini slučajeva ne garantira uspješno upućivanje.

2.1.8. Priprema glavnog motora za pogon

Motori velikih snaga kakvi se koriste za poriv brodova prije upućivanja trebaju se pripremiti. Ukoliko se neke predradnje ne bi provele upućivanje bi bilo otežano i uz veće trošenje

strojnih dijelova ili bi bilo nemoguće. Uobičajena je procedura da dežurni časnik palube javlja u strojarnicu (dežurnom časniku stroja) vrijeme kada bi brod trebao biti pripravan za plovidbu. To je časniku stroja dovoljna informacija kako bi pripremu glavnog motora mogao započeti na vrijeme. Časnik palube mora znati da je za kvalitetnu pripremu potrebno izvjesno vrijeme⁵⁴ te će ovdje ukratko biti opisana procedura.

Dizelske motore potrebno je prije upućivanja **predgrijati**, odnosno postići temperature bliske normalnim radnim temperaturama. Radi se u stvari o predgrijavanju košuljica cilindara (negdje i rasprskача goriva) visokotemperaturnom slatkim rashladnom vodom. Budući da će se taj sustav obrađivati kasnije, dovoljno je ustvrditi da će vrijeme potrebno za proces predgrijavanja ovisiti o učinku predgrijača. Vrlo je česta praksa, a posebno kod brodova koji se kratko zadržavaju u luci (RO-RO, kontejnerski), da časnik stroja, odmah po primitku komande s mosta kako je s 'glavnim motorom gotovo', započinje predgrijavanje. Praktički se održavaju iste temperature. Od toga je potrebno odstupiti kada je poznato da će motor biti zaustavljen dulje vrijeme pa bi se nepotrebno trošila energija ili je tijekom tog perioda potrebno vršiti neke radove na motoru pa je zbog posade stroja poželjno motor ohladiti.

Proizvođači motora preporučuju da se 30-60 minuta prije startanja motora upute **pumpe ulja** za podmazivanje. Točno vrijeme ovisi o proizvođaču i tipu motora. Takva potreba slijedi iz želje za smanjenjem trošenja metalnih površina prilikom upućivanja kada je trošenje najveće. Ako se brod u luci kratko zadržao, glavne se pumpe ulja nisu uopće zaustavljale. Cilindarsko ulje ubrizgava se u cilindre (ručno), a zatim se razmazuje polaganim pokretanjem motora.

Provjerava se sustav **zraka za startanje** (iako je rad kompresora automatiziran). Tlak u spremnicima se provjerava (rad kompresora zraka je automatiziran pa bi trebao biti u redu), a ispušta se sakupljena voda. Voda bi mogla izazvati hidraulički udar pa se ispušta jednom u 24 sata ili prije upućivanja. Kod modernih pogona i to može biti izvedeno automatski (vremenski relej upravlja elektromagnetskim ventilom za ispuštanje). Ako postoje izolacijski (zaporni) ventili, časnik stroja mora dovesti zrak do glavnog ventila za upućivanje.

Polaganim zakretanjem motora razmazuje se ulje i **propuhuju cilindri**. Propuhivanje se vrši kroz indikatorske pipce na glavama cilindara. Uobičajena je praksa da dežurni časnik stroja po primitku komande 's glavnim motorom gotovo' otvara indikatorske pipce na glavama svih cilindara pa bi isti prilikom pripreme motora trebali biti otvoreni. Na taj se način iz cilindara istiskuje moguća tekućina (puštanje košuljice, brtve, curenje rasprskача). Nakon provedenog propuhivanja indikatorski pipci se zatvaraju. Polagano pokretanje se može izvesti s uputnim zrakom (preko posebnog *slow turn* ventila)⁵⁵ ili uređajem za polagano pokretanje. Potrebno je napraviti barem jedan puni okret motora.

Gorivo se priprema na način da se postigne potreban tlak i kinematički viskozitet goriva na ulazu u motor (usis visokotlačnih pumpi). Tlakovi su najčešće do 1 MPa, a kinematički viskozitet za većinu motora 13 – 17 cSt (2 – 3 °E)⁵⁶. Današnji motori uvijek rade na tešku naftu. Upućuju se i zaustavljaju na tešku naftu, koja kod sobne temperature može biti čak i krutina. Zbog toga, nakon zaustavljanja motora, cirkulacijska pumpa goriva nastavlja s radom. Može se smanjiti temperatura goriva, ali ono cirkulira cjevovodom, grijući visokotlačne pumpe i rasprskаче. Nekad se manevriranje obavezno moralo vršiti s lakim dizelskim gorivom. Kada se starta na teško gorivo, priprema sustava goriva znači podešavanje željenog viskoziteta te startanje napojnih pumpi goriva (prije samog upućivanja).

Ukoliko postoje **pomoćna puhala** uključuje se opcija za automatski rad. Budući da turbopuhala ne rade (ne radi motor, nema ispušnih plinova) tlak ispirnog zraka je nedovoljan te se odmah i startaju. Dalje se uključuju po potrebi, tj. kada tlak ispirnog zraka padne.

⁵⁴ U nuždi se normalna procedura može preskočiti pa postupak pripreme dizelskih motora kraje vrlo kratko.

⁵⁵ Zato je potrebno provjeriti i pripremiti sustav zraka za upućivanje.

⁵⁶ St (Stokes) ili cSt su SI jedinice, a u praksi se pojavljuju stupnji Englera, sekunde Redwooda i dr.

Savjestan časnik palube uvijek će prije manovre provjeriti sustav **prekretanja**, ukoliko to prije njega nije izvršio časnik stroja. To je posebno važno kod uplovljavanja broda u luku ili sidrište. Motorom se upravlja preko sustava manevarskog zraka, koji može otkazati. Ako je provjera izvršena neposredno prije (a sve se radnje bilježe na pisaču strojarnice) posada je učinila sve što je ljudski moguće te će osiguravajuće društvo pokriti moguću štetu. U suprotnom, odgovorna je posada, točnije, komandant broda. Neki sustavi imaju ugrađenu opciju provjere izvršenja prekretanja pa ukoliko nije izvršena, prilikom startanja motora sustav ne 'sluša' ručicu telegrafa, već najprije nakratko zavrti motor u suprotnom smjeru.

Sustav rashlade motora objasniti će se kasnije, no potrebno je startati pumpe niskotemperaturne slatke rashladne vode, morske vode, dok pumpe visokotemperaturne vode već rade (predgrijavanje).

Osim ovih radnji koje su direktno povezane s glavnim porivnim strojem, prije plovidbe je, u ovisnosti o izvedbi strojnog kompleksa, potrebno izvršiti i neke dodatne radnje. Starta se kormilarski uređaj (danas hidraulički) i priprema sustav ulja za podmazivanje ležajeva statvene cijevi⁵⁷. Startaju se pumpe ulja za podmazivanje reduktora, ako isti postoji. Provjerava se propeler, odnosno da se u zahvatu propelera ne nalazi kakvo manje plovilo. Ovo je naravno potrebno učiniti prije, no nije povezano sa samim strojem. Isto kao i dizanje sidra ili odvezivanje broda. Gotovo svi dizelmotorni pogoni uključuju i kotao na ispušne plinove. Kod nekih rješenja se prije startanja motora obavezno mora startati cirkulacijska pumpa kotla na ispušne plinove jer bi cijevi istog mogle pregorjeti.

Ovim se poglavljem željelo časniku palube, ne uz sve detalje, objasniti od čega se sastoji postupak pripreme glavnog motora za pogon, kako bi: mogao predvidjeti potrebno vrijeme za uobičajenu proceduru pripreme te najaviti početak iste časniku stroja; mogao u osnovnim crtama uočiti mogućnosti greške u postupku ili interpretirati alarme koji se pri startanju mogu javljati; savjesno koristiti porivni stroj, kako bi se produžio radni vijek istog te smanjili eksploatacijski troškovi.

2.1.9. Mjerenje utroška goriva

Mjerenje utroška goriva je važno kako bi se mogla planirati plovidba, odnosno luka u kojoj će biti nužno potrebno ukrati nove zalihe. Mjerodavno je utvrđivanje preostale količine goriva sondiranjem tankova⁵⁸, a utrošak slijedi iz prethodnog stanja.

Budući da se sustavima na modernom brodu upravlja kompjuterski i određivanje utroška goriva može biti u svakom trenutku dostupno. Naime, u svakom tanku ugrađen je daljinski davač razine i daljinski davač temperature te je jasno da se na osnovi poznatih volumena u skladišnim tankovima jednostavno može odrediti masa goriva u svakom tanku i ukupno. Nedostatak ove metode sastoji se u mjerenju utroška prije ispuštanja taloga iz taložnih tankova i čišćenja u separatorima. Ispust iz taložnih tankova i separatora također je plaćen po cijeni goriva (iako to u biti nije). Svi potrošači opskrbljuju se gorivom iz dnevnih tankova u kojima je gorivo već pročišćeno.

Također, u sustavu goriva glavnog porivnog stroja ugrađuju se mjerači protoka. Mogu biti samo lokalnog tipa, no ako su daljinski, njihov se signal može koristiti u kontrolnoj prostoriji strojarnice i na mostu. Neovisno o kompjuterskom upravljanju, ali može i uz primjenu kompjutera. Signal na mostu trebao bi koristiti časniku palube za određivanje kursa koji će rezultirati najefikasnijom plovidbom, tj. plovidbom koja će uz postojeće vanjske uvjete

⁵⁷ Kroz statvenu cijev prolazi propelerno vratilo, a ležajevi su klizni i podmazuju se uljem.

⁵⁸ Iz tablica kapaciteta tankova na osnovi izmjerenih vrijednosti utvrđuje se volumen goriva u tankovima. Zatim se za poznatu temperaturu goriva određuje gustoća (tablice, korektivne formule) te slijedi masa prema $m = V\rho$.

(valove, morske struje, vjetar, zakrivljenost zemljine kugle, potrebno vrijeme dolaska u luku) imati najmanju potrošnju te zbog toga najveću zaradu.

Nedostatak je gornje metode da ne mjeri ukupno utrošeno gorivo. Gorivo se troši i u generatorima električne struje, generatorima pare te spaljivaču smeća. Također, pročišćavanjem goriva u separatorima, odstranjuju se mehaničke nečistoće i prisutna voda.

Neke druge metode, u stvari nisu mjerenje već izračunavanje utroška goriva. Prema krivuljama tzv. prostornih dijagrama, snimljenih pri pokusnoj vožnji, a za poznatu nosivost (ukrcanu količinu tereta), trenutnu snagu stroja i broj okretaja propelera, može se odrediti specifična i dnevna potrošnja.

2.1.10. Primjeri postupaka u nuždi

Uvidom u prethodna poglavlja o različitosti porivnih sustava, izvedbi propulzora pa i načinima upravljanja, vidljivo je da broj elemenata porivnog sustava koji mogu otkazati i mogućih reakcija časnika palube, možda nije nemjerljiv, ali svakako prelazi obim ovog nastavnog materijala. Pretpostavka je da će se uz poznavanje tipičnih, najčešćih situacija, budući časnik moći snaći i na drukčijim pogonskim sustavima, pravovremeno reagirati i spriječiti teže havarije.

Cilj je ovog dijela istaknuti različite mogućnosti reagiranja u slučaju nužde, kako s mosta tako i s drugog upravljačkog mjesta te potrebu uvježbavanja reakcija, barem za one najčešće slučajeve porivnog sustava. Često se u medijima objavljuju vijesti o sudarima i nasukanjima, pa iako nedovoljne i neprecizne, daju naslutiti da se moglo reagirati i drukčije. Ili se barem mogu postaviti pitanja odgovornim osobama zašto nisu reagirale drukčije. Osim toga, autoru je više puta ukazano kako je studentima potrebno dati što više praktičnih znanja, nauštrb, suhopраниh, možda i nepotrebnih, teoretiziranja.

Vrlo česta izvedba porivnog sustava jest sa sporohodnim dizelskim motorom te propelerom s fiksnim krilima. Veza motora i propelernog vratila je kruta te se promjena smjera vrtnje istog mora izvesti preokretanjem motora. Bitan je i stupanj automatiziranosti pogona⁵⁹ pa neka je u ovom slučaju oznaka stroja AUT1. Tijekom manevriranja (koje se izvodi upravljanjem s mosta) komandant uočava da je otkazala komanda glavnog stroja, tj. s mosta se ne mogu smanjiti okretaji motora. Upravo zbog ovakve situacije, iako to oznaka automatiziranosti pogona ne zahtijeva, prilikom manevriranja stalna je praksa da se u *ECR* nalaze upravitelj stroja, dežurni časnik te električar. Dakle, zbog predostrožnosti, prilikom manevriranja ponašanje je u skladu s obaveznim u slučaju oznake AUT2. Komandant javlja u *ECR* o problemu, upravljanje se prebacuje u *ECR*. Ako je potrebno upravljanje može biti vođeno i lokalno. Ako je međutim dovoljno samo zaustaviti stroj (ne treba ga prekrenuti i zavoziti krmom) na upravljačkim konzolama postoji opcija ZAUSTAVLJANJE U NUŽDI (engl. EMERGENCY STOP) pa komandant broda treba procijeniti o korištenju iste.

Nešto drukčija izvedba porivnog sustava je s propelerom s prekretnim krilima. Što u ovom slučaju znači nemogućnost smanjenja plovidbene brzine? Opet je kritičan slučaj pri manovri jer na otvorenom moru nema često potrebe za takvom akcijom, a ima i prostora. Ovdje se brzina mijenja promjenom nagiba krila propelera pa nemogućnost smanjenja brzine znači otkazivanje sustava upravljanja s mosta ili hidrauličkog sustava prekreta. I opet se upravljanje može prebaciti u *ECR*, a ako je i taj sustav daljinskog upravljanja otkazao, može

⁵⁹ Prema HRB postoje klase AUT1, AUT2 i AUT3. Oznaka AUT2 odnosi se na brodove na kojima je predviđena strojarnica bez nadzora i sa stalnom službom na središnjem mjestu upravljanja – *ECR*. Oznaka AUT1 odnosi se također na strojarnicu bez nadzora, ali bez stalne službe na mjestu nadzora. Oznaka AUT3 odnosi se na brodove s porivnim strojevima do 1500 kW (iako može i više), a upravljanje strojnim kompleksom izvodi se s mosta.

se upravljati lokalno. Ako je kvar u 'hidraulici' pa su krila propelera ostala blokirana u krajnjem položaju prema naprijed, najvjerojatnije postoji mogućnost lokalnog tlačenja ulja i promjene nagiba krila. To međutim, možda nije dovoljno brzo, pa se i u ovoj izvedbi ostavlja mogućnost zaustavljanja motora u nuždi te iznimno, mogućnost prekreta motora (izvedba kao s propelerom s fiksnim krilima).

Izvedbe sa srednjehodnim motorima razlikuju se zbog postojanja reduktora, a kod nekih manjih snaga i izvrstive spojke. Mogućnosti i u ovom slučaju ovise o oznaci automatiziranosti pogona te izvedbi propelera.

Ako postoji više porivnih strojeva, mogućnosti je više te je na prvi pogled upravljanje kompliciraniji postupak. Sa stanovišta sigurnosti poriva, takva je izvedba sigurno povoljnija. U ovom slučaju treba znati da li dva porivna stroja (ili više) pokreću i odgovarajući broj brodskih vijaka ili su preko reduktora spojeni na jedan vijak. Ako je kvar samo u sustavu daljinskog upravljanja, upravljat će se lokalno, a ako je kvar u jednom od strojeva, poriv će se ostvariti s preostalim. Zašto je izvedba s dva vijka bolja? Kao primjer se može uzeti slučaj poriva s dva motora te dva vijka sa zakretnim krilima. Jednom motoru otkaže upravljanje u položaju najvećeg broja okretaja, a na odgovarajućem vijku krila ostanu zaglavljena u položaju maksimalno prema naprijed. Kako bi se zaustavio brod, osim opcija koje i ovdje vrijede (prebacivanja upravljanja u *ECR* ili lokalno te zaustavljanja u nuždi), postoji još jedna. Drugim motorom s maksimalnim brojem okretaja i podešenim nagibom krila za maksimalno unazad, postići će se praktički zaustavljanje. Ili barem, takvo usporenje, koje će osoblju stroja pružiti dovoljno vremena kako bi otklonilo kvar.

Ovakvi su pogonski sustavi daleko sigurniji u smislu nastavljanja plovidbe nakon havarije porivnog stroja. Kako bi na neki način umanjili taj nedostatak proizvođači sporohodnih motora (misli se na izvedbe s jednim) nude uređaj za nastavak plovidbe s havariranim motorom (engl. take me home device). Radi se o hidromotoru⁶⁰ privješenom na međuvratilo, kojemu je za rad potrebna samo električna energija. Budući da je pretpostavka o raspoloživosti električne energije prilično realna (jer je brodski elektroenergetski sustav izveden s više glavnih generatora struje), realno je očekivati mogućnost nastavka plovidbe smanjenom brzinom. Havarija glavnog stroja vjerojatno je takve prirode da će biti potrebno isključiti ga iz porivnog sustava (otпустiti vijke krute spojke koljeničastog vratila motora i međuvratila) kako bi se poriv mogao nastaviti spomenutim uređajem.

Ovdje se nisu objašnjavale situacije s parnim ili plinskim turbinama jer su znanja o njima nedovoljna, kao niti situacije korištenja kormilarskog uređaja u nuždi jer je to dio kasnijeg poglavlja o pomoćnim uređajima.

2.2. Parnoturbinski porivni sustavi

Prednosti i nedostaci ovakvih sustava već su navedeni. Takva su rješenja danas rijetka, no časnik palube mora znati neke osnovne karakteristike istih. Prije objašnjenja izvedbi i rada turbina, treba objasniti proizvodnju radnog fluida – **pare**. Para se proizvodi u uređajima koje nazivamo **generatori pare**⁶¹.

⁶⁰ O osnovama 'industrijskih' hidrauličkih sustava i njihove primjene na brodovima govorit će se u poglavlju *Brodski cjevovodi*.

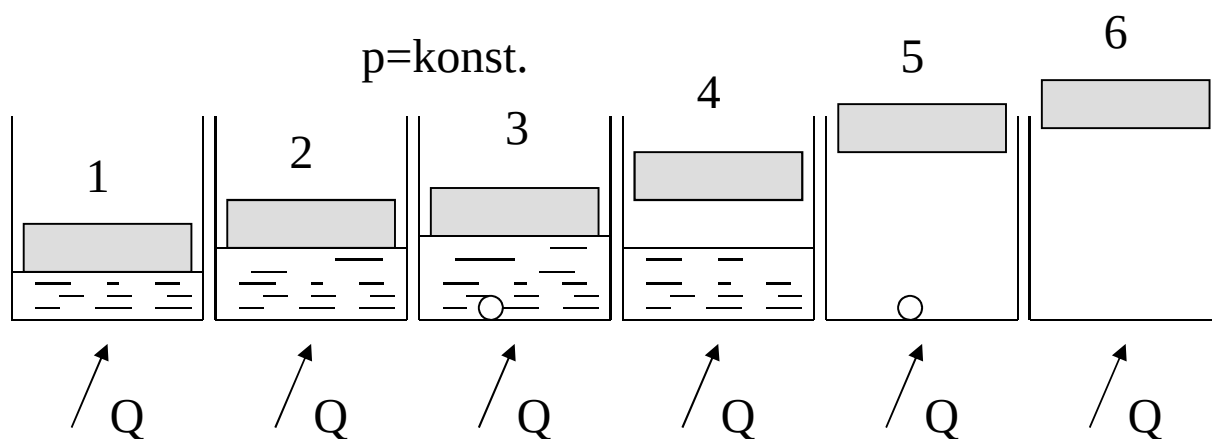
⁶¹ Pojam kotao je neprecizan jer se ovdje radi o visokim tlakovima i temperaturama. Pojam kotao koristi se na brodovima obalne plovidbe, a 'proizvodi' toplu vodu ili paru tlaka do 0,1 MPa.

2.2.1. Voda i vodena para

Kako bi se usvojili osnovni pojmovi pri procesu pretvorbe vode u vodenu paru opisat će se pokus s hermetički zatvorenom posudom. U nju je smještena jedinična masa vode (1 kg) pri npr. sobnoj temperaturi. S gornje je strane posuda zatvorena pomičnim klipom poznate mase, zbog kojega se može tvrditi da će se proces odvijati pri konstantnom tlaku. Posudi se kontinuirano dovodi toplina, kao na slici 31. Većini se materijala dovođenjem topline povećava specifični volumen tj. šire se. Agregatno stanje je tekućina, sve dok ne nastane prvi mjehurić pare⁶².

Taj trenutak ili stanje, naziva se općenito vrela tekućina, a u ovom slučaju **vrela voda**⁶³. Daljnjim dovođenjem topline mijenja se samo omjer tekuće i plinovite faze u posudi, no temperatura ostaje konstantna sve do trenutka kad nestane zadnja kapljica vode. To karakteristično stanje naziva se **suhozasićena para** i bitna je za rad brodskih parnih sustava⁶⁴.

Sva toplinska stanja između vrela vode i suhozasićene pare nazivaju se **zasićena** ili **mokra para**. Karakterizira ih tlak ili temperatura zasićenja, koji se međusobno jednoznačno određuju te stupanj zasićenosti x . Veličina x predstavlja udio plinovite faze. Za stanje vrela vode je $x=0$, za stanje suhozasićene pare $x=1$, a za bilo koju zasićenu paru vrijedi $0 < x < 1$.



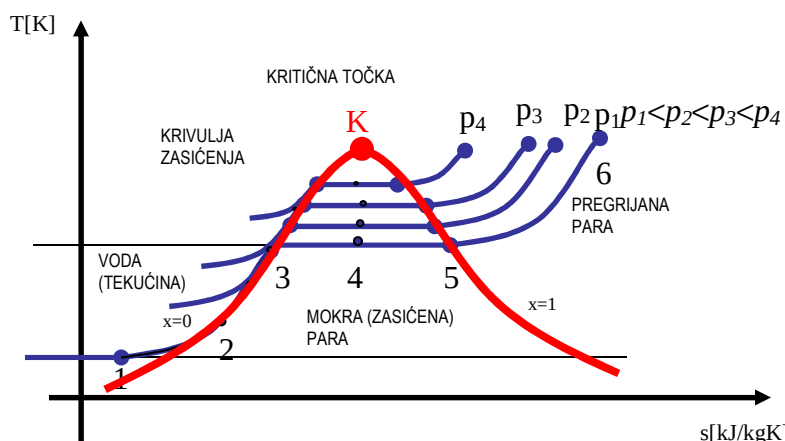
Slika 31. Promjena stanja vode zbog dovođenja topline: (1) voda je tekućina sobne temperature, (2) i dalje je tekuća faza, ali većeg specifičnog volumena, (3) nastaje prvi mjehurić pare, (4) raste udio plinovite faze, (5) upravo nestaje zadnja kapljica vode, (6) ponaša se poput plina, naglo raste specifični volumen [8]

Ako se suhozasićenoj pari i nadalje dovodi toplina, raste joj temperatura i ona postaje **pregrijana**. Takva se para koristi kao radni fluid turbina velikih snaga. Stacionarni generatori pare i turbine koriste pregrijanu paru temperature i do 650°C , a brodski do 550°C .

⁶² Mjehurić nastaje u mikroskopskim neravninama materijala posude ili oko čestice nečistoće u vodi.

⁶³ Na sličnim termodinamičkim osnovama rade parno-kompresijski rashladni uređaji, ali se u njima ne koristi voda već različita sredstva (R-12, R-22, CO_2 , NH_3 i dr.).

⁶⁴ Budući da se para većinom koristi samo kao ogrijevni medij, brodski generatori pare teoretski proizvode upravo suhozasićenu paru određenog tlaka. U stvarnosti je para na izlazu iz generatora ipak malo mokra.



Slika 32. Konstrukcija T-s dijagrama i karakteristične točke procesa pretvorbe vode u vodenu paru [8]

Opisani eksperiment može se provesti za različite tlakove, tako da se mijenja masa klipa ili se na klip stavljaju utezi različitih masa. Za svaki pojedini tlak izmjerit će se različite karakteristične veličine pa kada se iste zabilježe nastaje dijagram kao na slici 32.

Proces promjene stanja od vrele tekućine do suhozasićene pare naziva se isparivanje, a obrnuti proces, od suhozasićene pare k vreloj tekućini, kondenzacija. Oba se odvijaju pri jednakom i konstantnom tlaku i temperaturi.

Primjer: Kada će voda u otvorenoj posudi prije početi isparivati, na razini mora ili vrhu visoke planine (8000 m)? Postavit će se jednaki uvjeti. Voda se nalazi u dobro izoliranoj posudi i na početku je temperature 0°C, a količine dovedene topline u jedinici vremena također su jednake.

Rješenje: Ako su zadani jednaki početni i vanjski uvjeti, potrebno je odrediti u kojem će od dva slučaja ukupno dovedena količina topline (od početne temperature do nastanka prvog mjehurića) biti veća. Ako je količina dovedene topline data izrazom

$$Q = m_{\text{vode}} c_{\text{vode}} (T_s - T_o),$$

a uz neka približenja (specifični toplinski kapacitet vode kroz cijeli proces je jednak) sve su veličine u dva promatrana slučaja jednake, osim temperature zasićenja (početka isparivanja) T_s . Poznato je da se temperature zasićenja i tlak zasićenja jednoznačno određeni pa će se temperatura T_s odrediti tlakom zraka na referentnim mjestima: razini mora i visini 8000 m.

Neka na razini mora atmosferski tlak iznosi 1033,23 hPa pa se iz toplinskih tablica može očitati temperatura zasićenja. Ista iznosi 100 °C (373 K). Tlak visine stupca zraka na planini visokoj 8000 m za toliko je manja (nije uzeta u obzir promjena gustoće zraka s visinom, ali ona bi još povećala razliku tlakova te će se zanemariti) i približno iznosi 236,66 hPa. Iz toplinskih tablica očitava se približna temperatura zasićenja koja iznosi 20 °C (293 K).

Očito je da vrijedi

$$373 - T_o > 293 - T_o,$$

odnosno na morskoj je razini potrebno dovesti više topline te se zaključuje da će voda prije početi isparivati na planini.

Kakva se voda koristi u brodskim generatorima pare? Netko bi mogao pomisliti jer se radi o pomorskim brodovima, da se radi o morskoj vodi, no upravo je suprotno. U modernim generatorima koristi se **destilirana voda**. Prirodna voda (izvorska voda ili kišnica) smije se koristiti samo u nuždi ili kada se radi o toplovodnom kotlu uz dodavanje kemikalija za odsoljavanje.

Iz naziva uređaja jasno je vidljiva njihova svrha – proizvodnja pare. Dakle, voda cirkulira generatorom kako bi dovedenu toplinu⁶⁵ preuzela te uslijed toga isparila. Ujedno hladi stijenke generatora pare. Kada to hlađenje ne bi bilo zadovoljavajuće stijenke bi pregarale ili pucale, a to se često i događa u praksi. Morska voda prosječne slanosti 38,5‰ pa čak i prirodna voda previše su 'tvrde', tj. imaju u sebi previše otopljenih tvari. Što je veća temperatura, to je tendencija nastanka kamenaca na stjenkama, veća.

Destilirana se voda na brodovima proizvodi u uređajima koje se općenito može nazvati **generatori slatke vode**. Takva se voda koristi i za piće, kuhanje i pranje. Naravno uz prethodnu obradu: mineraliziranje, steriliziranje. Redovito takva voda sadržava manje od 2 mg/l vode otopljenih mineralnih tvari, ali čak i takva ne zadovoljava brodske generatore pare koji rade pri višim režimima (tlakovi vrijednosti nekoliko desetaka bara i temperature pregrijanja preko 700 K). Tada se destilirana voda dodatno kemijski tretira. Takvi su slučajevi ipak rijetki pa se može reći da spomenuta destilirana voda s manje od 2 mg/l otopljenih tvari zadovoljava većinu brodskih generatora pare.

2.2.2. Primjena pare na brodu

Polazeći od učestalosti različitih porivnih sustava lako je doći do zaključka da se para na brodu uglavnom koristi za grijanje: (1) grije se gorivo (lako i teško) u skladišnim, taložnim i dnevnim tankovima te prije separacije (čišćenja), a grije se i kompletan cjevovod goriva u strojarnici; (2) grije se ulje prije separacije te u slivnom tanku glavnog motora; (3) grije se voda za pranje i kuhanje; (4) griju se prostorije posade (putnika) direktno ili indirektno - klimatizacijom; (5) može se grijati teret, a ako je riječ o tankeru za prijevoz sirove nafte to je značajna potrošnja pare i dr. Takvi se generatori nazivaju pomoćni. Razna palubna (pritezna i sidrena) vitla rijetko se danas izvode kao parna⁶⁶.

Para se može koristiti kao radni fluid parnih turbina. To mogu biti pomoćni uređaji: turbine koje pokreću generatore električne struje ili pumpe, ali i porivne turbine broda. Tada se govori o glavnim turbinama i glavnim generatorima pare. Na velikim tankerima pumpe tereta često su pogonjene parnim turbinama. Takva je primjena prilično svrsishodna jer se tijekom plovidbe para koristi za grijanje tereta, a pri iskrcaju za pogon turbina – pumpi tereta.

Kod dizelmotornog poriva, kada je para isključivo ogrjevni medij, uobičajeni tlak pare je oko 0,7 MPa (7 bar). To je srednja vrijednost tlaka, koji u stvarnosti oscilira između 6 i 8 bara⁶⁷. Za grijanje goriva HRB dopušta manometarski tlak pare do 2 MPa. Kod parnoturbinskih poriva tlakovi pare mogu se kretati u rasponu od 4 do 8 MPa (40 do 80 bar) pa čak i preko 10 MPa. Neke specijalne konstrukcije protočnih generatora pare rade s tlakovima blizu kritične točke pa čak i s nadkritičnim tlakovima.

2.2.3. Podjela brodskih generatora pare

Prva je već spomenuta. Ako proizvode paru za poriv broda su **glavni**, a ako se para koristi samo za pomoćne svrhe su **pomoćni generatori pare**. U generatorima pare ključna je izmjena topline pa se prema činjenici koji fluid cirkulira cijevima nazivaju **vatrocijevni** (ili

⁶⁵ U podijeli će se objasniti na koji način se dovodi toplina.

⁶⁶ U današnje doba amerikaniziranosti medija i dominaciji američke filmske industrije može se navesti jedna neuobičajena primjena pare. Polijetanje mlaznih aviona s paluba velikih nosača aviona izvodi se pomoću pare.

⁶⁷ Kasnije će biti riječi o regulaciji opterećenja. Kod pomoćnih generatora pare redovito se izvodi prema tlaku pare na izlazu iz generatora.

dimnocijevni ili plinocijevni), kada kroz cijevi struje dimni plinovi i, danas znatno češći, **vodocijevni**, kada kroz cijevi struje voda i para.

Toplina se može dovesti:

- tekućim (ili plinovitim ili krutim) fosilnim gorivom pa je generator pare u tom slučaju **loženi**;
- ispušnim plinovima iz nekog drugog toplinskog stroja (dizelskog motora ili plinske turbine) pa se kaže da je **na ispušne plinove** ili '**utilizacioni**';
- na bilo koji od prijašnja dva načina te je tada **kombinirani** ili **kompozitni**;
- nuklearnom reakcijom pa je generator pare tada **nuklearni**.

Kako je prije utvrđeno, zbog osnovnog cilja, proizvodnje pare, te nužnog hlađenja izmjenjivačkih površina, mora postojati cirkulacija vode i pare u cijevima⁶⁸. Ista može biti **prirodna** i **prisilna**. Ukratko, prirodna se postiže različitom gustoćom fluida u cijevima, a prisilna radom cirkulacijske pumpe. Pomoćni loženi generatori pare redovito su izvedeni s prirodnom cirkulacijom, dok su moderni generatori pare na ispušne plinove izvedeni s prisilnom cirkulacijom.

Ako je riječ o loženom generatoru pare u prostor izgaranja (ložište) osim goriva potrebno je dovesti i zrak za izgaranje. I to može biti izvedeno **prirodnim** putem ili **prisilno**. Prirodno je ostvarivo pomoću visokih dimnjaka (ciminjera, žarg.), no danas se vrlo rijetko može sresti takvo plovilo. Prisilno se izvodi različitim primjenama ventilatora. Nadalje, podjela loženih može se izvršiti i prema vrsti goriva. Redovito je riječ o teškoj nafti, dok se laka nafta koristi za potpaljivanje ili u nuždi, a plinovito gorivo na LNG brodovima.

2.2.4. Osnovne značajke brodskih generatora pare

Pod pojmom **pogonski** ili **radni tlak** podrazumijeva se najveća vrijednost manometarskog tlaka pare koja se može pojaviti pri normalnom radu. Prije je navedeno da vrijednost tlaka pare oscilira između dviju vrijednosti. Radi se o tzv. dvopozicionoj regulaciji.

Dopušteni ili **koncesijski tlak** je vrijednost s kojom se generator pare hidraulički ispituje (tlači) nakon izgradnje ili pregleda klase, a također i vrijednost na koju se podešavaju sigurnosni ventili sakupljača pare⁶⁹. U literaturi se sreću različite vrijednosti pa se negdje navodi da je 3 – 6 %, a negdje 5 – 10 % veći od pogonskog tlaka.

Ukoliko postoji pregrijač pare na njegovom se izlazu ugrađuje sigurnosni ventil. Vrijednost pri kojoj će se isti otvoriti predstavlja **izlazni tlak pregrijača pare** i najčešće je od 5 do 10 % manji od pogonskog tlaka. To je i logično jer pri strujanju kroz svaku cijev (pregrijač pare je također cijevni izmjenjivač topline) dolazi do pada tlaka pa će na izlazu tlak biti manji nego na ulazu, i nužno, jer se mora osigurati hlađenje pregrijača. Kada bi sigurnosni ventil na parnom bubnju otvorio prije, postojala bi mogućnost da u pregrijač ne dolazi dovoljno pare, cijevi bi se pregrijale i pregorile.

Svaki toplinski stroj ima neki stupanj iskoristivosti manji od jedan (ili 100 %), ali se isti mijenja s promjenom režima rada. Dobro projektirani i izgrađeni stroj ili uređaj imat će najveći stupanj iskoristivosti kod opterećenja (kapaciteta) s kojim će najčešće raditi. Kod generatora pare definira se količina pare koju proizvodi i obično ima najveći stupanj iskoristivosti pri 80 %-tnom kapacitetu. Taj se kapacitet naziva **normalni kapacitet** ili **učin** – D [t/h; kg/s].

⁶⁸ Nadalje u tekstu pretpostavlja se da je vodocijevna izvedba.

⁶⁹ Posuda u kojoj se sakuplja plinovita faza i iz koje se odvodi prema potrošačima - parni bubanj.

Kada ga ne bi trebalo održavati i ne bi se javljale greške u pogonu, generator pare teoretski bi kontinuirano morao raditi s **maksimalnim trajnim kapacitetom**⁷⁰. Kraće se vrijeme generator pare smije i preopteretiti, no zbog sigurnosnih se razloga to ograničava na 30 – 60 min. Takvo se opterećenje naziva **maksimalni kratkotrajni kapacitet**. Kod pomoćnih brodskih generatora pare dosta je važan i minimalni kapacitet. To je minimalna količina pare koju može proizvoditi u kontinuiranom i sigurnom pogonu⁷¹.

Pojam pretička zraka za izgaranje λ objašnjen je uz dizelske motore pa je ovdje potrebno navesti samo iznose istog. Generatori pare starije generacije radili su s pretičkom $\lambda=1,20$, dok moderni rade s $\lambda=1,10$ ili čak $\lambda=1,05$. Razlozi su kvaliteta goriva te moderniji sustavi automatskog upravljanja.

Kako usporediti generatore pare od kojih jedan proizvodi 4 t/h pare tlaka 2 MPa, a drugi 10 t/h pare tlaka 0,7 MPa? Koji je bolji, veće snage? Jedan proizvodi više pare u jedinici vremena, no druga je para 'kvalitetnija'. Kako bi se mogli usporediti uvodi se pojam normalne pare (0°C i atmosferskog tlaka).

Ako generator pare proizvodi pregrijanu paru za pogon turbine, jedna od bitnijih veličina je **temperatura pregrijane pare**. Mehanička svojstva konstruktivnih dijelova generatora pare i parne turbine ovise o temperaturi - s povećanjem temperature slabe, pa je praćenje promjena, pravovremeno upozoravanje o greškama i kvalitetna regulacija vrlo važna (dopušteno odstupanje temperature pregrijane pare iznosi +/- 5°C).

Toplinski stupanj generatora pare je relativno visok (80 %). Ako se definira kao omjer dobivene (odvedene) i uložene (dovedene) energije slijedi izraz

$$\eta_t = \frac{Q_{odv}}{Q_{dov}}.$$

Ako se radi o loženom generatoru pare, energiju dovodimo gorivom. Odvedena ili dobivena energija je izražena toplinskim sadržajem proizvedene pare. Uvrsti li se ovo u prethodni izraz slijedi

$$\eta_t = \frac{D(h_{izl,p} - h_{ul,v})}{B \cdot H_d},$$

gdje je u brojniku umnožak kapaciteta generatora pare D [kg/s] i razlike entalpije (sadržaja topline) h [J/kg] izlazne pare i ulazne vode, a u nazivniku umnožak količine utrošenog goriva B [kg/s] i donje ogrjevnice moći goriva H_d [J/kg].

Gubici pri radu generatora pare na tekuće gorivo javljaju se s osjetnom toplinom dimnih plinova, zračenjem na okolinu, neizgorenim gorivom (ugljikovodici prisutni u dimnim plinovima) te čađenjem⁷². Zračenje na okolinu smanjeno je na približno 1 %. Gubici s neizgorenim gorivom i čađom mogu se smanjiti odgovarajućim vođenjem procesa, kvalitetom goriva i izvedbom gorača. Nažalost, oni najveći, gubici dimnih plinova ne mogu se izbjeći jer bi za to bili potrebni glomazni izmjenjivači topline koji bi bili u stanju preuzeti toplinu od dimnih plinova i ohladiti ih na temperaturu okoline. Osim toga, hlađenjem dimnih plinova, zbog prisutnog sumpora u gorivu, nastaje sumporna kiselina i na zadnjim se izmjenjivačkim površinama generatora pare pojavljuje niskotemperaturna korozija. Zato se te površine (zagrijača zraka) zaštićuju emaljiranjem te se kod modernijih generatora pare dimni plinovi mogu hladiti do 115°C.

⁷⁰ Analogno se kod motora daje podatak MCR – maximum continuous rating (maksimalna trajna snaga).

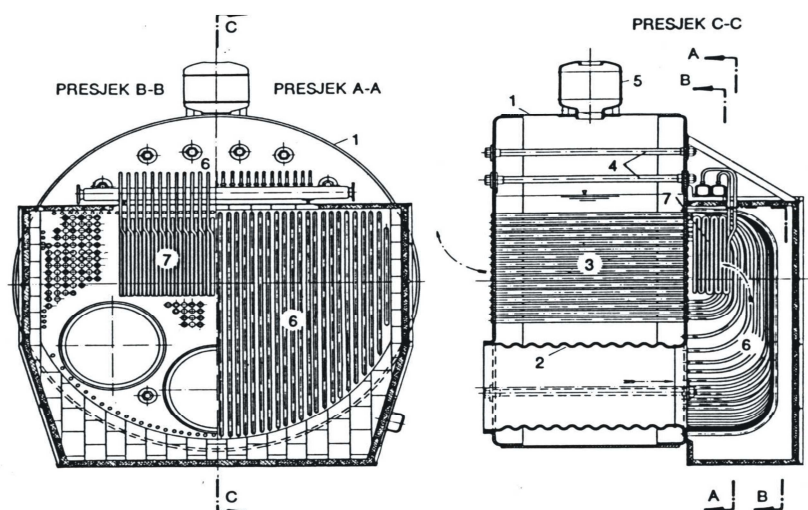
⁷¹ Nadam se da će čitatelju biti jasnije kada se objasni sustav regulacije opterećenja.

⁷² Kada se radi o krutom gorivu ima još gubitaka.

2.2.5. Konstruktivne karakteristike i dijelovi

Starije, gotovo napuštene izvedbe generatora pare, su vatrocijevne izvedbe. Na slici 33 prikazan je jedan takav, vatrocijevni generator pare. Susreću se i nazivi škotski te cilindrični kotao. Ovaj ima tri plamenice, a broj im se kretao od dvije do četiri. Nekada je na dnu plamenice bila rešetka za ugljen, a novije po sredini imaju gorač. Na bočnom presjeku označena je razina vode pa je očito riječ o velikom sadržaju vode.

Takvi kotlovi nisu bili predviđeni za velike tlakove i kapacitete (10-tak bar i 10-tak t/h). Zbog velikog sadržaja vode period pripreme trajao je dugo (kada je riječ o glavnom kotlu dovođenje pod radni tlak trajalo je i nekoliko sati) i bili su prilično opasni u slučaju eksplozije (opet zbog velike količine vode). Imaju, treba to reći, i neke prednosti: nisu osjetljivi na kvalitetu vode i dobro podnose nagle promjene opterećenja.



Slika 33. Vatrocijevni generator pare proizvođača 'Howden-Johnson', gdje je 1 – cilindrični plašt, 2 – plamenica od korugiranog lima, 3 – dimne sijevi, 4 – kotveni vijci, 5 – parni dom (sakupljač pare), 6 – konvektivni snop isparivača, 7 – pregrijač pare [7]

Kada su se pojavile potrebe za većim kapacitetima, na brodove su se počeli ugrađivati vodocijevni generatori pare. Radi se o periodu između dva svjetska rata, kada se za velike ratne jedinice nosivosti oko 30000 t zahtjevala plovidbena brzina od 30-tak čvorova. Od tada su se generatori pare dosta promijenili pa će se ovdje navesti modernije konstrukcije.

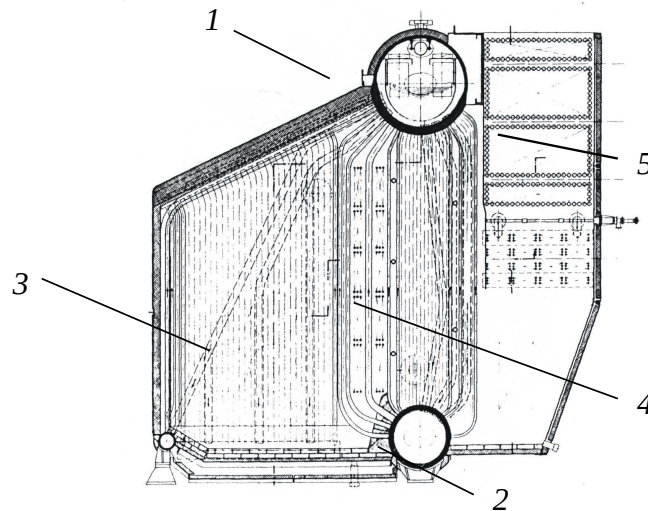
Na slici 34 prikazan je D tip generatora pare. Karakterističnog je oblika i s uočljivim cilindričnim posudama (**parnim i vodenim bubnjem**). Moderni imaju ekransko ložište, tj. izmjena topline u ložištu je uglavnom zračenjem. U dimnom kanalu smještaju se dodatni konvektivni isparivači, snopovi pregrijačkih cijevi te na kraju zagrijač vode i zraka. Više je u osnovi sličnih konstrukcija koje se razlikuju prema izvedbi isparivačkih cijevi u ložištu, izolacije, konvektivnog isparivača, pregrijača i regulacije temperature pregrijane pare te zagrijača vode i zraka.

Takvi generatori pare proizvode do 80 t/h pare tlaka od 4 do 8 MPa i temperature do 800 K. Na VLCC i ULCC brodovima može biti spregnuto i više takvih generatora pare kako bi se postigao traženi kapacitet (grijanje tereta i pogon pumpi tereta).

Osnovni dijelovi generatora pare su:

- **temelj**, preko kojega se oslanja na brodsku konstrukciju i koji mora osigurati dilataciju generatora pare pri zagrijavanju;
- **isparivač**, koji se sastoji od cijevi, bubnjeva i komora, a može biti ozračen i konvektivan;

- **pregrijač pare** je konvektivni izmjenjivač topline koji se sastoji od snopova cijevi izrađenih od visokolegiranog čelika kako bi bile otpornije na visoke temperature;
- **zagrijač vode** u kojemu se ista predgrijava prije uvođenja u parni bubanj;
- **zagrijač zraka** predgrijava zrak za izgaranje prije nego se isti uvede u ložište, a dodatna je izmjenjivačka površina kako bi se što više iskoristila energija plinova;
- **izolacija** se nekad izrađivala od šamotnih opeka, a danas od mineralne vune;
- **armatura** (zaporna, sigurnosna, regulacijska i kontrolna) i **pomoćni sustavi**.



Slika 34. Integral-D tip: 1 – parni bubanj, 2 – voden bubanj, 3 – ložište (s jednim ili više gorača), 4 – konvektivni isparivač, 5 – dimni kanal s dodatnim izmjenjivačkim površinama (isparivačke cijevi, snopovi pregrijača, zagrijači vode i zraka) [7]

U ložištu se smješta jedan ili više gorača (plamenika)⁷³. Svrha je dovesti odgovarajuću količinu gorive smjese za sve režime rada generatora pare, a da pri tome gorivo bude dobro raspršeno i pomiješano s dovoljnom količinom zraka te da plamen jednoliko zagrijava cijevi koje ograđuju ložište. Gorivo se može raspršivati tlakom (poput rasprskaa dizelskih motora), pomoću komprimiranog zraka, pare, a vrlo su česti rotacijski gorači. Kritična je situacija potpaljivanje, no o tome će biti riječi kod automatskog upravljanja generatorom pare.

Izgaranjem se stvaraju visoke temperature te toplina zračenjem s plamena prelazi na cijevi. U modernim generatorima pare cijevi su tijesno priljubljene ili međusobno zavarene, čime je omogućena kompaktnija izvedba izolacije⁷⁴. Iz ložišta, zbog razlike tlakova, dimni plinovi struje u dimni kanal u kojem se izmjena topline vrši uglavnom konvekcijom. Tu su konvektivni isparivač (koji se kod nekih konstrukcija napušta), pregrijači, zagrijač vode i zraka.

U isparivačkim cijevima (ozračenog ili konvektivnog isparivača) voda preuzima toplinu sa stijenke cijevi te nastaju mjehuri pare. Gustoća pare je daleko manja od gustoće tekuće vode te mjehuri struje većom brzinom, a srednja gustoća u takvoj cijevi manja je od gustoće u cijevi u kojoj nema isparivanja. Cijevi koje ograđuju ložište te cijevi konvektivnog isparivača koje su bliže izlazu dimnih plinova iz ložišta zbog toga su uzlazne, a cijevi u kojima je hladnija, tekuća voda, su silazne. Sve cijevi, direktno ili indirektno ako su povezane cijevima većeg promjera (komorama), omogućuju potrebnu cirkulaciju vode/pare između parnog i vodenog bubnja.

Para se sakuplja u parnom bubnju (sakupljaču pare, parnom prostoru) i kroz glavni parni ventil vodi prema potrošačima (kada je riječ o zagrijavanju) ili prema sekcijama pregrijača (kada parom pogonimo parne turbine).

⁷³ Ako se radi o tekućem ili plinovitom gorivu.

⁷⁴ Nema strujanja dimnih plinova s vanjske strane cijevi pa se izolacija oslanja na vanjsku stjenku cijevi.

S ciljem iskorištenja topline dimnih plinova nakon pregrijača ugrađuje se zagrijač vode u kojem se napojna voda zagrijava skoro do temperature zasićenja (isparivanja). Generator pare može, u nuždi, raditi i bez zagrijača vode. Dodatni izmjenjivač topline jest i zagrijač zraka. Bez njega je također moguć rad generatora pare.

Povremeno se na cijevima u dimnom kanalu nakupi čađa, koja smanjuje koeficijent izmjene topline⁷⁵ i uslijed toga kapacitet generatora pare. Zbog toga se u dimni kanal ugrađuju propuhivači čađe. Propuhivanje se vrši na otvorenom moru pri radu generatora pare.

2.2.5.1. Cirkulacija vode i pare

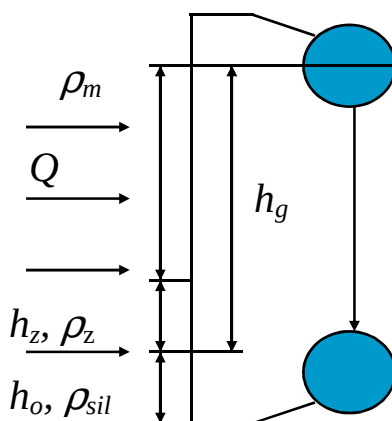
Generator pare na slici 34 izveden je s prirodnom cirkulacijom. Gustoća vode se malo mijenja s promjenom temperature, no znatno se mijenja s promjenom agregatnog stanja. Razlika gustoće vode i srednje gustoće smjese tekuće vode i mjehura pare, kod većine izvedbi, dovoljno je velika kako bi se postigla potrebna razlika tlaka, tj. strujanje u cijevima generatora pare. Neke specijalne konstrukcije generatora pare, koji rade s tlakovima višim od 10MPa⁷⁶, moraju biti izvedeni s prisilnom cirkulacijom. Moraju imati cirkulacijsku pumpu.

Sljedeći izraz daje razliku tlaka uslijed različite gustoće fluida u cijevima generatora pare

$$\Delta p_u \cong (h_g - h_z)(\rho_{sil} - \rho_m)g \text{ [Pa]} ,$$

a odnosi se na shematski prikaz nastujavanja dimnih plinova na cijevi generatora pare prikazan na slici 35. Razlika visine vode između razine u parnom bubnju i dna generatora pare je $h_g + h_o$, no na dio uzlazne cijevi h_o ne dolaze plinovi te je gustoća jednaka gustoći u silaznoj cijevi. U dijelu uzlazne cijevi h_z dolazi do zagrijavanja, ali ne i do isparivanja te je gustoća ρ_z približno jednaka gustoći ρ_{sil} . U dijelu uzlazne cijevi visine $h_g - h_z$ gustoća je ρ_m – srednja gustoća tekuće i plinovite faze.

Lako je dokazati da, uz usvojeno pojednostavljenje, vrijedi gornji izraz. Ostvarena razlika tlaka 'troši' se na savladavanje trenja u cijevima.



Slika 35. Hidrodinamika prirodne cirkulacije [8]

Kad odgovarajuće cirkulacije ne bi bilo, generator pare ne bi mogao proizvoditi potrebne količine pare, i očito je da su ove dvije veličine u korelaciji. Efikasnost generatora pare može

⁷⁵ Talog na cijevima predstavlja toplinski otpor.

⁷⁶ S višim tlakovima smanjuje se i razlika u gustoći vode i pare.

se procijeniti i prema cirkulacijskom broju. Cirkulacijski broj je omjer ukupne količine vode koja se nalazi u generatoru pare i kapaciteta generatora pare⁷⁷ i dat je izrazom

$$C_c = \frac{D_c}{D}.$$

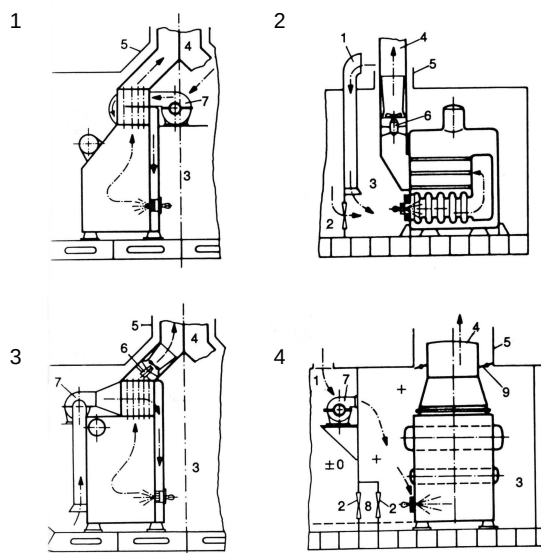
Generatori pare niskog tlaka imaju cirkulacijski broj od 15 do 25, srednjetačni od 6 do 10, s prisilnom optočnom cirkulacijom od 4 do 10, a za generatore pare s prisilnom protočnom cirkulacijom vrijedi da je $C_c=1$.

2.2.5.2. Cirkulacija zraka i dimnih plinova

Pri radu generatora pare u ložište mora kontinuirano dolaziti odgovarajuća količina svježeg zraka, kako je prije već objašnjeno za proces izgaranja u cilindrima motora. Nadolazeći zrak potiskuje dimne plinove u dimni kanal te kroz dimnjak u atmosferu. Brzina strujanja je bitna jer utječe na konvektivni koeficijent izmjene topline, ali ne smije biti prevelika jer gorivo ne bi stiglo potpuno izgoriti u ložištu.

Cirkulacija zraka i dimnih plinova može biti prirodna ili prisilna. Prirodna se postiže razlikom u gustoći relativno hladnog svježeg zraka na ulazu u ložište (generator je smješten u strojarnici) i gustoće vrućih dimnih plinova na izlazu iz dimnjaka. Brodovi s takvom izvedbom mogu se prepoznati po visokim dimnjacima.

Prisilna se postiže ventilatorima i može biti: (1) tlačna, (2) isisna, (3) kombinirana (tlačni i isisni ventilator) te (4) inducirana (cijeli prostor generatora pare – kotlovnica – je pod povišenim tlakom, a ulaz čovjeka ostvaren je kroz predprostor. To prikazuje slika 36.



Slika 36. Cirkulacija zraka i dimnih plinova: (1) tlačna, (2) isisna, (3) kombinirana, (4) inducirana

⁷⁷ Količine pare koju proizvodi.

2.2.6. Opasnosti i postupci u nuždi

Eksplodije generatora pare povezane su najčešće s velikim materijalnim štetama i ljudskim žrtvama. O kakvim se eksplozijama radi. Eksplozija jest nekontrolirano brzo izgaranje gorive smjese. Iz prethodnih je objašnjenja jasno da u ložištu generatora pare može doći do eksplozije.

Oko gorača te na cijevima u ložištu talože se neizgorene komponente goriva. Osim toga, zbog vremenskog odziva elemenata sustava goriva ili greške u sustavu upravljanja goračima može neka količina goriva iscuriti u ložište. Dok generator pare nije u pogonu dolazi do hlapljenja te u ložištu nastaje veća količina para goriva, tj. gorive smjese. Kada bi se u takvom ložištu pojavio izvor topline (baklja za paljenje, električna iskra kod modernih rješenja) došlo bi do eksplozije. Zato se ložište uvijek prije potpaljivanja **provjetrava**⁷⁸. Ako ipak dođe do eksplozije, na ložištu postoje eksplozijski otvori, izvedeni kao i na kućištu velikih dizelskih motora.

Osim eksplozije u ložištu, može doći i do eksplozije parnog bubnja. Kada bi se generatoru pare nekontrolirano dovodila toplina, porastao bi tlak pare, a ujedno bi zbog porasta temperature oslabila mehanička svojstva čeličnih dijelova. Pri takvoj eksploziji u strojarnici se pojavljuju velike količine pare⁷⁹ te je u opasnosti kompletna posada stroja.

Kao mjera predostrožnosti na parne se bubnjeve uvijek ugrađuju dva sigurnosna ventila. Ako jedan zakaže (ostane blokiran), trebao bi se otvoriti drugi. Prije otvaranja sigurnosnih ventila trebao bi djelovati sustav upozoravanja (alarm visokog tlaka), koji bi dežurnog časnika upozorio na grešku, a također i sustav zaštite, koji bi trebao pogasiti plamen.

Manje opasne, ali vrlo česte su greške pucanja ili pregaranja cijevi isparivača. Budući da se spojevi cijevi na modernim generatorima pare izvode zavarivanjem, zamjenu cijevi najčešće mora izvršiti odgovarajući servis. Ako je riječ o manjem propuštanju može se nastaviti s radom i plovidbom, no kod većeg oštećenja, generator pare se gasi, ispušta se voda, a oba spoja oštećene cijevi se začepi (blindiraju). Generator pare se tada ponovo puni vodom, zagrijava i dovodi pod radni tlak.

2.2.7. Automatski sustav loženja

Na slici 37 prikazan je sustav loženja jednog pomoćnog generatora pare. Naime, ako je generator pare manje snage i cijene, ne isplati se na njega ugrađivati neke složene sustave upravljanja. Na generatore pare tankera za prijevoz sirove nafte, gdje se para koristi za grijanje tereta i pogon pumpi tereta to se sigurno ne odnosi.

Prikazani sustav odgovara manjem generatoru pare jer se smanjuje ukupna cijena, a istovremeno se zbog nekih sustavnih manjkavosti neće javljati veliki eksploatacijski troškovi.

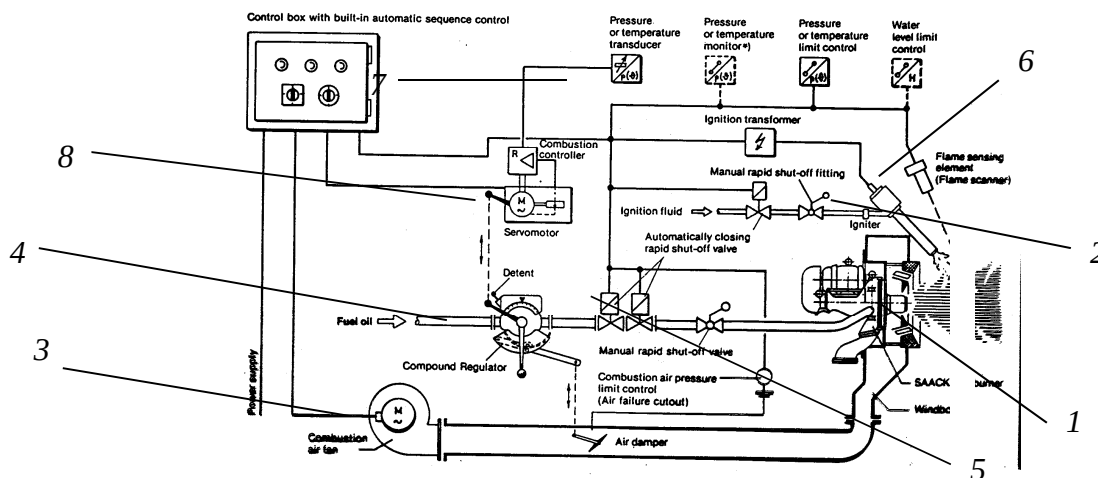
Generator treba teoretski, proizvoditi onoliko pare, koliko se u nekom trenutku 'troši'. To je teško idealno izjednačiti pa se najčešće primjenjuje dvopoziciona regulacija tlaka pare na izlazu iz parnog bubnja ili u parnom bubnju⁸⁰. Osjetnik (davač) tlaka (7) daje signal servomotoru (8) koji djeluje na regulacijski ventil (4), a preko čvrste polužne veze i na

⁷⁸ Maksimalne količine zraka u trajanju koje propisuje klasifikacijsko društvo (prema HRB 15 s).

⁷⁹ Praktički sva voda iz generatora pare ispari. Naime, i ona koja je bila u tekućem stanju, bila je to zbog povišenog tlaka u generatoru pare. Kod eksplozije je izložena daleko manjem, gotovo atmosferskom tlaku zraka u strojarnici pa naglo isparava. Vatrocijevni su kotlovi opasniji po osoblje stroja jer sadrže daleko veće količine vode.

⁸⁰ Može se regulirati i temperatura jer su tlak i temperatura zasićenja jednoznačno određeni (slika 30.).

regulacijsku klapnu zraka. To nije najbolje rješenje jer bi se goriva smjesa trebala mijenjati u ovisnosti o režimu rada, dok je ovdje uvijek ista.



Slika 37. 'Saacke-ov' sustav loženja: (1) rotacijski gorač i glavni plamen, (2) inicijalni upaljač, (3) ventilator, (4) regulacijski ventil goriva polugom vezan s klapnom zraka, (5) elektromagnetski ventili goriva, (6) foto-čelija, (7) davač tlaka ili temperature, (8) servomotor regulacijskog ventila goriva

Kada je potrebno pogasiti plamen zatvaraju se elektromagnetski ventili (5)⁸¹. Do prekida strujnog kruga spomenutih ventila i njihovog zatvaranja, doći će u slučaju previsokog ili preniskog tlaka pare, visoke ili niske razine vode u parnom bubnju⁸² ili nestanka plamena u ložištu, što detektira foto-čelija (6).

U normalnom pogonu, a polazeći od činjenice da je riječ o slabo toplinski opterećenom generatoru pare, tlak pare će doći do neke gornje dopuštene vrijednosti (npr. 0,8 MPa) i plamen će se pogasiti. Uslijed potrošnje tlak će pare u bubnju padati te će kod neke donje granice (npr. 0,6 MPa) doći do ponovnog paljenja. Paljenje se uvijek izvodi s minimalnim količinama goriva i zraka⁸³. Promatrač sa strane mogao bi međutim uočiti da se ručica regulacijskog ventila goriva pomiče prema maksimalno otvorenom položaju. Naravno, nije riječ o grešci. Time se otvara klapna zraka jer su fiksno vezani. Ložište se provjetrava, a zatim u nekom kraćem vremenskom periodu, foto-čelija mora detektirati pojavu plamena. Ukoliko to nije slučaj, ložište se mora ponovo provjetriti i sustav javlja grešku.

Na slici je vidljivo da osim glavnog sustava goriva postoji i inicijalni upaljač (2). U glavnom se sustavu koristi teška nafta (laka samo u nuždi), a za inicijalni plamen isključivo laka nafta. Po završetku provjetravanja ložišta, ručica regulacijskog ventila vraća se u položaj za minimalnu količinu, otvara se elektromagnetski ventil lakog goriva prema inicijalnom upaljaču, sustav upravljanja 'baca' iskru⁸⁴ te kad foto-čelija detektira nastanak inicijalnog plamena sustav otvara elektromagnetske ventile na glavnom cjevovodu goriva. Ako foto-čelija detektira stalan plamen rad se nastavlja, a u suprotnom javlja grešku.

Neke od tipičnih grešaka u radu sustava loženja su posljedice loše podešenosti gorive smjese. I prebogata smjesa (previše goriva) i presiromašna smjesa mogu rezultirati nestankom plamena.

⁸¹ Zbog sigurnosti su dva u seriji, a ako niti jedan ne zatvori, časnik stroja treba zatvoriti ručni brzozatvarajući ventil na istom cjevovodu.

⁸² Prema HRB i u slučaju niskog tlaka goriva i zraka, niskog ili visokog viskoziteta goriva i dr.

⁸³ Neovisno o izvedbi, tj. ručnom ili automatskom upravljanju.

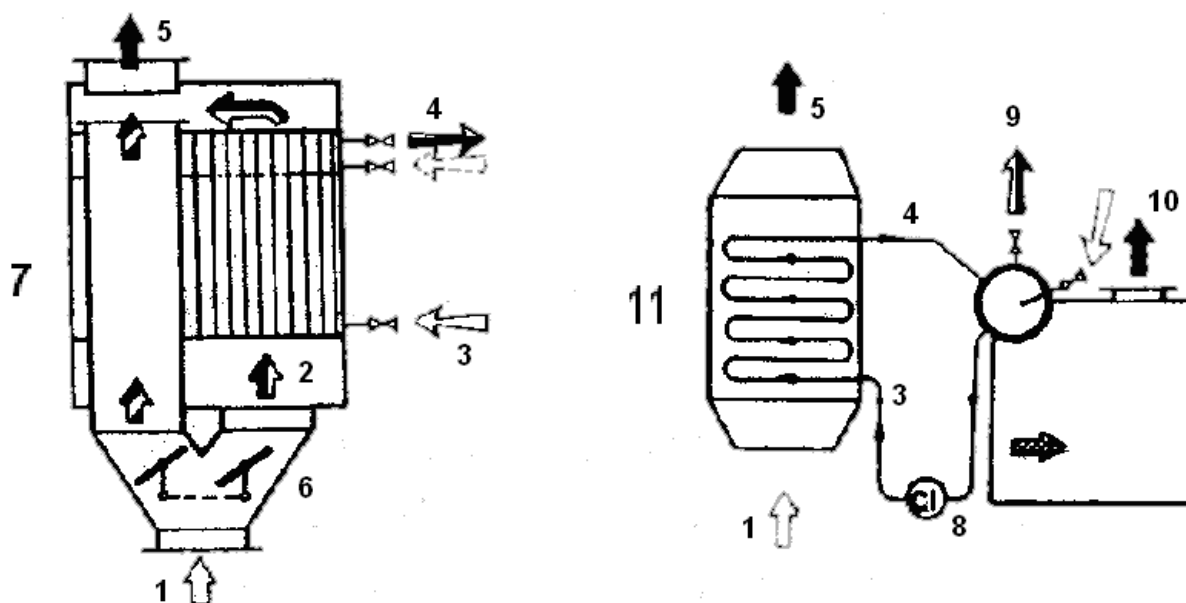
⁸⁴ Prekovisokonaponskog transformatora (10 – 15 kV).

Nakon potpaljivanja, količina gorive smjese podešava se prema opterećenju generatora pare. Kod složenijih (i skupljih) sustava upravljanja može se regulirati i omjer goriva i zraka, odnosno postoje zasebni regulatori količine goriva i zraka. Također, veći generatori pare imaju u ložištu i po nekoliko gorača koji se po potrebi pale i gase.

2.2.8. Generatori pare na ispušne plinove

Poznavajući količine i temperature ispušnih plinova dizelskih motora ili plinskih turbina može se ustvrditi kako bi se njihovim ispuštanjem u atmosferu izgubila znatna energija. Gotovo da svaki veći moderni brod na dizelmotorni pogon ima ugrađen generator pare na ispušne plinove (utilizator), koji proizvodi količine pare u potpunosti dovoljne za potrebe broda tijekom plovidbe⁸⁵. Ako veličina i cijena broda ne opravdavaju ugradnju zasebnog generatora pare, ugrađuje se kombinirani generator pare.

Mada postoje različite konstrukcije, zbog obima materijala, ovdje će se navesti samo ona najčešća, vodocijevna izvedba. Nema velikih vodenih ili parni prostora (posuda, komora) što znači da se spreže na parni bubanj loženog generatora pare. Cirkulacija vode i pare u cijevima je prisilna pa tijekom rada jedna od dvije cirkulacijske pumpe siše vodu iz parnog bubnja loženog generatora pare. Regulacija toplinskog opterećenja generatora izvodi se regulacijom tlaka pare tako da jedna ili više klapni usmjerava dimne plinove motora u kanal s izmjenjivačkim cijevima generatora ili u mimovodni kanal (engl. by-pass), kao na slici 38 lijevo.



Slika 38. Regulacija opterećenja upravljanjem klapnama i način sprezanja loženog i generatora na ispušne plinove: (1) ulaz dimnih plinova, (2) ulaz dimnih plinova u generator pare, (3) ulaz vode, (4) izlaz pare, (5) izlaz dimnih plinova, (6) položaj klapni određuje količinu dimnih plinova koja ide u generator pare i mimovodni kanal, (7) vodocijevni generator pare na ispušne plinove s prirodnom cirkulacijom, (8) cirkulacijska pumpa, (9) izlaz pare iz bubnja, (10) izlaz dimnih plinova iz loženog generatora pare, (11) sprezanje loženog generatora i utilizatora [7]

Kada se radi o izvedbi kao na slici 38 desno zbog propisa klasifikacijskih društava moraju postojati dvije cirkulacijske pumpe, od kojih u pogonu jedna radi, a druga je rezervna. U većini izvedbi potrebno je prije upućivanja glavnog motora startati cirkulacijsku pumpu jer bi u

⁸⁵ Ovdje se naravno ne mogu ubrojiti količine pare potrebne za zagrijavanje tereta (npr. sirove nafte) tijekom plovidbe, već samo potrebe pogona i posade.

protivnom mogle pregorjeti cijevi generatora pare. Ima i pogona kod kojih to nije potrebno učiniti.

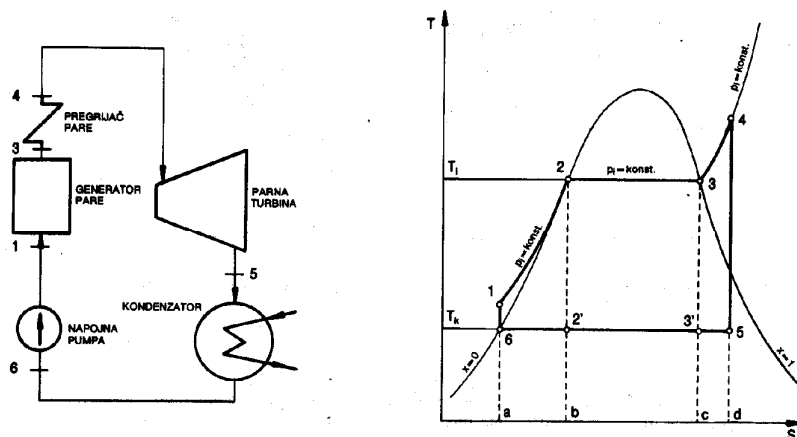
2.2.9. Parne turbine

Turbine su rotacijski strojevi koji energiju fluida pretvaraju u mehanički rad. Toplinske turbine, parne ili plinske, koriste energiju pare, odnosno vrućih plinova,.

Prema načinu pretvorbe toplinske energije u mehanički rad razlikuju se akcijske i reakcijske turbine. Prvu akcijsku patentirao je 1883. Gustav Patrick de Laval pa se po njemu i naziva. Reakcijsku je patentirao Parsons samo jednu godinu poslije. Akcijske turbine koriste se za manje snage, a to su na brodu pomoćni uređaji (pumpe, generatori električne struje) ili tek kao nekoliko prvih stupnjeva velike višestepene turbine.

Parsonsove, reakcijske turbine koriste se za poriv broda. Višestepene su i smještene u više kućišta. Osim ovih dvaju tipova, postoji još i akcijska turbina sa stupnjevanjem brzine ili prema pronalazaču Curtis kolo. Na brodu se koristi za poriv broda unazad ili za pogon pomoćnih uređaja.

Ako se dijagram sa slike 32 nadopuni promjenom stanja u turbini, kondenzatoru i napojnoj pumpi dobije se teoretski toplinski ciklus s parom kao radnom tvari. Na slici 39 prikazan je kružni proces s parom kao radnom tvari i radni ciklus u T-s dijagramu.



Slika 39. Shematski prikaz kružnog procesa i radni ciklus u T-s dijagramu [7]

Voda stanja 1 ulazi u zagrijač vode generatora. U njemu se teoretski postiže temperatura zasićenja (2), a u praksi temperatura nešto niža od temperature zasićenja. Isparivanje (od 2 do 3) dešava se u isparivaču (u stvarnosti i zagrijavanje do točke 2). Kada se para koristi za poriv turbine velike snage pregrijava se u pregrijaču do stanja 4 ($T_{pp} \leq 550^\circ\text{C}$). Sve promjene stanja (od 1 do 4) teoretski se odvijaju pri konstantnom tlaku.

Pregrijana para stanja 4 ulazi u turbinu gdje ekspandira do tlaka kondenzacije⁸⁶ i stanja 5. Vidljivo je da je para stanja 5 malo mokra. Takvo je stanje prihvatljivo, no para ipak ne smije biti previše vlažna. Takva para kondenzira se do stanja 6 – vrele vode (za tlak kondenzacije). Vodu stanja 6 siše napojna pumpa i tlači u generator pare.

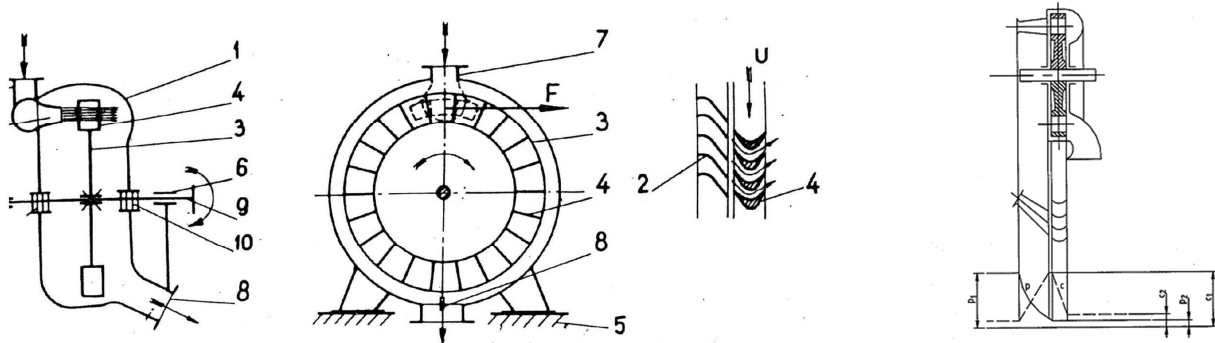
Toplinski stupanj iskoristivosti takvog procesa definiran je izrazom

⁸⁶ Tlak kondenzacije može biti atmosferski (male snage) ili niži od atmosferskog (potlak, vakuum). Što veći potlak to se više energije pare može iskoristiti u turbini, no to ovisi o vanjskim uvjetima (temperaturi morske vode).

$$\eta_t = \frac{D(h_4 - h_5)}{D(h_4 - h_1)},$$

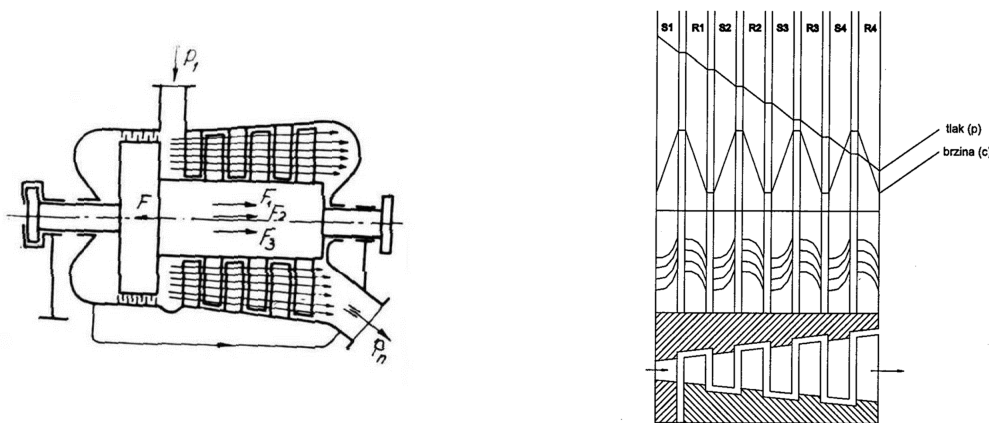
gdje je D [kg/s] količina pare, a h [kJ/kg] sadržaj topline ili entalpija. Rad napojne pumpe zanemariv je u usporedbi s količinama energije koje se u proces dovedu ili iz njega odvedu u drugim elementima procesa.

Jednostupanjska akcijska turbina⁸⁷ prikazana je na slici 40. Para (može biti suhozasićena ili pregrijana) kroz privodni kanal (1) dolazi na statorske sapnice (2), gdje u potpunosti ekspandira. Na dijelu slike dolje desno vidljivo je da se tlak mijenja samo u statorskim sapnicama. To je čista akcijska turbina⁸⁸.



Slika 40. Akcijska turbina: (1) kućište, (2) statorske lopatice ili sapnice, (3) rotorsko kolo, (4) rotorske lopatice, (5) temelj, (6) radijalni ležaj, (7) ulaz pare, (8) izlaz pare, (9) vratilo, (10) labirintna brtva [7]

Zbog povećanja volumena u sapnicama pari raste brzina (promjena potencijalne energije pare u kinetičku – energiju brzine), što je također prikazano na slici dolje desno. Para udara u lopatice rotora (4) stvarajući obodnu silu F te dolazi do okretanja rotora obodnom brzinom u . Udaranjem pare u lopatice rotora kinetička energija pretvara se u mehanički rad.



Slika 41. Višestepena turbina tipa Parsons s dijagramom pretvorbe energije [7]

Turbine velikih snaga su višestepene, kao na slici 41. Na dijelu slike lijevo, prikazana je trostupanjska turbina. Oblik vratila izveden je kako bi se proizvela sila F , kojom se kompenziraju aksijalne sile nastale strujanjem pare kroz tri stupnja turbine (F_1 , F_2 , F_3). Takve,

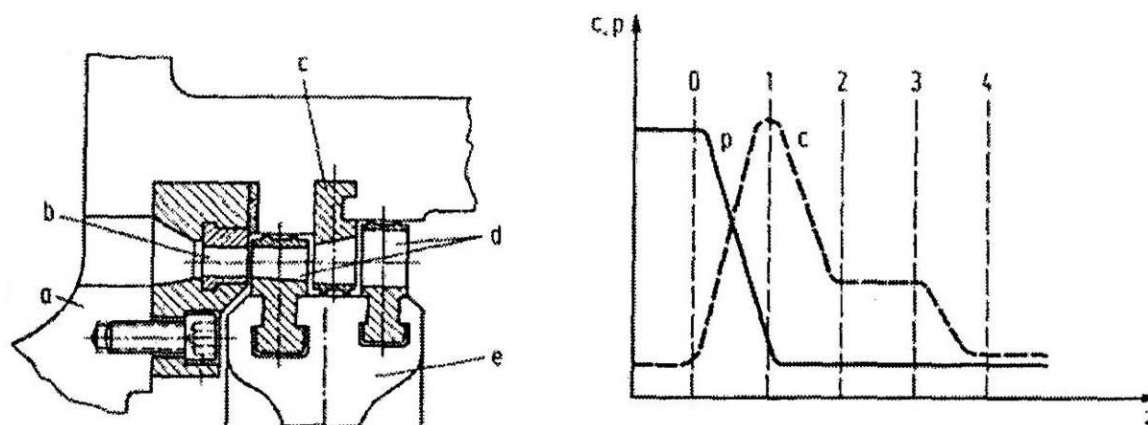
⁸⁷ Jedan stupanj turbine sastoji se od jednog reda statorskih sapnica i jednog kola rotorskih lopatica.

⁸⁸ Danas sve turbine imaju jedan mali stupanj reaktivnosti.

višestupanjske turbine redovito su reakcijske (Parsons), a dijagram promjene tlaka i brzine strujanja pare (pretvorbe potencijalne u kinetičku energiju) prikazan je na slici desno. Za razliku od akcijske turbine kod reakcijske para podjednako ekspandira u sapnicama statora i lopaticama rotora⁸⁹.

U jednom stupnju akcijske turbine može se ostvariti veći toplinski pad (obraditi veća količina energije), no u reakcijskom stupnju. Zbog toga turbine za poriv broda (velika snaga, dugačak rotor, dugačka strojarnica, manje prostora za teret) često imaju nekoliko prvih stupnjeva akcijskog tipa, a ostali su reakcijski.

Naveden je još jedan tip – Curtis kolo. Takva se turbina koristi za vožnju brodom unazad, a pretvorba energije ostvaruje se kao na slici 42.



Slika 42. Izvedba Curtisove turbine i dijagram promjene tlaka i brzine strujanja kroz jedno kolo: (a) kućište, (b) sapnice, (c) skretne lopatice, (d) rotorske lopatice, (e) rotor; 0-1 sapnice, 1-2 prvi red rotora, 2-3 skretne lopatice, 3-4 drugi red rotora [7]

Curtis je između dva reda rotorskih lopatica smjestio jedan red skretnih lopatica. Prema pretvorbi tlaka p i brzine c vidljivo je da se radi o akcijskoj turbini jer se ista ostvaruje u sapnicama statora. Kinetička energija se u mehanički rad pretvara u rotoru, najprije u prvom redu rotorskih lopatica, a zatim u drugom. U skretnim lopaticama nema nikakvih promjena. One služe samo usmjeravanju pare na drugi red rotorskih lopatica. Na ovaj je način Curtis smanjio obodnu brzinu i povećao unutarnju iskoristivost rotorskog kola.

Obično se smješta u zajedničko kućište s glavnom turbinom, a kada je potrebno zavoziti krmom, para se zapornim ventilima pušta na Curtis kolo za vožnju unazad⁹⁰.

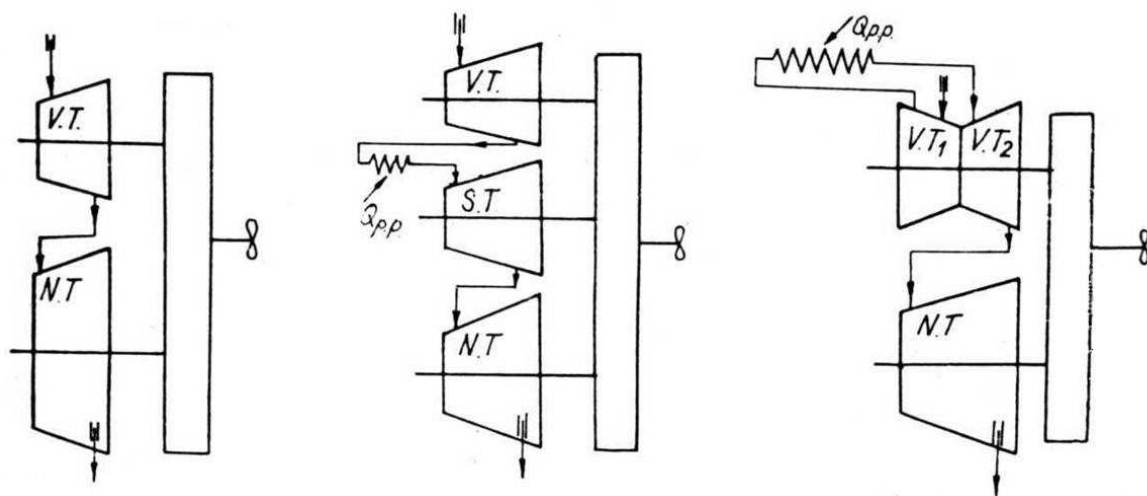
Turbine za poriv broda redovito su izvedene u više kućišta: visokotlačno, srednjetačno (ili dva srednje tlačna) te jedno ili više niskotlačnih kućišta⁹¹. Neke jednostavnije izvedbe prikazane su na slici 43. U sva tri slučaja preko reduktora se ostvaruje poriv samo jednog brodskog vijka. Čemu onda služi ovakva izvedba? Duljina turbine (rotora) bi u suprotnom bio ozbiljan konstrukcijski problem. Rotor je elastičan pa bi zbog velike duljine dolazilo do progiba i kod vrtnje do vibracija. Morao bi biti krut, tj. velikog promjera i mase. Ovakvim rješenjem dobije se nekoliko kraćih rotora. Nadalje, ovakvim je smještajem skraćena strojarnica pa se dobije veći prostor za teret. Osim toga, na dvije desne slike vidljivo je da se

⁸⁹ Stupanj reaktivnosti iznosi $p=0,5$ (50 %).

⁹⁰ A zatvara se dovod pare za vožnju naprijed.

⁹¹ Upozoravam da se ne smije miješati broj stupnjeva turbine višestepene s brojem kućišta jer je u svakom kućištu višestepena turbina.

para između kućišta dogrijava čime se povećava ukupni toplinski stupanj iskoristivosti procesa⁹².



Slika 43. Tri konfiguracije parnih turbina u više kućišta [7]

2.2.9.1. Utrošak pare, stupanj djelovanja i regulacija snage

Na T-s dijagramu prikazanom na slici 39 razlika sadržaja topline pare u točkama 4 i 5 predstavlja ukupan toplinski pad ili količinu energije prerađenu u turbini. Sastoji se od zbroja toplinskih padova svakog pojedinog stupnja turbine i označava s H [kJ/kg]. Ako je D [kg/s] količina pare koju turbina troši, a η_u unutarnji stupanj iskoristivosti turbine, snaga turbine data je izrazom

$$P = H \cdot D \cdot \eta_u.$$

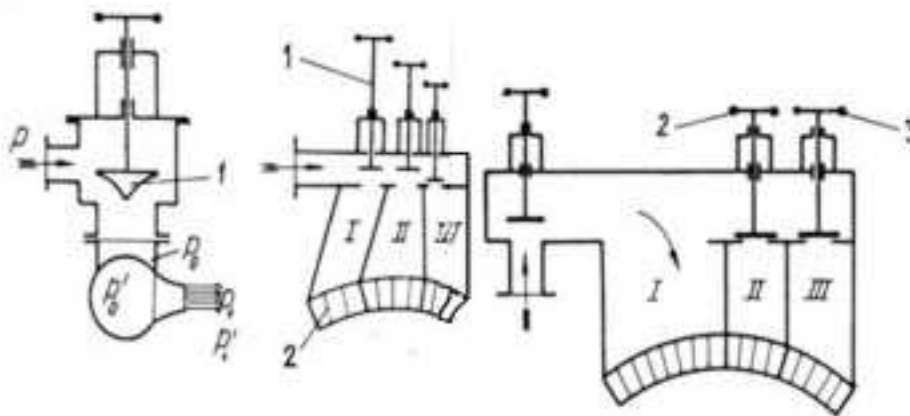
Kako bi se ostvarila potrebna snaga parne turbine, a zbog $\eta_u < 1$, troši se više pare nego je to teoretski potrebno. Pri tome se zbog nekih gubitaka mijenja i stanje pare u turbini (gubici vrtloženja, trenja pare uz stijenke lopatica, ventilacije, gubitaka kroz zazore, izlazne brzine). Mehanički gubici (trenja vratila u ležajevima) te potrošnja pare na labirintnim brtvama ne utječu na stanje pare.

Iz gornje se jednadžbe vidi mogućnost regulacije snage (opterećenja)⁹³. Budući da je η_u određen konstrukcijom turbine, jasno je da se opterećenje može mijenjati promjenom ukupnog toplinskog pada, količine pare koja struji u turbinu ili kombinacijom. Prvi je način toplinski loš, no jednostavan. Koristi se za regulaciju snaga manjih turbina (pogon pumpi tereta) ili za finu regulaciju. Drugi način izvodi se grupiranjem sapnica statora u sekcije za koje postoje zasebni zaporni ventili. Zatvaranjem pojedinog ventila prekida se dotok pare prema npr. 25 % ili 50 % sapnica⁹⁴. Gruba regulacija, ali se ne utječe na kvalitetu pare. Kombinirani način izvodi se zapornim ventilima za nekoliko sekcija sapnica te prigušnim ventilom za jednu sekciju sapnica. Regulacija pomoću tri navedene metode prikazana je na slici 44.

⁹² O nekim mogućnostima povećanja toplinskog stupnja iskoristivosti kasnije.

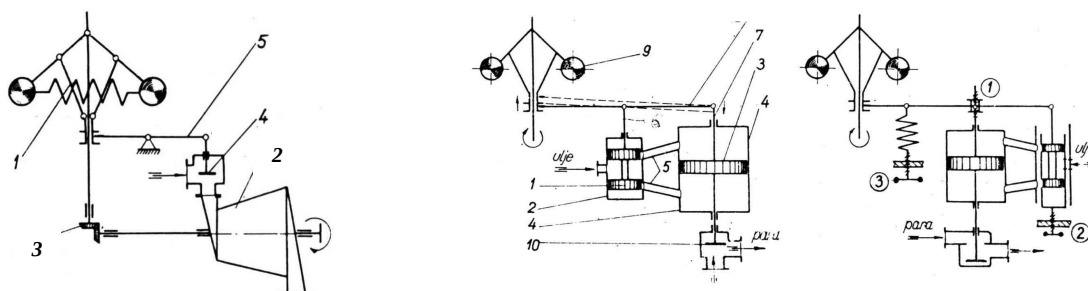
⁹³ Regulacija opterećenja analogna je regulaciji broja okretaja.

⁹⁴ S ovakvim postocima moguće je postići 100 %, 75 %, 50 % i 25 %-tno opterećenje.



Slika 44. Regulacija prigućivanjem (H), količinska (D) te kombinirana [7]

Na prethodnim se slikama radi o ručnoj regulaciji, dok će moderni pogoni imati automatsku regulaciju. Regulator snage (opterećenja, broja okretaja) izvodi se kao kod dizelskih motora (Woodward) samo ne djeluje na polužje visokotlačnih pumpi već na ventil pare. Prikazan je na slici 45 (skroz lijevo je mehanički, a dva desno su hidraulički).



Slika 45. Mehanička i hidraulička regulacija broja okretaja parne turbine [7]

Neka je na lijevoj slici pogonska turbina broda (2) i neka dođe do pada broja okretaja propelera⁹⁵. Preko zupčanog prijenosa (3) prenosi se poremećaj i na osovinu regulatora te zbog smanjene centrifugalne sile opruga (1) privlači utege. Klizač regulatora zakreće polugu (5) obrnuto od kazaljke na satu i time otvara regulacijski (prigušni) ventil pare (4) te povećava broj okretaja. To je najjednostavniji proporcionalni regulator – ima statičku grešku, sporiji odziv i potrebno je dulje vrijeme da se ustali regulirana veličina. Moderni regulatori su PI ili PID tipa⁹⁶. Na srednjoj te krajnjoj desnoj slici prikazane su hidrauličke izvedbe.

2.2.9.2. Priprema parne turbine za pogon

Priprema za pogon neke parne turbine velike snage može trajati i nekoliko sati. Ako se tome pribroji i vrijeme potrebno za podizanje radnog tlaka generatora pare, jasan je nedostatak takve izvedbe. Ipak, s obzirom na konstrukcijska rješenja, vođenje pogona, regulaciju te postupke pripreme to je vrijeme u usporedbi s nekadašnjim pogonima skraćeno. Časnik palube mora biti upoznat s vremenom potrebnim za pripremu, kako bi mogao planirati isplavljenje.

⁹⁵ Na primjer zbog morske struje u koju je brod uplovio.

⁹⁶ Proporcionalno-integracijski ili proporcionalno-integracijsko-derivacijski.

U skraćenom obliku, postupak pripreme mogao bi teći kako slijedi. Starta se pumpa ulja za podmazivanje ležajeva turbine, a ako je potrebno ispušta se voda iz dnevnog tanka ulja. Ulje se može predgrijavati, a ako takve mogućnosti nema, zagrijat će se radom turbine. U tom se slučaju hlađenje ulja ne provodi dok se ne postigne radna temperatura.

Podmazivanje ležajeva turbine može biti tlačno (radom pumpe) ili gravitacijsko. Gravitacijsko je pogodno za porivne turbine u slučaju nužde. Kod grešaka pri radu dolazi do automatskog zatvaranja ventila pare, no nastrujavanje mora na propeler onemogućuje istovremeno trenutno zaustavljanje rotora turbine. Gravitacijski tankovi ulja moraju biti takvog volumena da osiguraju dotok ulja dok broj okretaja ne bude jednak nuli⁹⁷.

Drugo je rješenje pogodnije za brodske turbogeneratore električne energije. Ulje na ležajeve dolazi direktno, iz tlačnog cjevovoda pumpi ulja. Postoje dvije glavne pumpe ulja, od kojih je jedna pogonjena elektromotorom i naziva se pumpa predpodmazivanja (engl. priming pump). Osim u postupku pripreme, ova se pumpa automatski starta kod pada tlaka druge glavne pumpe ulja, koja je privješena turbini⁹⁸. Ova pumpa radi i daje potreban tlak tek kod određenog broja okretaja turbine pa je jasna potreba za pumpom predpodmazivanja.

Osim ovih dvaju pumpi može postojati i treća, pumpa u nuždi. Pogonjena je elektromotorom, manje je snage i kapaciteta i koristit će se samo kada se iz nekog razloga ne mogu koristiti niti jedna od dvije glavne. Struja za pokretanje iste dolazi s razvodne ploče u nuždi tj. proizvodi je generator električne energije u nuždi.

Kada se govori o pripremi parne turbine, pretpostavlja se postojanje odgovarajućeg tlaka pare u glavnom generatoru pare. Treba, međutim, postići potreban tlak u kondenzatoru pare. Prema shemi na slici 37 para iz turbine ide u kondenzator. Kod manjih snaga može se raditi o atmosferskom, no za veće je vakuumski (niskotlačni) kondenzator. Potrebno je startati pumpe rashladne vode (obično morske jer je niže temperature), pumpe kondenzata (koje vraćaju isti u tank napojne vode generatora pare) i vakuum pumpe⁹⁹. Prije ikakvog pokretanja rotora turbine potrebno je postići potrebni vakuum (potlak), a to ne bi bilo moguće bez dovoda pare na labirintne brtve. Kroz njih bi se u tom slučaju usisavao zrak.

U kućištu turbine i dovodnom cjevovodu pare, tijekom perioda van pogona, sakupio se kondenzat te se na najnižim točkama ugrađuju ispusni ('drenažni') ventili kroz koje ga se ispusti prije dovoda pare na turbinu i povremeno tijekom postupka pripreme. Taj bi kondenzat pri udaru u rotor turbine mogao dovesti do hidrauličkog udara tj. do vibracija, aksijalnog pomaka rotora i loma lopatica.

Kada se postigne potrebni potlak u kondenzatoru otvara se ventil pare. Kod manjih turbina treba pustiti toliko pare da se rotor počne okretati s nekim minimalnim brojem okretaja, kako bi se jednoliko zagrijao. Kod većih se turbina (veće mase rotora) rotor okreće elektromotorom za polagano pokretanje¹⁰⁰. Kada se rotor ne bi okretao para bi, zbog činjenice da ulazne sapnice nisu izvedene po cijelom obodu, jače zagrijavala samo jedan bio rotor. Te bi se lopatice produljile, došlo bi do pomaka centra mase van središta i kod pokretanja do vibracija.

Pri takvom radu, s malim brojem okretaja, slušaju se zvukovi (struganja) i detektiraju vibracije. Okretaji su premali da bi moglo doći do neke teže havarije. Nakon toga se podiže

⁹⁷ U ovom slučaju startanje pumpi ulja podrazumijeva startanje napojnih pumpi, koje sišu ulje iz slivnog i tlače ga u gravitacijski tank.

⁹⁸ Preko zupčanog, lančanog ili remenskog prijenosa pogoni je sama turbina.

⁹⁹ Pojam vakuum pumpe po nekim je autorima terminološka greška jer se pojam pumpa koristi za tekućine. Ovdje se koristi jer se naprosto ustalio u praksi.

¹⁰⁰ Analogno uređaju za polagano pokretanje glavnog dizelskog motora.

broj okretaja te se postupak ponavlja¹⁰¹, a nakon toga ventili pare se otvaraju do kraja. Radom turbine dalje upravlja regulator, djelovanjem na regulacijski ventil pare.

2.2.9.3. Zaštita parne turbine

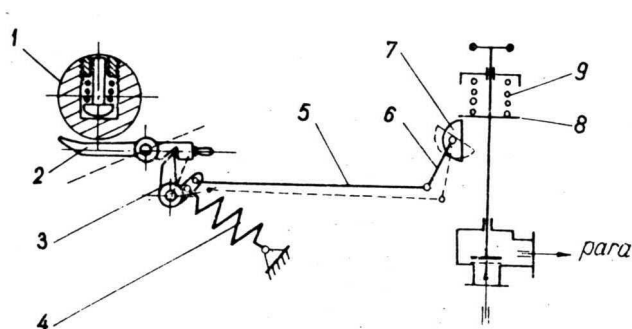
U slučaju grešaka na sustavima potrebnim za pravilan rad turbine, dolazi automatski do prekida dovoda pare na turbinu¹⁰². U skladu s postupkom pripreme, to su svakako greške u sustavu ulja za podmazivanje ili točnije nedopušteni pad tlaka ulja.

Kada je tlak pare u generatoru prevelik ili premali ili je javljena greška generatora pare (automatski se gasi plamen), automatski se zatvara i ventil pare na turbinu. Preveliki tlak pare mogao bi dovesti do prevelikog broja okretaja, no kako obično postoji zaštita od prekoračenja broja okretaja (engl. overspeed) ovo je dupliranje zaštite. Ugrađuje se jer bi mogao dovesti do loma lopatica turbine¹⁰³. Prenizak tlak pare znači da se na krajnjim stupnjevima turbine pojavljuje zasićenija para. Kapljice, zbog svoje veće mase u odnosu na molekule vode, udaraju sa suprotne strane u lopatice rotora, troše ih i skraćuju radni vijek.

Turbina se zaustavlja i kod prevelikog tlaka (nedovoljnog potlaka) u kondenzatoru, u slučaju prevelikih vibracija rotora ili aksijalnog (uzdužnog) pomaka istog. Aksijalni pomak rotora znači istrošenje aksijalnog ležaja pa se u stvarnosti mjeri istrošenje.

Zbog velikog radnog broja okretaja (nekoliko tisuća) važna je i zaštita od prekoračenja brzine. Uređaj koji prekida dovod pare u turbinu u spomenutom slučaju naziva se centrifugalni izvrstioc i prikazan je na slici 46.

Osovina (1) okreće se u skladu s okretanjem rotora turbine. U jednom je njenom dijelu smješten klip, potisnut djelovanjem opruge. Kada stvarni broj okretaja premaši 110 % nominalnog, centrifugalna sila savlada silu opruge te klip biva izbačen. Okretanjem će doći u položaj djelovanja na sigurnosnu polugu (2), koja oslobađa element (3) te opruga (4) pomiče polužje (5, 6) i segment (7). Time je oslobođen klip (8) te opruga (9) zatvara sigurnosni ventil pare.



Slika 46. Centrifugalni izvrstioc [7]

¹⁰¹ Samo u jednom području broj okretaja se treba povišiti naglo, kako ne bi došlo do rezonancije.

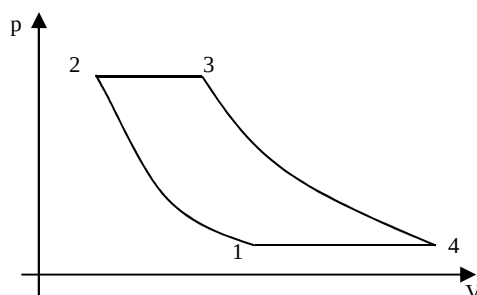
¹⁰² Kako se ne bi stekao pogrešan dojam, zatvara se ventil pare za nuždu (engl. emergency shut down valve), a ne dovodni (zaporni) ventil ili regulacijski ventil.

¹⁰³ Viši tlakovi znače i više temperature pa se lopatice šire, stružu po kućištu i u krajnjem slučaju lome se, a također zbog povišene temperature slabe mehanička svojstva materijala lopatica.

2.3. Plinske turbine (primjena i konstrukcijske karakteristike)

Osim kod sporookretnih dizelskih motora, kojima je poriv brodova glavna primjena, gotovo svi drugi strojevi i uređaji, razvijaju se za neke druge svrhe. To je slučaj i s plinskim turbinama, koje se razvijaju za avionsku industriju. Jedina bitna karakteristika brodskih plinskih turbina jest primjenjivost nekih lošijih, jeftinijih goriva¹⁰⁴.

Zbog razloga koji su prije navedeni, način rada i izvedbe bit će objašnjeni najkraće moguće. Teoretski p-V dijagram procesa u plinskoj turbini prikazan je na slici 47. Od točke 1 do 2 dešava se kompresija, od 2 do 3 izgaranje goriva u komori, od 3 do 4 je ekspanzija u turbini te od 4 do 1 ispuh. Površina 1-2-3-4-1 predstavlja koristan rad procesa.

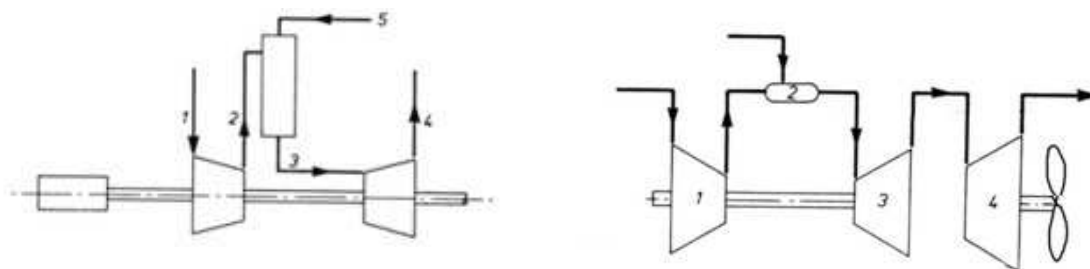


Slika 47. Teoretski p-V dijagram plinske turbine [8]

U skladu s tijekom procesa osnovni dijelovi plinske turbine su kompresor, komora tj. komore izgaranja, turbina i kućište. Turbokompresor izveden s nekoliko stupnjeva (dvadesetak) pogoni sama turbina te je koristan rad procesa razlika rada dobivenog u turbini i rada utrošenog na pogon kompresora (slika 49).

Budući da u početku rotor miruje, kompresor je potrebno zavrtiti drugim pogonskim strojem. Obično je riječ o elektromotornom pogonu. Sprovodnim kanalima kroz kućište, komprimirani zrak se dovodi oko komora izgaranja. Djelomično zrak ide na plamenik, kako bi osigurao gorenje (primarni zrak), a djelomično se kroz provrte po obodu uvodi u komoru kako bi osigurao potpuno izgaranje (slika 50).

Izgarni plinovi struje na lopatice turbine, koja može biti izvedena s jednim ili dva vratila. Brodske su najčešće izvedene s dva pa prvi, visokotlačni stupanj, pokreće kompresor, a drugi, niskotlačni daje koristan rad (poriv broda ili generatora električne struje). Izvedbe s jednim i dva vratila prikazane su na slici 48.



Slika 48. Otvoreni ciklus – jedno vratilo (1 – usis zraka, 2 – izlaz komprimiranog zraka prema komori izgaranja, 3 – dovod plinova u plinsku turbinu, 4 – izlaz plinova, 5 – dovod goriva) te otvoreni ciklus – dva vratila (1 – kompresor, 2 – komora izgaranja, 3 – visokotlačna turbina, 4 – niskotlačna turbina) [7]

¹⁰⁴ U usporedbi s gorivima za avionske turbine, ne u usporedbi s teškom naftom za dizelske motore.

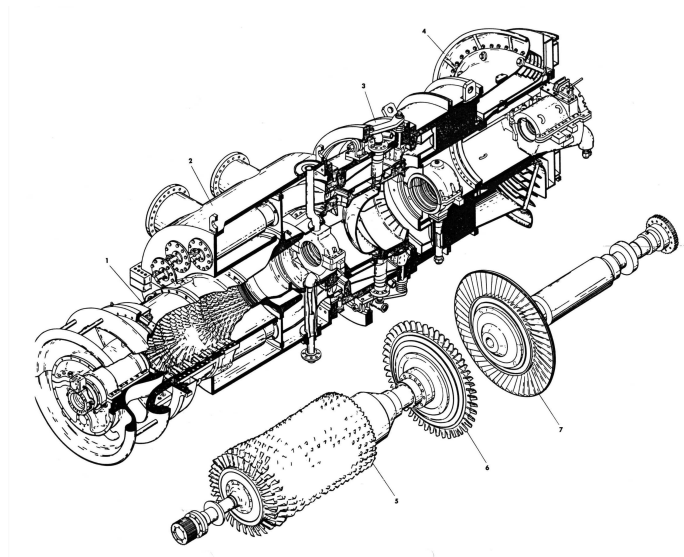
Postoje izvedbe sa zatvorenim ciklusom¹⁰⁵, no na brodu se ne koriste. U odnosu na ove jednostavne izvedbe moguća su toplinska poboljšanja primjenom predgrijača zraka (toplim ispušnim plinovima), dvostepenom kompresijom s međuhlađenjem i dr. Zbog obima materije čitatelj se upućuje na drugu stručnu literaturu.

Lopaticice se hlade zrakom (slika 51) koji se dovodi kroz unutrašnjost, ali najveći je tehnološki problem ipak njihova toplinska opterećenost. One se izgrađuju od visokolegiranih čelika, a najopterećeniji dijelovi štite se lijepljenjem pločica od materijala otpornih na visoke temperature (stelit).

Primjena plinskih turbina na brodovima je rijetka. Koristi se kod nekih manjih ratnih jedinica te kod kombiniranih sustava s elektromotornim porivom. Turbopuhalo dizelskog motora je u izvjesnom smislu plinska turbina. Nema zasebne komore izgaranja, no pokreću je ispušni plinovi motora.

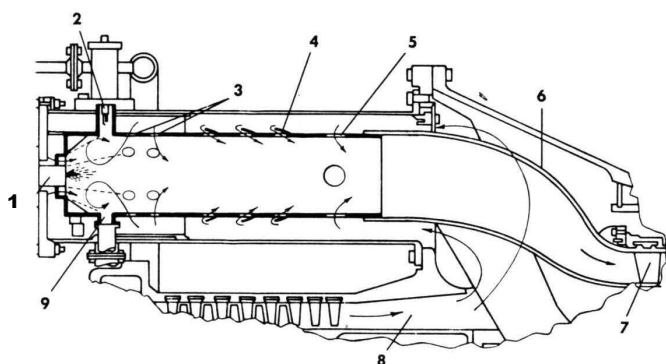
2.3.1. Regulacija snage plinske turbine

Regulacija snage plinske turbine (broja okretaja), u najkraćim se crtama, ostvaruje regulacijom količine goriva i zraka. Problem visokih temperatura plinova i osjetljivosti lopatica turbine rješava se višekomponentnim regulatorom. Prvi upravlja radom turbine tijekom procesa upućivanja do postizanja normalnih radnih temperatura, drugi regulira količinu gorive smjese pri nominalnom opterećenju, a treći (sigurnosni) se uključuje u slučaju preopterećenja i mogućeg pregrijavanja turbine.

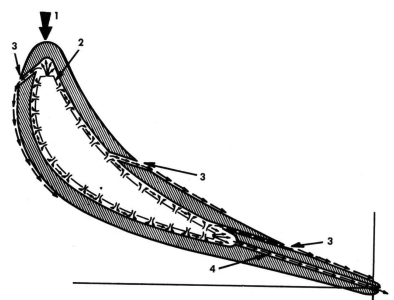


Slika 49. Plinska turbina: (1) dio kućišta sa statorskim lopaticama kompresora, (2) prostor za smještaj komora izgaranja, (3) dio kućišta plinske turbine, (4) ispušni kanal, (5) rotor kompresora s 20-tak stupnjeva, (6) visokotlačni stupanj turbine, (6) niskotlačni stupanj turbine [7]

¹⁰⁵ Zrak ili neki drugi (npr. plemeniti) plin se nakon komprimiranja grije, vodi u turbinu gdje ekspandira, hladi pa opet komprimira.



Slika 50. Komora izgaranja: (1) dovod goriva, (2) svjećica za paljenje gorive smjese, (3) dovod primarnog zraka, (4) dovod sekundarnog zraka, (5) zrak za hlađenje dimnih plinova, (6) odvodni kanal plinova, (7) statorsche lopatice plinske turbine, (8) dovod zraka iz kompresora, (9) prostor izgaranja [7]



Slika 51. Presjek lopatice hlađene zrakom: (1) točka nastrujavanja, (2) lamele za konvekcijsko hlađenje iznutra, (3) provrti za filmsko hlađenje, (4) otvor za izlaz ostatka zraka [7]

2.3.2. Zaštita plinske turbine

Prema pravilima HRB-a plinska se turbina zaustavlja (prekida se dovod goriva) kod sljedećih grešaka u radu:

- prekoračenja broja okretaja (obično 110 % n_{nom});
- visoke temperature plina iza visokotlačne turbine;
- niskog tlaka ulja za podmazivanje ležajeva;
- nestanka plamena;
- vibracija turbine;
- visoke temperature ispušnih plinova.

3. LITERATURA

1. Martinović, D., Martinović, D., *Strojarski priručnik za časnike palube*, Žagar, Rijeka, 2005.
2. Mikuličić, M., *Motori 1*, Školska knjiga, Zagreb, 1976.
3. Tireli E., Martinović, D., *Brodске toplinske turbine*, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2001.
4. Kostelić, A., *Nauka o toplini*, Školska knjiga, Zagreb, 1975.
5. Pečornik, M., *Tehnička mehanika fluida*, Školska knjiga, zagreb, 1985.
6. Prelec, Z., *Brodski generatori pare*, Školska knjiga, zagreb, 1990.
7. Knak, Ch., *Diesel Motor Ships Engines and Machinery*, G-E-C GAD Publishers, Copenhagen, 1979.
8. www.pfri.uniri.hr/~pkralj

Popis slika i tablica

Slike

- Slika 1. Presjek trupa kroz strojarnicu
- Slika 2. Jedna parna i jedna plinska turbina spregnute su preko reduktora za poriv broda
- Slika 3. Parna i plinska turbina na jednom su vratilu i preko reduktora pogone brodski vijak
- Slika 4. Konično ozubljenje, primjena više zupčanika, gdje se u prvom slučaju žuti i plavi zupčanik okreću u istom, a u drugom slučaju u suprotnom smjeru
- Slika 5. Lijevo gore je kuglični aksijalni, a desno gore aksijalni ležaj s kliznim segmentima
- Slika 6. Konus propelernog vratila tj. spoj s glavčinom propelera i oznaka konusa
- Slika 7. Glavčina s krilom broskog vijka u dva pogleda
- Slika 8. Propeler u sapnici: l – duljina sapnice, D_p – vanjski promjer propelera, D_i – najmanji unutarnji promjer sapnice, D_e – upadni promjer [8]
- Slika 9. Glavčina propelera sa zakretnim krilima i mehanizam u unutrašnjosti iste [8]
- Slika 10. Pramčani propeler u tunelu: (1) pogonski elektromotor s vijkom, (2) tunel, (3) nosači ležajeva, (4) cijev za kablove i cijevi, (5) zaštitna rešetka
- Slika 11. Primjeri podtrupnih potisnika
- Slika 12. Aktivno kormilo: (1) glavni brodski vijak, (2) list kormila, (3) strujno kućište kormilarskog propelera, (4) kormilarski propeler u sapnici
- Slika 13. Osnovni tehnički pojmovi porivnog sustava
- Slika 14. Uspon vijka H za jedan okret [8]
- Slika 15. Indikatorski dijagram te pravokutnik jednake površine visine srednjeg indiciranog tlaka
- Slika 16. Otvoreni i zatvoreni indikatorski dijagram [7]
- Slika 17. Češljasti dijagrami pokazuju tlak izgaranja te pri prekinutoj dobavi goriva u cilindar tlak kompresije [7]
- Slika 18. Upravljačka konzola na mostu
- Slika 19. Teoretski indikatorski dijagram Sabathe' procesa
- Slika 20. Poprečni presjek dvaju modernih konstrukcija sporohodnih dizelskih motora i dijelovi stapnog mehanizma
- Slika 21. Dvotaktni klipni motor: (1) klip, (2) ojnica, (3) koljeničasto vratilo
- Slika 22. Visokotlačna pumpa sa zakretnim klipom
- Slika 23. Mehanički regulator broja okretaja motora [8]
- Slika 24. Rasprskач goriva.
- Slika 25. Uputni zrak: (1) cjevovod startnog zraka, (2) uputni ventil, (3) bregasto vratilo s brijegom za otvaranje uputnog ventila, (4) razvodnik ili pilot ventil, (5) glavni startni ventil, (6) ventil za polagano pokretanje
- Slika 26. Uputni ventil u zatvorenom i otvorenom položaju
- Slika 27. Sklop turbopuhala: 1 – ulaz ispušnih plinova, 2 – lopatice turbine, 3 – turbinsko kolo, 4 – izlaz ispušnih plinova, 5 – filter zraka, 6 – puhalo (kompresor), 7 – difuzor (kinetičku energiju zraka pretvara u potencijalnu – tlak, 8 – kanal izlaza zraka te osovina sa zračnom i plinskom stranom
- Slika 28. Sustav preokretanja. Bregasto vratilo može se pomicati aksijalno te na podigače (visokotlačnih pumpi, ispušnih ventila i dr.) djeluju zakrenuti brijegovi
- Slika 29. Požar u motoru može se gasiti parom, slatkom vodom te ugljičnim dioksidom
- Slika 30. Emisija plinova dizelskog procesa [8]
- Slika 31. Promjena stanja vode zbog dovođenja topline: (1) voda je tekućina sobne temperature, (2) i dalje je tekuća faza, ali većeg specifičnog volumena, (3) nastaje prvi mjehurić pare, (4) raste udio plinovite faze, (5) upravo nestaje zadnja kapljica vode, (6) ponaša se poput plina, naglo raste specifični volumen [8]
- Slika 32. Konstrukcija T-s dijagrama i karakteristične točke procesa pretvorbe vode u vodenu paru [8]
- Slika 33. Vatrocijevni generator pare proizvođača 'Howden-Johnson'
- Slika 34. Integral-D tip
- Slika 35. Hidrodinamika prirodne cirkulacije [8]
- Slika 36. Cirkulacija zraka i dimnih plinova: (1) tlačna, (2) isisna, (3) kombinirana, (4) inducirana
- Slika 37. 'Saacke-ov' sustav loženja
- Slika 38. Regulacija opterećenja upravljanjem klapnama i način sprežanja loženog i generatora na ispušne plinove
- Slika 39. Shematski prikaz kružnog procesa i radni ciklus u T-s dijagramu [7]
- Slika 40. Akcijska turbina: (1) kućište, (2) statorske lopatice ili sapnice, (3) rotorsko kolo, (4) rotorske lopatice, (5) temelj, (6) radijalni ležaj, (7) ulaz pare, (8) izlaz pare, (9) vratilo, (10) labirintna brtva [7]
- Slika 41. Višestepena turbina tipa Parsons s dijagramom pretvorbe energije [7]
- Slika 42. Izvedba Curtisove turbine i dijagram promjene tlaka i brzine strujanja kroz jedno kolo
- Slika 43. Tri konfiguracije parnih turbina u više kućišta [7]
- Slika 44. Regulacija prigućivanjem (H), količinska (D) te kombinirana [7]
- Slika 45. Mehanička i hidraulička regulacija broja okretaja parne turbine [7]

Slika 46. Centrifugalni izvrstioc [7]

Slika 47. Teoretski p-V dijagram plinske turbine [8]

Slika 48. Otvoreni ciklus – jedno vratilo (1 – usis zraka, 2 – izlaz komprimiranog zraka prema komori izgaranja, 3 – dovod plinova u plinsku turbinu, 4 – izlaz plinova, 5 – dovod goriva) te otvoreni ciklus – dva vratila (1 – kompresor, 2 – komora izgaranja, 3 – visokotlačna turbina, 4 – niskotlačna turbina) [7]

Slika 49. Plinska turbina

Slika 50. Komora izgaranja

Slika 51. Presjek lopatice hlađene zrakom

Tablice

Tablica 1. Podjela dizelskih motora [8]

Tablica 2. Oznaka položaja ručice i odgovarajući broj okretaja [8]

II POMOĆNI UREĐAJI I SUSTAVI

Za budućeg je časnika palube ovo možda i najznačajnije područje. Mnoge od ovih uređaja svakodnevno koristi pa je nužno poznavanje osnovnih tehnoloških karakteristika i primjena. Radi se o velikom broju različitih strojeva i uređaja, kao što su: pumpe, ventilatori, kormilarski uređaj, rashladni uređaj, spaljivač smeća, sidrena i pritezna vitla, cjevovod balasta, cjevovod ukrcaja i iskrcaja tereta, protupožarni cjevovod. Rad navedenih strojeva, uređaja i cjevovoda nastojat će se prikazati uz najnužnije, ali ipak točne tehnološke osnove.

Time će se ostvariti osnovna svrha, objašnjenje karakteristika i osnova uređaja na način koji će osigurati siguran rad, bez pretjeranih pojednostavljenja koja bi mogla dovesti do pogrešnih shvaćanja i grešaka u korištenju.

U prvih se pet poglavlja objašnjavaju pomoćni uređaji: pumpe, ventilatori, kompresori i drugi. Šesto je poglavlje posvećeno brodskim cjevovodima. Objašnjavaju se neki cjevovodi opće službe te pogonski cjevovodi za slučaj dizel-motorne propulzije, te ukratko cjevovodi specijalne namjene.

Sadržaj dijela II

- 1. Uređaji koji mehanički rad pretvaraju u energiju fluida...80**
 - 1.1. Pumpe...80**
 - 1.1.1. Energija pumpanja...83**
 - 1.1.2. Regulacija dobave centrifugalne pumpe...86**
 - 1.1.3. Rad pumpi u automatiziranim strojarnicama...89**
 - 1.1.4. Mlazne pumpe...90**
 - 1.2. Ventilatori i kompresori...91**
 - 1.2.1. Ventilatori...91**
 - 1.2.2. Ventilacija...91**
 - 1.2.3. Klimatizacija...95**
 - 1.2.4. Kompresori...96**
 - 1.2.5. Primjena kompresora u rashladnim uređajima...98**
- 2. Uređaji za sprečavanje zagađivanja okoliša i uštedu energije...103**
 - 2.1. Obrada fekalnih voda...103**
 - 2.2. Prerada krutog otpada...104**
 - 2.3. Kaljuža...104**
 - 2.4. Proizvodnja slatke vode...105**
- 3. Separatori goriva i ulja...108**
- 4. Posude pod tlakom...109**
 - 4.1. Izmjenjivač topline...109**
 - 4.2. Hidrofor...111**
- 5. Statvena cijev...113**
- 6. Brodski cjevovodi...115**
 - 6.1. Cjevovodi opće službe...115**
 - 6.1.1. Cjevovod kaljuže...115**
 - 6.1.2. Cjevovod balasta...117**
 - 6.1.3. Hidraulika i pneumatika...118**
 - 6.1.4. Kormilarski uređaj...124**
 - 6.1.5. Palubni uređaji...127**
 - 6.1.6. Protupožarni cjevovodi...129**
 - 6.2. Pogonski cjevovodi...135**
 - 6.2.1. Cjevovod goriva...135**
 - 6.2.2. Cjevovod ulja za podmazivanje...138**
 - 6.2.3. Cjevovod rashladne vode...140**
 - 6.2.4. Cjevovod komprimiranog zraka...144**
 - 6.2.5. Cjevovod pare, napojne vode i kondenzata...145**
 - 6.3. Cjevovodi specijalne namjene...147**
- 7. Literatura...148**

1. UREĐAJI KOJI MEHANIČKI RAD PRETVARAJU U ENERGIJU FLUIDA

U ovu se veliku grupu uređaja svrstavaju pumpe, ventilatori, puhala i kompresori jer kada je riječ o fluidu to može biti tekućina, para ili plin. Puhala su već spominjana u prvom dijelu teksta jer je njihova primjena na brodu vezana uz dizelske motore. Stoga se u ovom dijelu neće obrađivati.

1.1. Pumpe

Pumpe ili crpke su **hidraulički strojevi**, koji uloženi mehanički rad pretvaraju u energiju fluida (potencijalnu ili kinetičku). Namijenjene su dobavi tekućina na neku veću visinu, ostvarivanju cirkulacije rashladnih ili ogrjevnih tekućina, pražnjenju tekućina iz nekih brodskih prostora, miješanju dvaju tekućina i dr. Podjelu pumpi moguće je izvršiti prema više kriterija: tlaku - visini dobave, kapacitetu - količini dobave, broju okretaja, načinu pogona, konstrukciji¹⁰⁶.

Prema kriteriju predaje energije fluidu postoje:

- **volumenske pumpe**,
- **dinamičke pumpe**,
- pumpe s posebnim učincima.

U prvu grupu svrstavaju se **klipne** i **stapne** pumpe, zupčaste, vijčane, membranske i druge. Na brodovima se primjenjuju u sustavima gdje su potrebni visoki tlakovi, gdje se radi o viskoznim fluidima ili kada se pumpa nalazi iznad razine tekućine koju siše. Točnije, klipne se primjenjuju kao visokotlačne pumpe goriva dizelskih motora, kao radijalne i aksijalne u hidrauličkim sustavima (kormilarski uređaj), a stapne kao kaljužne (jer su samosisne)¹⁰⁷. Tipična primjena zupčastih pumpi je kod podmazivanja manjih dizelskih motora ili kompresora. Preko zupčaničkog ili nekog drugog oblika prijenosa snage (npr. remenski) pogone se preko koljeničastog vratila podmazivanog stroja pa se kaže da su privješene¹⁰⁸. Vijčane pumpe su najčešće dobavne i cirkulacijske (engl. booster) pumpe goriva motora ili općenito, viskoznih fluida.

Upućivanje ovakvih pumpi smije se učiniti tek nakon **otvaranja ventila na tlačnoj strani** pumpe (u tlačnom vodu). U protivnom, riskira se teža havarija pumpe ili cjevovoda. Ipak, zbog sprječavanja takvih šteta, uzrokovanih ljudskom nepažnjom, obično se u kućište pumpe ili kao dio cjevovoda ugrađuje sigurnosni (prekotlačni) ventil. Ako se pumpa starta i dođe, zbog bilo kojeg razloga (zatvorenog ventila na tlačnoj strani, začepljenja cjevovoda), do prekomjernog povećanja tlaka, isti propušta fluid na usisnu stranu ili u neki tank iz kojega pumpa siše.

U drugu skupinu spadaju **turbopumpe**, a mogu biti radijalne (**centrifugalne**) i aksijalne (propelerne), kao granični slučajevi, ali i mnoštvo prijelaznih tipova. Centrifugalne pumpe su danas najprimjenjivnije pumpe na brodu. Najčešće se primjenjuju za velike dobave (kapacitete) pa su dio sustava iskrcaja tereta ili balasta, no mogu se izvesti kao višestepene pa u tom slučaju daju i visoke tlakove. Osim primjene u spomenutim sustavima, koriste se kao pumpe rashladne morske i slatke vode (općenito vode), glavne protupožarne pumpe pa i kao pumpe kaljuže. Propelerne se koriste u automatskim sustavima za regulaciju nagiba broda (engl. antiheeling system).

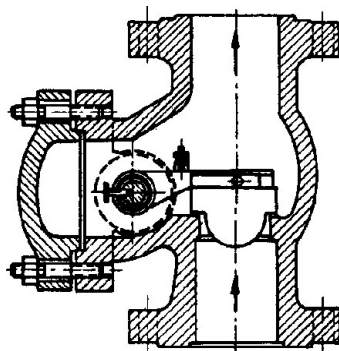
¹⁰⁶ Čitatelja upućujem na službenu literaturu za ovaj dio kolegija *Brodski energetske sustavi*, a ovdje će se najviše pažnje posvetiti načinu na koji pumpa predaje energiju fluidu.

¹⁰⁷ Ova se primjena napušta jer su zbog prisutnih nečistoća pogodnije centrifugalne pumpe.

¹⁰⁸ Preko zupčaničkog ili drugog prijenosa, pokreće ih koljeničasto vratilo samog stroja.

Ove se pumpe startaju sa **zatvorenim ventilima na tlačnoj strani**¹⁰⁹. Također, jedna od važnijih, loših, karakteristika jest da nisu samosisne tj. nisu u stanju povući tekućinu u usisnu cijev ako se nalaze iznad razine tekućine. Kako se onda centrifugalne pumpe mogu koristiti kao kaljužne? Ako je poznato da se pumpa nalazi na razini najdonje podnice strojarnice, a razina kaljužne vode je npr. 1 m ispod, na prvi je pogled takva primjena nemoguća.

U zastarjelim izvedbama to se rješavalo primjenom nepovratnog ventila (gravitacijske klapne¹¹⁰) na samom početku usisne cijevi i cijevi s lijevkom za nadolijevanje na usisu pumpe. Prije upućivanja pumpe bilo je potrebno nadopuniti usisnu cijev pumpe kroz spomenuti lijevak. Moderno rješenje uključuje primjenu ejektora, koji stvarajući potlak u usisnoj cijevi 'podigne' tekućinu do kućišta pumpe i detaljnije će se obraditi u poglavlju o automatskom radu centrifugalne pumpe i zračnog ejektora.



Slika 1. Nepovratni ventil - gravitacijska klapna

Pumpe s posebnim učincima su mlazne pumpe¹¹¹, pumpe s vodenim prstenom i dr. Jedna od primjena mlaznih pumpi spomenuta je u prethodnom poglavlju (kod generatora slatke vode). Također, važni su u sustavima tereta i balasta za posušivanje tankova. Moguća primjena pumpe s vodenim prstenom je također u sustavu tereta. Kako bi se spriječio ulazak i zadržavanje plinova u kućištu glavne pumpe tereta, redovito centrifugalnog tipa, na usisnoj se strani, između tanka i pumpe, ugrađuje separator (odjeljivač) plinova. Izvodi se kao vertikalno postavljena cilindrična posuda. Dovod iz tanka te spoj na usisnu stranu pumpe spojeni su na donju stranu, a ako s tekućim teretom u posudu uđe i plinovita faza, ista se zbog manje gustoće diže u gornji kraj posude. Pumpa tereta zbog toga u osnovi usisava samo tekuću fazu, dok pumpa s vodenim prstenom spojena na gornji kraj posude, siše plinove (vakuum pumpa).

Jedan od nedostataka stapne (klipne) pumpe jest nejednolika dobava. Jedan klip (stap) može biti jednoradni, dvoradni ili diferencijalni ('jednoiporadni'). Na slici dolje lijevo prikazana je jednoradna jednocilindrična stapna pumpa, a na desnoj strani dvoradna jednocilindrična stapna pumpa.

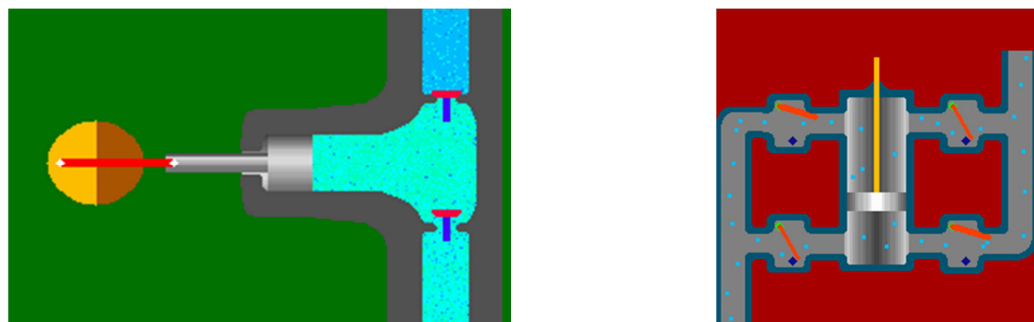
Lijeva slika prikazuje radni element (stap, klip) u lijevom krajnjem položaju – završio je takt usisa. U sljedećem trenutku počinje gibanje udesno te će doći do spuštanja usisnog ventila, a uslijed povećanja tlaka u radnom prostoru pumpe i do otvaranja tlačnog ventila. Iz opisa rada jasno je da se radi o nejednolikoj dobavi – fluid se naizmjenično usisava iz usisne cijevi u radni prostor i tlači iz njega u tlačni cjevovod. Krivulja dobave po vremenu može se prikazati sinusoidom. Na početku gibanja stapa prema desno dobava je mala, postepeno raste s

¹⁰⁹ Mnoge primjene uključuju automatsko startanje pa se mora osigurati startanje sa zatvorenim ventilom na tlačnoj strani i njegovo automatsko otvaranje s porastom broja okretaja rotora pumpe tj. tlaka koji pumpa ostvaruje.

¹¹⁰ Kada tekućina struji cjevovodom klapna je podignuta. Kada se pumpa zaustavi, tekućina se zbog djelovanja gravitacije vraća niz cjevovod, no i klapna sjeda na sjedište i sprječava takvo povratno strujanje.

¹¹¹ U literaturi se sreću nazivi: ejektori, eduktori, injektori, ovisno o primjeni, no sve su to konstrukcijski mlazne pumpe.

porastom brzine kretanja stapa u cilindru, da bi u krajnjem desnom položaju bila opet jednaka nuli, kada opet započinje takt usisa.

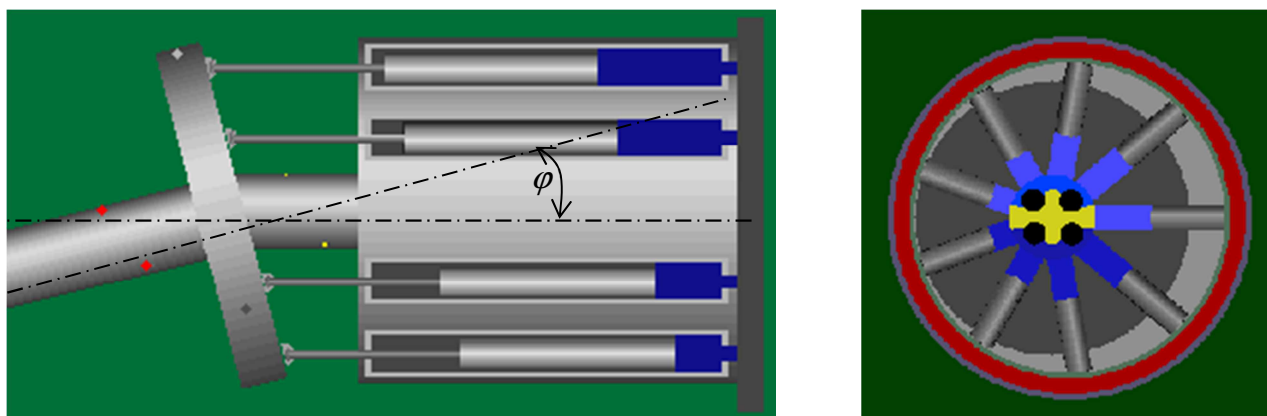


Slika 2. Jednoradna i dvoradna jednocilindrična stapna pumpa [10]

Na slici desno pumpa ostvaruje dobavu s obje strane stapa pa se kaže da je dvoradna. Nacrtana je u kretanju k donjoj mrtvoj točki. Iz donjeg radnog prostora tlači se fluid u tlačni vod, a u gornji se prostor fluid usisava. Kada počne uspinjanje prema gornjoj mrtvoj točki, u donji se prostor fluid usisava, a iz gornjeg tlači u zajednički tlačni vod. Ovakva je dobava nešto ujednačenija nego u slučaju jednoradne pumpe i prikazuje se dvjema, za 1π (pola okreta koljeničastog vratila) pomaknutim, sinusoidama. U tom je smislu najbolja diferencijalna pumpa, koja tlači s obje strane (kao dvoradna), a usisava samo s jedne strane (kao jednoradna).

Kako bi se dobava ovakvih pumpi još više ujednačila mogu se izvoditi kao višecilindrične ili se na tlačni vod spaja posuda pod tlakom (vjetrenik, akumulator). Kada je radni fluid voda vjetrenik se ispunjava zrakom (i povremeno nadopunjuje¹¹²). Promjenjiva dobava kompenzira se djelomično promjenom volumena zraka u posudi. Kada dobava raste (u odnosu na neku srednju) djelomično se fluid tlači u cjevovod i djelomično u posudu, a kada opada, zrak iz posude istiskuje fluid u tlačni cjevovod. Jedna od važnijih primjena tlačnog akumulatora je u hidrauličkim sustavima¹¹³, koji su na brodovima prilično česti za potrebe daljinskog upravljanja ventilima, pogona pumpi tereta ili hidrauličkih palubnih strojeva.

Višecilindrične klipne pumpe (aksijalne i radijalne) nalaze primjenu upravo u takvim hidrauličkim sustavima. Pojednostavljeni prikaz aksijalne i radijalne višecilindrične klipne pumpe dat je na slici 3. Mogu biti izvedene s promjenjivim hodom klipova te smjerom dobave. Kod aksijalne se to izvodi promjenom kuta ϕ između pogonskog vratila te vratila kućišta pa konstrukcijsko rješenje promjene kuta u rasponu $\pm \phi_{\max}$ znači da se može mijenjati količina i smjer dobave. Kod radijalne se to izvodi promjenom ekscentra.



Slika 3. Aksijalna i radijalna klipna pumpa [10]

¹¹² Zašto? Voda ima sposobnost otapanja plinova.

¹¹³ Radi se o sustavima koji rade s tlakovima i do 35 MPa (350 bar, 5000 psi) te su spomenute oscilacije tlaka znatne. Pored toga akumulatori kompenziraju hidrauličke udare u cjevovodu.

Presjek kućišta i rotora centrifugalne pumpe dat je na slici 4. Kod prikazane se izvedbe rotor okreće u smjeru kazaljke sata pa ima krila zakrenuta unazad, no mogu biti postavljena i radijalno ili zakrenuta prema naprijed. Također, ova je izvedba s horizontalnom osi, no zbog ograničenog prostora brodske strojarnice, pogodne su i često se koriste s vertikalnom osi. Pumpa ostvaruje usis kroz otvor po sredini rotora. Zbog rotacije i trenja čestica fluida i rotora dolazi do ubrzanja čestica ili drugim riječima, rotor fluidu predaje kinetičku energiju. Čestice fluida ubrzavaju prema obodu rotora pa završavaju u kućištu spiralnog oblika.



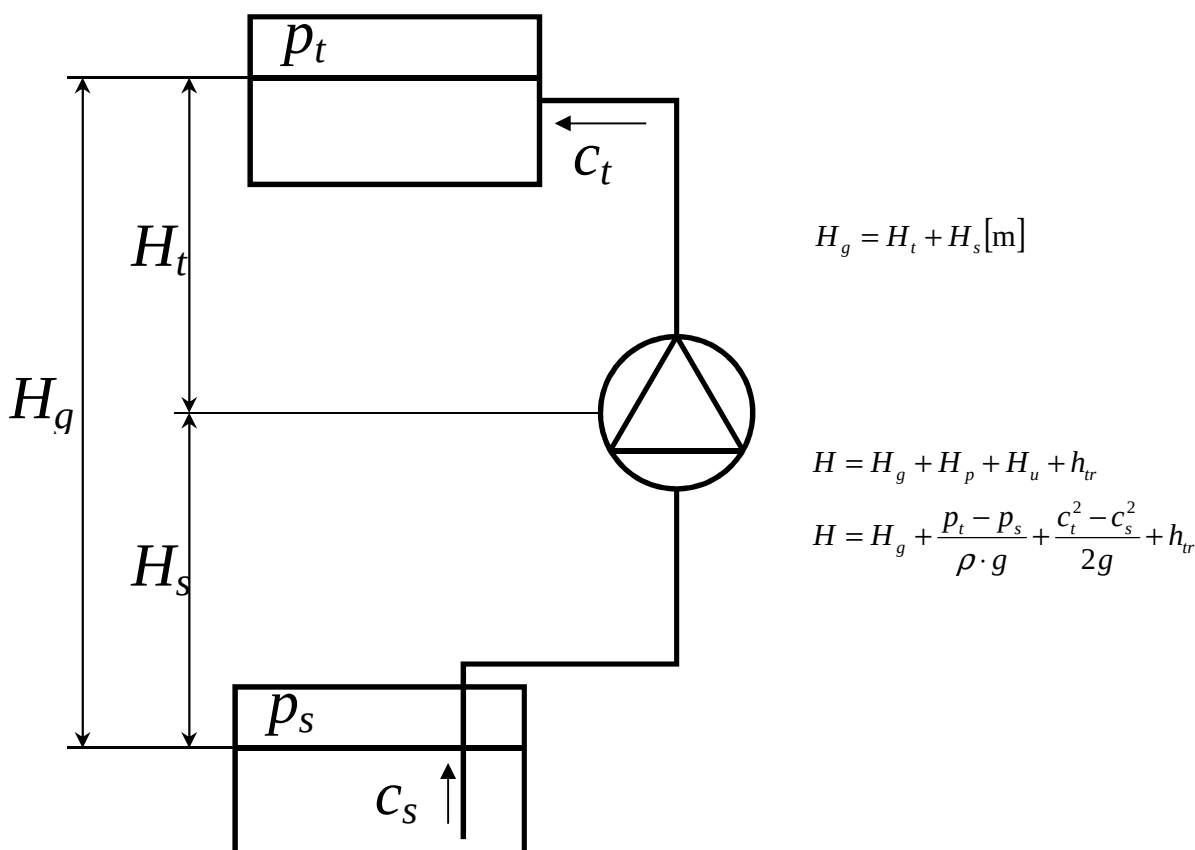
Slika 4. Dinamička (centrifugalna) pumpa [10]

Oblik kućišta je spiralan kako bi se čestice fluida koje izađu iz rotora sprovele u izlazni difuzor. U difuzoru se kinetička energija (energija brzine) pretvara u potencijalnu – tlak, te je na izlazu iz difuzora najveći tlak koji se može pojaviti u sustavu.

1.1.1. Energija pumpanja

Jednostavna shema na slici 5 prikazuje pumpu koja siše fluid iz posude S (usisne) i tlači u posudu T (tlačna). Na bilo kojem mjestu u cjevovodu može se postaviti kontrolni presjek te odrediti energiju koju fluid u njemu ima. Radi se o energiji položaja, tlaka te brzine strujanja u presjeku (kinetičkoj). Ako se kontrolni presjeci postave u usisnoj i tlačnoj posudi, dio energije koju je pumpa predala fluidu podignuvši je na veću visinu je zbroj visina H_s (usisne) i H_t (tlačne). Taj se iznos naziva geodetska visina – H_g . Posude mogu biti pod različitim tlakovima te se taj dio energije koju je pumpa predala fluidu prikazuje kao drugi član s desne strane donjih dvaju izraza, a ako je fluidu predana i kinetička energija prikazana je trećim članom s desne strane¹¹⁴.

¹¹⁴ Neki od članova mogu biti i negativni, ali ukupni zbroj mora biti pozitivan jer u suprotnom pumpa nije u stanju dobavljati fluid ili se čak ponaša kao turbina (centrifugalna).



Slika 5. Osnove rada pumpe, gdje su veličine u izrazima: H_g [m] – geodetska visina zbroj usisne H_s [m] i tlačne H_t [m], p_t [Pa] – tlak u kontrolnom presjeku na tlačnoj strani, p_s [Pa] – tlak u kontrolnom presjeku na usisnoj strani, ρ [kg/m³] – gustoća fluida, g [m/s²] – ubrzanje sile gravitacije, c_s [m/s] – brzina strujanja fluida u kontrolnom presjeku usisne cijevi, c_t [m/s] – brzina strujanja fluida u kontrolnom presjeku tlačne cijevi, h_{tr} [m] – gubici zbog otpora u cjevovod.[1]

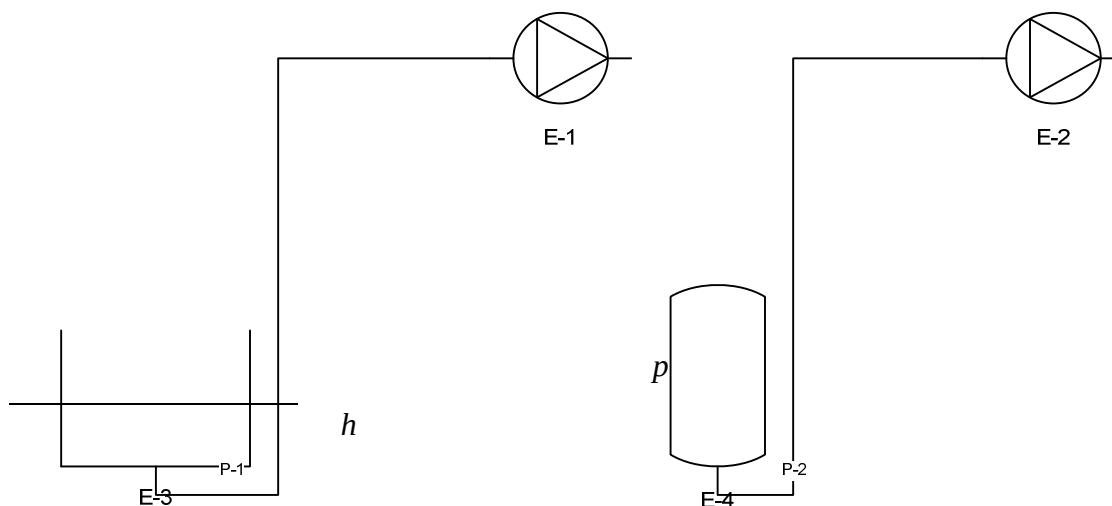
Zbog dimenzionalne analize u nazivniku drugog člana je umnožak ρg , gdje je ρ gustoća fluida, a g ubrzanje sile gravitacije, dok je u nazivniku trećeg člana izraz $2g$. Kako se u svakom cjevovodu pojavljuju gubici zbog trenja fluida i stijenke cijevi, prisutnih elemenata cjevovoda (spojevi, promjene presjeka, zaporni i regulacijski elementi, filtri...) potrebno je pribrojiti i njih (h_{tr}). Ukupan zbroj predstavlja manometarsku visinu pumpe ili ukupan napor pumpe, odnosno specifičnu energiju (izraženu u metrima visine stupca fluida) koju pumpa predaje fluidu.

Prema propisima klasifikacijskih društava moraju postojati indikatori tlaka¹¹⁵ na usisnoj i tlačnoj strani pumpe. Razlika vrijednosti tih dvaju tlakova u praksi pokazuje napor pumpe i ispravnost rada. Osim indikacije tlaka, mjeri se broj okretaja pogonskog stroja (parna turbina) ili opterećenje pogonskog elektromotora (vatsat, ampermetar).

Na slici 5 je, čisto teoretski, prikazano postojanje **usisne visine**. Da li se pumpa smije postaviti iznad tekućine koju siše i ako smije, kolika ta visina može biti¹¹⁶? Kako bi se mogao shvatiti odgovor na ovo pitanje potrebno je znati neke fizikalne osnove, a prije svega, poznavati zakon o spojenim posudama.

¹¹⁵ Manometri, a ako apsolutni tlak može pasti i ispod vrijednosti atmosferskog tlaka manovakuummetri.

¹¹⁶ Iz ispitne prakse uočio sam da studenti ovu materiju ne shvaćaju ili ne smatraju bitnom, a trebalo bi biti suprotno.



Slika 6. Usis iz otvorene posude i posude pod tlakom. [10]

U slučaju prikazanom na slici lijevo, visina tekućine u otvorenom tanku u odnosu na dno strojarnice (razinu mora ili bilo koju drugu točku) iznosi h . Ako je u prostoriji u kojoj se tank nalazi i u usisnoj cijevi pumpe jednak tlak (npr. atmosferski), bit će prema zakonu o spojenim posudama i razina fluida u cijevi ista. Pumpa mora smanjiti apsolutni tlak u usisnoj cijevi kako bi se razina fluida podignula prema izrazu

$$p_{\text{tan } k(\text{atm})} + \rho g h_{\text{tan } k} = p_{\text{cjev}(\text{potlak})} + \rho g h_{\text{cjev}} ,$$

$$h_{\text{cjev}} - h_{\text{tan } k} = \frac{p_{\text{tan } k(\text{atm})} - p_{\text{cjev}(\text{potlak})}}{\rho g} .$$

Ukoliko je tank otvoren, i u prostoriji u kojoj se nalazi atmosferski tlak (npr. kaljužni zdenac u strojarnici), u usisnoj cijevi mora se stvoriti potlak (vakuum) kako bi se razina fluida podigla u odnosu na tank – prema odnosu što veći potlak, veća razlika u visini.

U knjizi prof. dr. sc. Martinovića dat je primjer s atmosferskim tlakom i vodom. Teoretski se može postići apsolutni, 100 %-tni vakuum (apsolutni tlak iznosi 0 Pa) pa će razlika tlakova u brojniku s desne strane donjeg izraza biti jednaka 0,1 MPa. Ako se uzme približna vrijednost $g=10 \text{ m/s}^2$ i gustoća vode $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ lako je izračunati da će usisna visina iznositi 10 m.

U praksi, na brodu, to je nemoguće postići iz dva razloga. Prvi leži u činjenici da brodske pumpe ne mogu postići apsolutni vakuum pa razlika tlakova neće iznositi 0,1 MPa nego znatno manje. Drugi razlog je početak isparivanja koji će se desiti u usisnoj cijevi pumpe (u ovisnosti o apsolutnom tlaku u cijevi i stvarnoj temperaturi fluida). Osnove ovoga su date u poglavlju o generatorima pare, tj. vodi i vodenoj pari, no vrijede za sve druge tehničke tekućine (npr. sirovu naftu). Također, zanemareni su otpori koji se javljaju u usisnoj cijevi. Usisna će visina iznositi u najboljem slučaju sedam, osam metara, a realnije, tek oko pet do šest metara¹¹⁷.

Što ako pumpa siše iz posude pod tlakom? Može li usisna visina biti veća od teoretskih 10 m? Naravno, i ovisi direktno o tlaku u samoj posudi. Neka u posudi tlak iznosi 0,6 MPa (6 bar), bez ikakvog rada pumpe, prema gornjem će izrazu (opet za vodu) visina fluida u cijevi iznositi

¹¹⁷ Na tankerima za prijevoz kemikalija nakon završetka postupka iskrcaja i ocjeđivanja cjevovoda, u nekim se slučajevima (ovisno o opasnosti tereta) vrši 'superstripping' (nadposušivanje) pumpama koje postižu znatne potlake.

$$\Delta h = \frac{6 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^5}{1000 \cdot 10} = 50m,$$

odnosno pumpa (ili neki potrošač) može se nalaziti 50 m iznad razine tekućine koju siše.

Takve kombinacije nisu česte (s posudom pod tlakom na usisnoj strani pumpe), ali primjena tanka pod tlakom jest. Radi se o hidroforu, a primjenjuje se za dobavu vode za piće, pranje i kuhanje u nadgrađe te kao iscrpni izvor vode u automatskom protupožarnom sustavu za gašenje prskanjem.

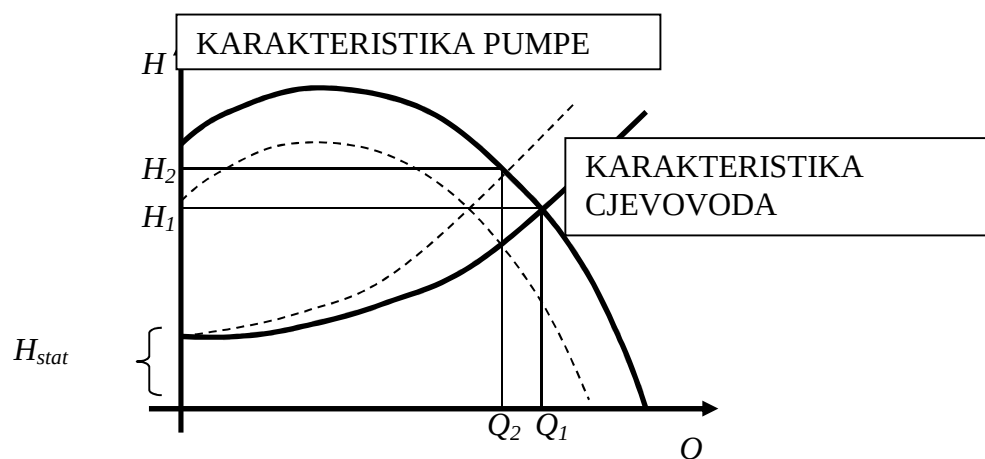
1.1.2. Regulacija dobave centrifugalne pumpe

Proizvođači daju karakteristične dijagrame pumpi pri različitim okretajima porivnog stroja pumpe, no kako će se pumpa 'ponašati' ovisi i o izvedbi cjevovoda. Zato se na dijagramu s kapacitetom Q na apscisi i visinom dobave H na ordinati, prikazuju karakteristike pumpe i cjevovoda kojega je pumpa dio¹¹⁸. Takav je dijagram prikazan na slici 7.

Karakteristika cjevovoda sastoji se od H_{stat} i H_{din} , pri čemu je prvi naprosto visina stupca tekućine u cjevovodu, a drugi se javlja pri strujanju tekućine i raste s brzinom strujanja.

Presjecište karakteristika pumpe i cjevovoda je **radna točka** iz koje je vidljivo s kojim će tlakom i kapacitetom pumpa raditi. Za karakteristike prikazane punim linijama te su vrijednosti Q_1 i H_1 . Ako se želi smanjiti dobava pumpe potrebno je promijeniti položaj radne točke, a to je moguće promjenom karakteristike pumpe ili karakteristike cjevovoda.

Promjena karakteristike pumpe najčešće se ostvaruje promjenom broja okretaja pogonskog stroja. Isprekidana je krivulja karakteristika pumpe sa smanjenim brojem okretaja. Kako će to biti izvedeno ovisi o vrsti pogonskog stroja. Brzohodnim dizelskim motorima, plinskim i parnim turbinama te hidromotorima broj okretaja može se fino regulirati pa se i kapacitet pumpe može mijenjati gotovo od 0 do 100 % nominalnog. Elektromotorima se broj okretaja mijenja promjenom broja pari polova, što je prilično gruba regulacija¹¹⁹.



Slika 7. Dijagram dobave centrifugalne pumpe (H - Q). [10]

¹¹⁸ U knjizi prof. dr. sc. Martinovića date su i krivulje teoretske snage pumpe te iskoristivosti, no čini se da časniku palube to nije prioritetno znati.

¹¹⁹ Može se izvesti regulacija broja okretaja elektromotora promjenom frekvencije izmjenične struje s tzv. tiristorskim ispravljačima, no cijena takve izvedbe je viša te se rjeđe primjenjuje.

Promjena karakteristike cjevovoda vrši se regulacijskim ventilima, odnosno njihovim pritvaranjem. Naime, pritvaranjem ventila, povećavaju se otpori u cjevovodu te karakteristika postaje strmija (na slici je isprekidanom linijom prikazana karakteristika cjevovoda s pritvorenim regulacijskim ventilom). Regulacijski se ventili uvijek postavljaju na tlačnu stranu jer bi pritvaranje ventila na usisnoj strani moglo voditi do problema u radu pumpe¹²⁰.

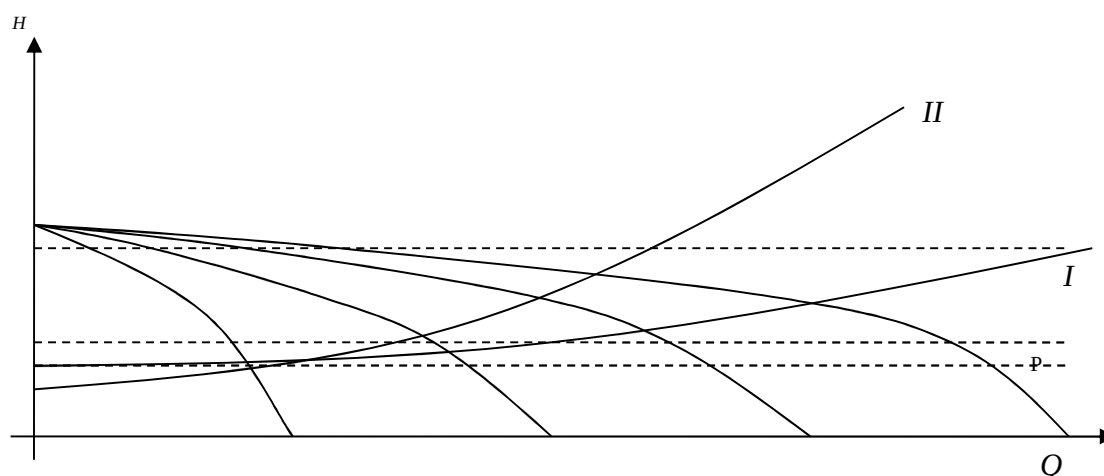
Koliko se smiju pritvoriti regulacijski ventili? Opasnosti po pumpu nema čak niti kada se potpuno zatvore. To je u skladu s, prije navedenim, načinom startanja centrifugalnih pumpi. Pitanje je ima li to smisla npr. pri iskrcaju tereta s tankera. Znatno pritvaranje regulacijskih ventila toliko bi smanjilo kapacitet (ratu iskrcaja) da bi takav postupak iskrcaja predugo trajao. Osim toga, ovisno o karakteristikama pumpe i cjevovoda te vođenju procesa regulacije kapaciteta, radna točka mogla bi pasti u područje u kojem se pumpa ponaša kao turbina. Takva situacija može biti opasna po pogonski stroj te bi se trebala izbjeći.

Ako puna linija na slici predstavlja karakteristiku pumpe s maksimalnim brojem okretaja te karakteristiku cjevovoda s maksimalno otvorenim ventilima (najmanjim otporima strujanja), sa slike je vidljivo da Q_1 predstavlja najveći kapacitet s kojim pumpa može raditi u tom cjevovodu. Smanjivanjem broja okretaja pumpe ili pritvaranjem regulacijskih ventila radna se točka može pomicati samo ulijevo, tj. kapacitet se može samo smanjivati.

Količina tekućine koju pumpa dobavlja može se regulirati i primjenom mimovodnog cjevovoda. To nije energetska kvalitetno rješenje, ali je jeftino. Pumpa i dalje radi punim kapacitetom i pogonski stroj troši samo malo manje energije¹²¹, ali je kapacitet smanjen jer se dio vraća na usisnu stranu, tj. recirkulira se.

Paralelnim radom više pumpi također se povećava protok. Na slici 8 prikazan je dijagram dobave četiri jednake pumpe te karakteristike dvaju cjevovoda od kojih jedan ima položenu, a drugi strmiju karakteristiku.

Krivulja zajedničkog paralelnog rada dvije, tri ili četiri jednake pumpe konstruira se tako da se odsječak koji krivulja jedne pumpe siječe na pravcu paralelnom apscisi (crtkane linije) nanese na isti pravac onoliko puta koliko pumpi je u paralelnom radu. Što više takvih pravaca i prenošenja to je konstrukcija točnija, no približno će izgledati kao na slici. Ovdje je važno uočiti povećanje kapaciteta sa svakom sljedećom pumpom koja se uključuje u paralelni rad. Budući da karakteristika cjevovoda nije pravac paralelan apscisi, svaka sljedeća pumpa u paralelnom radu manje doprinosi ukupnom kapacitetu.



Slika 8. Dijagram dobave više pumpi u paralelnom radu

¹²⁰ Prigušivanje može dovesti do isparivanja fluida u usisnoj cijevi, zagrijavanju pumpe, kavitaciji...

¹²¹ Može se opravdano pretpostaviti da će otpori tog mimovodnog cjevovoda biti manji čime se smanjuje ukupni napor pumpe, a time i potrebna teoretska snaga za pogon iste.

Uspoređivanjem presječnih točaka karakteristike jedne, dvije, tri i četiri pumpe i karakteristike cjevovoda I s presječnim točkama karakteristike jedne, dvije, tri i četiri pumpe s pravcem P (što bi odgovaralo cjevovodu bez otpora), vidljivo je povećanje odstupanja s povećanjem broja pumpe. Čini se da svaka nova pumpa u paralelnom radu manje doprinosi povećanju ukupnog kapaciteta. Odnosno, može se napisati sljedeća nejednakost

$$4 \cdot Q_1 > Q_4,$$

gdje je Q_1 kapacitet jedne pumpe, a Q_4 kapacitet četiri pumpe u paralelnom radu.

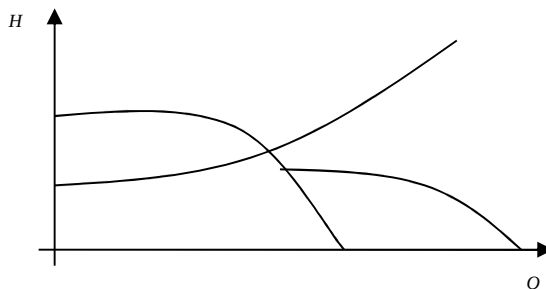
U slučaju cjevovoda označenog s I paralelni rad svih četiriju pumpi može biti opravdan, ali u slučaju cjevovoda II nema puno smisla. Za cjevovod II vrijedila bi ova nejednakost

$$4 \cdot Q_1 \gg Q_4,$$

a iz dijagrama je očito da uključanje četvrte pumpe u paralelni rad neznatno doprinosi povećanju ukupnog kapaciteta.

Ovakvi postupci, rada većeg broja pumpi u paralelnom radu, koriste se na tankerima za prijevoz sirove nafte kod kojih su sustavi tereta često izvedeni sa svega nekoliko pumpi velikog kapaciteta smještenih u pumpnoj stanici. Osim toga, paralelni rad više pumpi koristi se u sustavima rashladne morske ili slatke vode. Najčešća je izvedba s dvije jednake, glavne pumpe i jednom manjom, pumpom 'lučke službe'¹²², tj. pumpom za nuždu. Ako iz nekog razloga rashladni kapacitet jedne pumpe nije dovoljan, starta se druga, rezervna (engl. stand-by) pumpa¹²³ te rade paralelno.

Ima li smisla, u slučaju kada je jedna glavna pumpa u kvaru, a kapacitet jedne nedovoljan, startati i pumpu 'lučke službe'? Ako je karakteristika cjevovoda kao na slici dolje, odgovor je negativan. Zajednička karakteristika ne siječe karakteristiku cjevovoda te rad pumpe manjeg kapaciteta ne doprinosi povećanju ukupnog protoka u ovom cjevovodu. U tom je slučaju jedino rješenje smanjenje opterećenja strojeva.



Slika 9. Paralelni rad dvaju pumpi nejednakog kapaciteta (koji nema opravdanja).[10]

Dok se paralelnim radom povećava kapacitet (a neznatno i tlak), **serijskim radom** povećava se prije svega tlak (visina dobave). Konstrukcija dijagrama dvije ili više serijski spojenih pumpi analogna je onoj za paralelni rad, ali na okomitim pravcima (paralelni ordinati). Evo i dvije primjene takvog spoja: (1) u sustavu goriva glavog motora iz dnevnog tanka siše napojna pumpa na koju se serijski nadovezuje cirkulacijska (engl. booster) pumpa, a potreban tlak na rasprskućima postiže visokotlačna pumpa; (2) kada je potrebno ostvariti

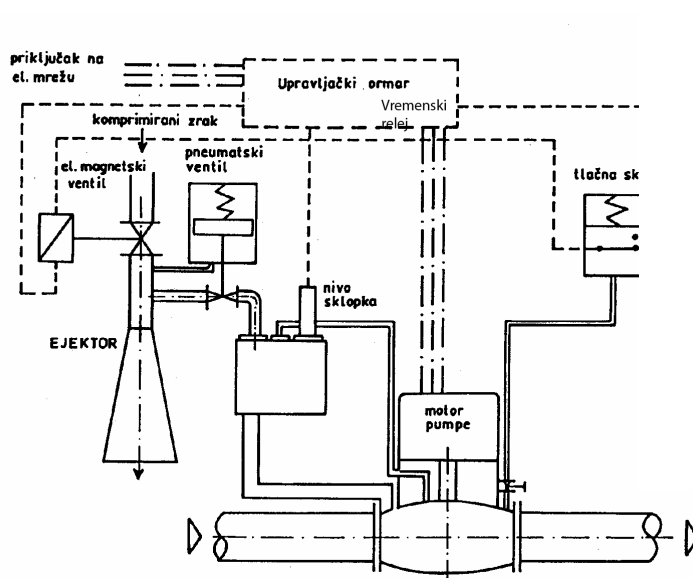
¹²² U engleskoj terminologiji to je *auxiliary pump* tj. pomoćna pumpa, a ovakav je hrvatski naziv možda i bolje opisuje. Ista se koristi u luci kada radi samo jedan ili ev. dva pomoćna motora i neki pomoćni uređaji te je ukupni potrebni rashladni kapacitet daleko manji nego kad radi i glavni motor (u plovidbi).

¹²³ To se kod automatiziranih strojarica izvodi automatski u slučaju pretjeranog pada tlaka.

veće visine dizanja tekućine centrifugalne pumpe se izvode kao višestepene. što nije ništa drugo do serijski spoj više pumpi i primjenjuje se kod uronjenih pumpi tereta.

1.1.3. Rad pumpi u automatiziranim strojarnicama

U strojarnicama klase automatiziranosti AUT1, AUT2 i AUT3 rad svih strojeva i uređaja je automatiziran pa tako i pumpi. Barem kada se radi o tzv. kritičnim sustavima, odnosno sustavima koji su bitni za pogon (broda, generatora struje). U tim sustavima, kod preniskog se tlaka automatski upućuje rezervna pumpa. Dakle, pumpu uključuje tlačni prekidač (presostat) ili točnije, prekidač niskog tlaka, spojen na zajedničku tlačnu cijev. Pumpu može startati i prekidač razine (engl. level switch). Kod prodora mora u nenadziranu strojarnicu noću, automatski se starta pumpa kaljuže. Centrifugalnog je tipa, a mora biti samosisna te se izvodi kao na slici 10.



Slika 10. Centrifugalna pumpa sa zračnim ejektorom [9]

Pretpostavka je da je kućište pumpe ispunjeno zrakom. Kada se pumpa starta (prekidač razine djeluje na kontaktor elektromotora) neće biti u stanju povući tekućinu pa neće biti niti tlaka u tlačnoj cijevi. Tlačna će sklopka biti u položaju kao na slici te će time biti zatvoren strujni krug elektromagnetskog ventila. Komprimirani zrak prolazi kroz ejektor djelujući najprije na aktuator (pneumatski) ventila, a zatim počinje stvarati potlak u usisnoj cijevi tj. kućištu pumpe. Kada se u kućištu pumpe pojavi tekućina i pumpa postigne tlak, djelovat će na tlačnu sklopku i zatvoriti elektromagnetski ventil.

Što se dešava ako pumpa nakon normalnog rada ostane bez tekućine? Dešava se proces kako je gore opisan, ali ako u prostoru iz kojeg pumpa siše nema tekućine, rad ejektora i pumpe nema smisla, ili je čak štetan. Zato se u upravljački sustav uključuje i vremenski relej. Čim se zatvori strujni krug elektromagnetskog ventila, počinje odbrojanje vremenskog releja. Ukoliko se u nekom (podešenom) vremenu ne postigne tlak u tlačnoj cijevi, vremenski relej isključuje pumpu.

Osim toga, pumpe bitne za pogon (npr. pumpe ulja za podmazivanje glavnog motora) automatski se startaju kada se nakon prethodnog raspada elektroenergetskog sustava (engl. black-out), pogon opet uspostavi (pojavi se napon na sabirnicama).

Sva se događanja s pumpama ispisuju na printeru smještenom u ECR. Taj ispis predstavlja dokaz u slučaju neke havarije jer bi se podaci na disku računala mogli izgubiti.

1.1.4. Mlazne pumpe

Mlazne su pumpe samosisne, a kako nemaju pokretnih dijelova koji bi se zbog kavitacije mogli oštetiti, mogu se koristiti za usisavanje tekućina, para i plinova. Nazivaju se i ejektor, eduktori, injektor. Za rad im je potreban samo radni ili primarni ili pogonski fluid, koji također može biti tekućina, para ili plin. Na brodovima se koriste u najrazličitije svrhe, a jedna je spomenuta¹²⁴ u prethodnom poglavlju. Osim navedene, gdje je pogonski fluid zrak, koriste se za posušivanje tankova tereta (sirove nafte), gdje je i pogonski fluid sirova nafta, kod destilacijskih generatora slatke vode za pražnjenje rasoline i stvaranje potrebnog vakuuma te kod protupožarnih sustava s pjenom, u kojima je pogonski fluid morska voda.

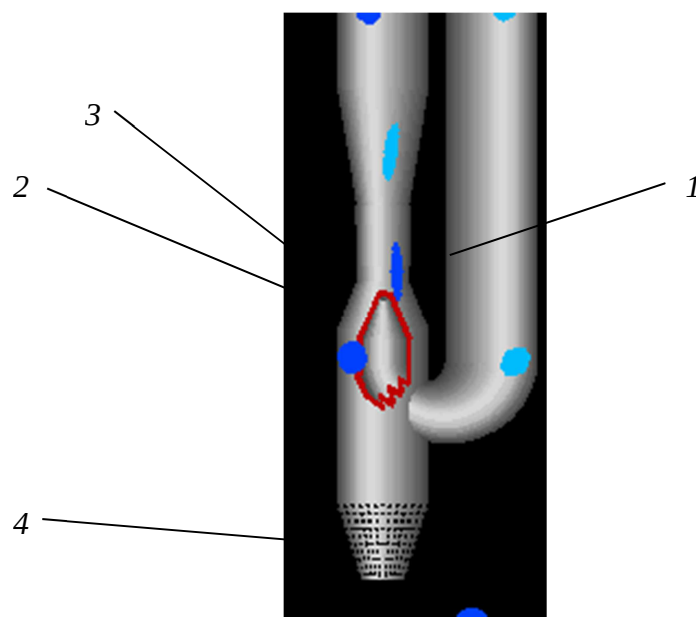
Osnova rada se zasniva na Bernoullijevom zakonu koji kaže da ukoliko u nekom cjevovodu nema izvora energije (pumpa), u bilo kojem presjeku zbroj statičke i dinamičke komponente tlaka mora biti konstantan¹²⁵. U vrlo pojednostavljenom, ali za ovu priliku dovoljno točnom obliku, to se može zapisati kao

$$p_s + p_d = konst.,$$

gdje p_s predstavlja statičku, a p_d dinamičku komponentu tlaka. Dinamička komponenta je funkcija kvadrata brzine strujanja, odnosno raste s kvadratom brzine. U konstrukciji kao na slici 11 zbog suženja presjeka – sapnice (2) na kanalu pogonskog fluida (1) dolazi do povećanja brzine strujanja te u prostoru nakon sapnice – miješalištu (3) dolazi, prema zakonu, do pada tlaka i usisa sekundarnog fluida. U ovoj se izvedbi usisni filter ejektora (4) uranja u tekućinu koju se želi isisati.

¹²⁴ Zračni ejektor centrifugalne pumpe.

¹²⁵ Ako se radi o ravnom dijelu cijevi (jer se u suprotnom pojavljuje i energija položaja) i uz zanemarivanje gubitaka zbog trenja.



Slika 11. Mlazna pumpa [10]

1.2. Ventilatori i kompresori

Ventilatori su turbostrojevi koji mehanički rad pretvaraju u energiju plina i koriste se u cjevovodima plinova: ventilacije¹²⁶, klimatizacije, inertnog plina ili izgaranih plinova generatora pare. Postižu relativno mala povećanja tlaka, svega nekoliko tisuća paskala.

Kompresora ima različitih tipova, a osnovna razlika između njih i ventilatora jest u iznosu tlakova. Kompresori povećavaju tlak plinova ili nešto rjeđe para, od nekoliko bara do čak 1000 bara.

1.2.1. Ventilatori

Osnove rada ventilatora objašnjene su kod turbopumpi. Razlika je u gustoći fluida s kojim rade. Ventilatori, kao i turbopumpe, mogu biti **centrifugalni** i **aksijalni**. Osnovna je razlika u primjenjivosti. Aksijalni se mogu smjestiti unutar cjevovoda pa mogu biti prekretni (reverzibilni), a centrifugalni ne.

Regulacija dobave se također izvodi kao kod turbopumpi: promjenom karakteristike ventilatora, cjevovoda ili rjeđe, mimovodnim kanalom. Promjena karakteristike cjevovoda izvodi se usisnom klapnom¹²⁷ ili klapnama te klapnom u tlačnom cjevovodu. Neke izvedbe ventilatora imaju usisne statorske lopatice koje možda mijenjaju i karakteristiku cjevovoda, ali u osnovi, zbog promjene upadnog kuta plina na lopatice rotora, mijenjaju karakteristiku ventilatora. Osim toga karakteristika ventilatora mijenja se zakretanjem lopatica rotora te promjenom broja okretaja pogonskog stroja ventilatora¹²⁸.

Očita je sličnost regulacije kapaciteta ventilatora i turbopumpi, a to je i logično jer su konstrukcijski isti (turbostrojevi). Razlika je u gustoći fluida s kojim rade. Na dijagramima na

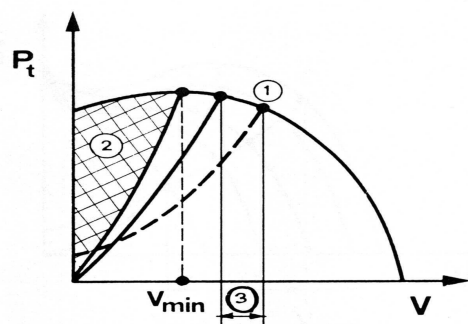
¹²⁶ To je prisilna ventilacija. Postoji i prirodna ventilacija – vjetrolovkama, no danas je rjeđe u primjeni.

¹²⁷ Uočite bitnu razliku u odnosu na pumpe, gdje se regulacijski ventil nikada ne stavlja u usisni cjevovod.

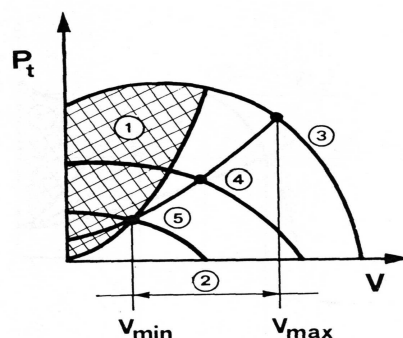
¹²⁸ Najčešće su to trofazni elektromotori pa se, zbog povoljne cijene, regulacija izvodi promjenom broja pari polova.

slici 12 prikazani su dijagrami s karakteristikama ventilatora i cjevovoda za četiri načina regulacije kapaciteta. Na svima su označene radne točke te posebno minimalni kapacitet. Nikada režim rada ventilatora ne bi smio ući u osjenčano područje jer se ventilator ponaša kao turbina (pa se pogonski elektromotor ponaša kao generator)¹²⁹.

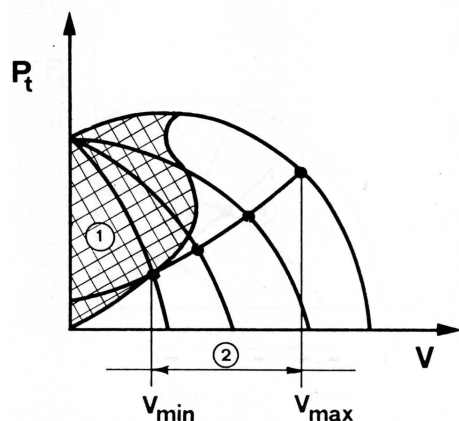
Ventilatori velikih kapaciteta, tj. elektromotori koji ih pokreću, prilikom upućivanja povuku električnu struju jakosti nekoliko puta veće od nominalne te je pri upućivanju važno poznavati stupanj automatiziranosti i trenutno stanje brodske elektrane.



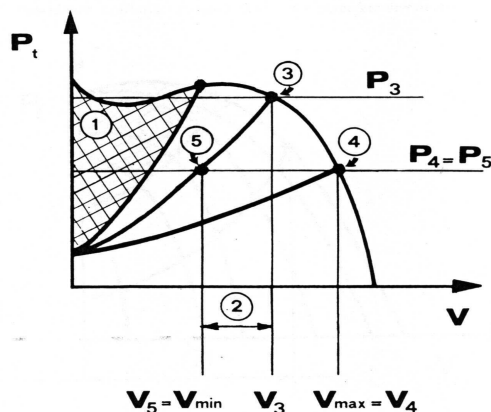
Regulacija dobave promjenom karakteristike cjevovoda (usisne ili tlačne zakolpke)



Regulacija dobave promjenom karakteristike ventilatora (broja okretaja)



Regulacija dobave promjenom nagiba usisnih lopatica



Regulacija dobave recirkulacijom (mimovodnim kanalom)

Slika 12. Regulacija dobave ventilatora [8]

Na slici 13 prikazani su centrifugakni i aksijalni ventilator s naznačenim smjerovima strujanja plina. Smjer strujanja kod aksijalnog ventilatora je promjenjiv u ovisnosti o smjeru vrtnje rotora. Prikazani centrifugalni ventilator pogonjen je direktno, ali primjenjuju se i izvedbe s remenskim prijenosom.

1.2.2. Ventilacija

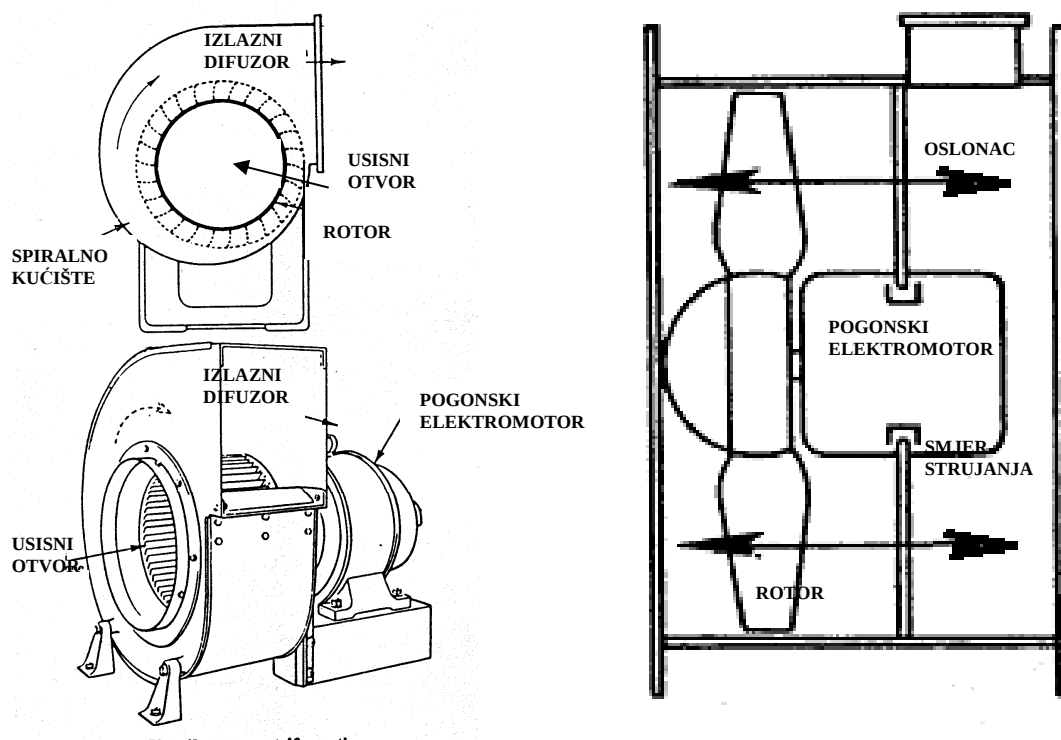
Prostor se ventilira kako bi se dovele količine zraka potrebne za **izgaranje toplinskih strojeva**, kako bi se **odvela toplina zračenja**, kako bi se **udio štetnih** (otrovnih, zagušljivih i zapaljivih) **plinova u zraku održao unutar dopuštenih vrijednosti** te zbog potreba **disanja posade i putnika**. Koji će od ovih kriterija biti važniji ovisi o vrsti prostora te će za strojarnicu

¹²⁹ Uočiti analogiju s centrifugalnim pumpama.

najveća potrošnja biti za izgaranje glavnog porivnog stroja, dok će se potrebne količine zraka za skladište u kojem se prevoze banane definirati u skladu s koncentracijom štetnih plinova.

Osim zraka potrebnog za izgaranje u glavnom motoru, dizelskim generatorima električne struje, generatoru pare, plinskoj turbini i spaljivaču smeća, manje količine zraka služe za hlađenje strojarne, za odvođenje štetnih plinova iz prostorije separatora (goriva i ulja) te zbog 'potrošnje' kompresora zraka. Zbog različitih režima rada cjelokupnog strojnog kompleksa ventilacija se uvijek izvodi s više ventilatora. U svakom trenutku količina zraka koja se troši mora biti manja od ubačene količine, no razlika ne smije biti prevelika. Za takav se sustav kaže da je **pozitivno balansiran**. Veći broj ventilatora znači da je sustav fleksibilniji i ubačene količine zraka bolje odgovaraju potrošnji, no skuplji je i teži za održavanje.

Količine zraka potrebne za izgaranje mogu se lako izračunati iz snage strojeva i potrošnje goriva, no vrlo često određuju ih njihovi proizvođači. Količine potrebne za odvođenje topline određuju se prema količini topline koju zrače strojevi, uređaji i druga oprema (kablovi, topli tankovi), pri čemu se za tropske vanjske uvjete u strojarnici – 35°C garantira temperatura zraka ne viša od 12,5°C.



Slika 13. Centrifugalni i aksijalni ventilator.

Cjevovodi ventilacije mogu biti **niskotlačni** ili niskobrzinski te **visokotlačni** ili visokobrzinski. U prvima su brzine strujanja zraka do 10 m/s, a u drugima i do 20 m/s¹³⁰. Navedene se brzine odnose na glavne kanale zraka, a u ograncima se brzine smanjuju. Izlazna brzina zraka u kabinama je relativno mala jer bi u protivnom smetala korisniku. Veće brzine strujanja znače i veće otpore strujanja – padove tlaka.

¹³⁰ Postoji i tzv. 'dirivent' sustav, no u osnovi se takva ventilacija ne izvodi cijevima. Primarni zrak (potrebne količine) dovodi se u strojarnicu samo niz vertikale, a daljnji se razvod ostvaruje sudaranjem s visokotlačnom strujom sekundarnog zraka. Zbog zakona o očuvanju gibanja, nakon 'sudara' struja se usmjerava u nekom novom (željenom) smjeru.

Obje izvedbe imaju prednosti i mana. Ventilatori u niskotlačnim cjevovodima su zbog manjih otpora strujanja manje teoretske snage, no cjevovodi, zbog većeg poprečnog presjeka, zauzimaju više mjesta. Zbog većih su otpora strujanja ventilatori visokotlačnih cjevovoda veće teoretske snage. Cjevovodi visokotlačnih sustava zbog vibracija i buke moraju biti izolirani. Zato su cijevi manjih dimenzija (poprečnih presjeka) te lakši za montažu.

Jedna je od najvažnijih primjena ovih cjevovoda ventilacija strojarnice. Zrak se razvodi po strojarnici (npr. do usisnih filtara turbopuhala motora) cijevima sve manjeg i manjeg poprečnog presjeka. Na izlaznim otvorima postavljene su, najčešće malo skošene, rešetke ('grilje'). Skošene su kako bi se izlazna struja zraka usmjerila prema potrošaču ili kako ne bi puhala direktno na posadu, ali i zbog prigušenja, tj. smanjenja izlazne brzine. Na svakom su izlaznom otvoru rešetke pod odgovarajućim kutem kako bi se postigla proračunska izlazna količina prema zakonu

$$Q = v_{izl} \cdot A_{reš},$$

gdje je A_{res} [m²] slobodna površina rešetke, v_{izl} [m/s] izlazna brzina zraka te Q [m³/s] protok zraka.

Samo su na cjevovodu s najvećim padom tlaka (u osnovi to je najdulji ogranak) rešetke maksimalno otvorene. Cijevi se vode sve do ispod najdonje podnice strojarnice. U tom se prostoru sakupljaju otrovni, zagušljivi ili zapaljivi plinovi jer su gušći od zraka. Prema tom se ogranku, odnosno otporima strujanja koji se u njemu javljaju, odabire ventilator.

U strojarnici se redovito ugrađuju niskotlačni sustavi, pravokutnog poprečnog presjeka, koji zauzimaju manje mjesta nego cjevovodi kvadratnog ili kružnog poprečnog presjeka. U novije doba sve češće se primjenjuju cjevovodi kružnog poprečnog presjeka, ali ne kao jedna cijev velikog promjera, već više manjih cijevi.

Izvedbe sustava ventilacije bitne su i zbog postupanja u slučaju požara. Naime, **prije ispuštanja protupožarnog sredstva, zaustavlja se prisilna ventilacija i zatvaraju ventilacijski otvori**. Kod gašenja s CO₂ pri otvaranju ormarića za daljinsko ispuštanje automatski se isključuju ventilatori strojarnice. To se provjerava jednom tjedno ili u prvoj pogodnoj luci. Osim isključivanja ventilatora u glavnim cijevima su protupožarne klapne koje se također, automatski, zatvaraju.

Prije je spomenuto kako neki ventilatori mogu biti reverzibilni. To znači da mogu raditi kao tlačni ili kao isisni. Zašto je to potrebno? Nakon što je požar u strojarnici pogašen primjenom CO₂ i nakon što je protekao potreban vremenski period kako bi se strojarnica ohladila (i provjereno je da je hladna) pristupa se ventilaciji. CO₂ je gušći od zraka i uvijek bi se zadržao pri dnu pa je povoljno da se neki ventilatori prekreću. Neki ventilatori tlače zrak u strojarnicu, a neki sišu i kroz otvore ispod najdonje podnice, gdje će se CO₂ kao gušći sakupljati. Ako to nije tvornički omogućeno, časnik stroja tlačni aksijalni ventilator pretvara u isisni tako da zamijeni mjesta dvije od tri faze pogonskog trofaznog elektromotora.

Osim egzaktnog izračuna količine zraka klasifikacijska društva za neke prostore definiraju broj izmjena zraka u jedinici vremena. Za pumpnu se stanicu tankera tako zahtijeva barem 20 izmjena zraka na sat¹³¹. Prostorije nadgrađa ventiliraju se sa svega nekoliko izmjena zraka u jedinici vremena po prostoru, a u ovisnosti o aktivnosti koja se u njemu izvodi: ambulanta, kabina, vježbaonica, kuhinja i dr.

¹³¹ Ako je poznat volumen pumpne stanice opet slijedi kapacitet u m³/h.

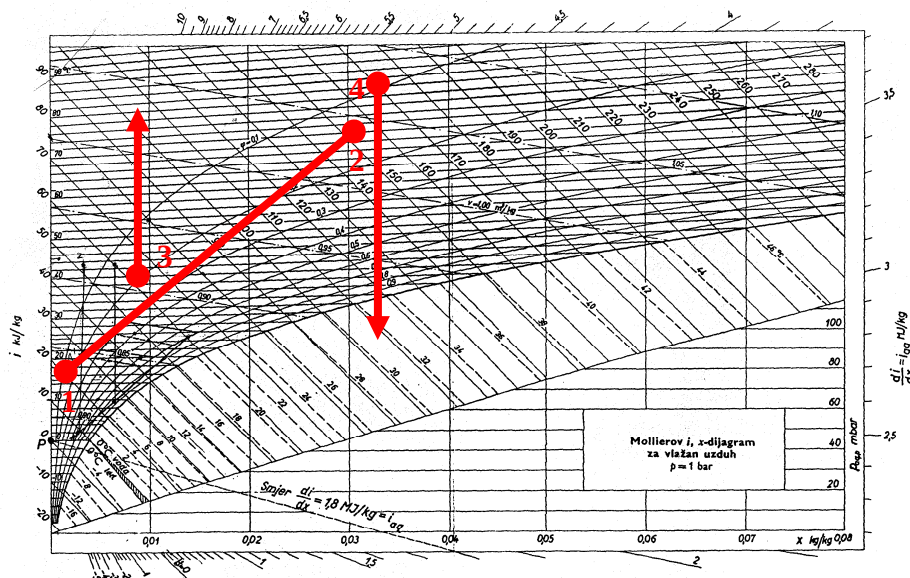
1.2.3. Klimatizacija

U ovisnosti o godišnjem dobu i geografskoj širini često je zrak potrebno i pripremati, klimatizirati. Ventilacijom se u neki prostor ubacuje okolni, vanjski, nepripremljeni zrak, dok se **klimatizacijom mijenja temperatura i vlažnost zraka**. Najčešće se radi o temperaturi i vlažnosti pogodnoj čovjeku, ali ima rješenja i za skladišta hlađenog tereta. Za čovjeka su pogodne temperature oko 20°C i relativna vlažnost od 50 do 60 %. Pri tome se mora voditi računa da temperatura ne odstupa previše od okolne, a posebno ljeti. Preporuka je da unutrašnja temperatura klimatiziranog prostora ljeti nije za više od 5°C ispod okolne.

Na slici 14 prikazan je dijagram promjene stanja vlažnog zraka i - x (ili prema novijoj nomenklaturi h - x). Na apscisi su vrijednosti apsolutne količine vlage (H_2O) u zraku – x [kg/kg], a na ordinati sadržaj topline h [J/kg]. Krivulje relativne vlažnosti idu od krivulje za 100 %-tnu relativnu vlažnost ($\varphi=1$), koja dijeli domen u područje nezasićenog i područje zasićenog zraka, do krivulje za 10 %-tnu relativnu vlažnost ($\varphi=0,1$). U području zasićenog zraka vlaga se ukapljuje. Izoterme su u području nezasićenog zraka gotovo horizontalne, a u zasićenom području se spuštaju koso udesno.

Neke osnovne promjene stanja zraka prikazane su na dijagramu. Ako se pomiješaju dvije zračne struje, stanje nastalo miješanjem ležat će na pravcu miješanja (spojnici točaka koje predstavljaju odgovarajuća stanja). Miješanjem struja stanja 1 i 2 nastat će struja zraka stanja koje leži na spojnici točaka. Stanje M nastalo miješanjem dijeli spojnicu u omjeru koji odgovara omjeru pomiješanih struja.

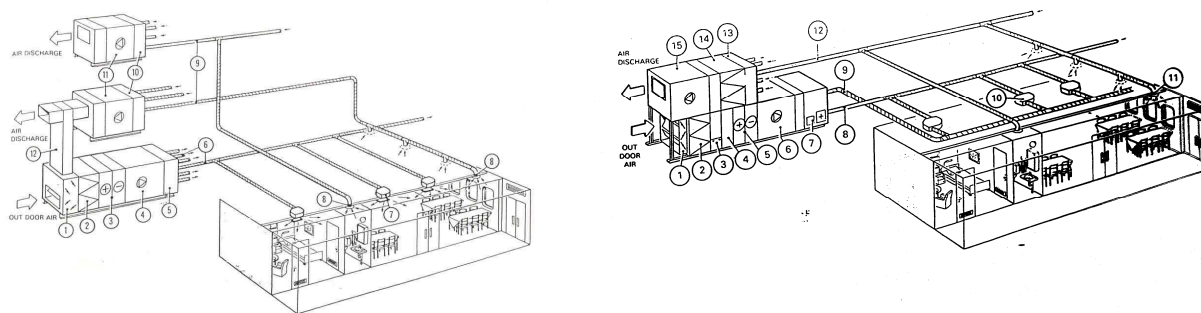
Ako se zrak stanja 3 grije u nekom izmjenjivaču topline, promjena se odvija prema strelici (od 3) uz konstantni sadržaj vlage x , ali uz promjenjivu vrijednost relativne vlažnosti φ . Hlađenje se odvija u suprotnom smjeru, prema dolje, također uz $x=\text{konst.}$ i promjenjivu relativnu vlažnost φ . Osim snižavanja temperature, u praksi se ovaj postupak provodi kako bi se zrak odvlažio. Ako se zraku stanja 4 oduzme toliko topline da se novo stanje nalazi unutar zasićenog područja, orošene se kapljice mogu mehaničkim putem odvojiti, dakle mijenja se apsolutna vlažnost - x . Stanje zraka jednoznačno je određeno temperaturom i relativnom vlažnošću.



Slika 14. Dijagram vlažnog zraka (i - x): miješanje dvaju struja (1-2), grijanje (3), hlađenje (4).[8]

Zrak za nadgrađe priprema se u **centralnim klima jedinicama**, koje se izvode od više standardnih sekcija (filterske, mješačke, ventilatorske, rashladne, ogrjevne, distribucijske). Kvalitetnije izvedbe uključuju dvije neovisne klima jedinice pa jedna radi, dok je druga rezervna. Veći putnički brodovi imaju daleko više rashladnih uređaja i centralnih klima jedinica. Znatno dio električne potrošnje otpada na klimatizaciju i ventilaciju, a za održavanje samih rashladnih i klimatizacijskih uređaja postoji poseban odjel brodskih inženjera i pomoćnog osoblja ('frižideristi').

Cjevovod klimatizacije nadgrađa može biti **jednozonski**, kada se zrak priprema na jednak način za cijelo nadgrađe ili **dvozonski**, kada se zbog insolacije jedne strane priprema na dva različita načina. Jednozonski može biti **jedno** ili **dvocijevni** kao na slici 15.



Slika 15. Jednocijevni sustav s recirkulacijom i dvocijevni sustav s regeneratorskim elementom.[8]

U sustavu na lijevoj strani zrak se za sve prostorije priprema jednako. Korisnik može u prostoriji regulirati samo količinu zraka. Klima jedinica se sastoji od: (1) miješališta, (2) filterske sekcije, (3) ogrjevno-rashladne sekcije, (4) ventilatorske sekcije, (5) distribucijske sekcije. U sanitarne prostore zrak ulazi iz dnevnih prostora. Zbog neugodnih se mirisa taj zrak isisava zasebnim ventilatorom, a iz ostalih se prostora dio zraka recirkulira. Količina recirkuliranog zraka može iznositi 70 % i više.

Sustav na desnoj strani razlikuje se utoliko što se na svaki element za dobavu zraka u prostoriji dovode dvije cijevi - hladne i tople struje zraka, te što se ušteda energije ne ostvaruje recirkulacijom već pomoću regeneratorskog elementa. Korisnik si miješanjem tople i hladne struje zraka podešava željenu temperaturu. Regenerator je pločasti rotacijski izmjenjivač topline te se pri radu ploče naizmjenično griju i hlade, u izlaznoj pa u dolaznoj struji. Ljeti se ploče hlade izlaznom strujom, a zatim hlade ulazni zrak: Zimi se strujanjem izlaznog zraka griju te zatim griju ulazni zrak. Kod ove se izvedbe energija sadržana u zraku iz sanitarnih čvorova također iskorištava jer nema recirkulacije i vraćanja neugodnih mirisa.

Ovo nisu sve mogućnosti. U izlaznoj, distribucijskoj sekciji klima jedinice ili u izlaznim jedinicama prostorije mogu se ugrađivati električni ili parni dogrijači. U klima jedinicama može se zrak ovlaživati prskanjem parom ili vodom. Ipak, osnovna ideja izvedbe klimatizacije dovoljno je jasno data.

1.2.4. Kompresori

Konstruktivski su slični pumpama pa je moguće izvesti i slične podjele. Očita je razlika u svojstvima fluida koji tlače, a u ovom je slučaju bitno da su plinovi i pare kompresibilni, tj.

uslijed povećanja tlaka znatno im se mijenja specifični volumen. Brodski kompresori su najčešće stapni, a rjeđe se primjenjuju vijčani i turbokompresori. U primjeni je veći broj konstrukcija, no s obzirom na učestalost primjene i širinu gradiva, ovdje se neće spominjati.

Pogone se uglavnom trofaznim asinkronim elektromotorima, no kompresor za nuždu može se pogoniti dizelskim motorom, kojega se upućuje ručno, ili čak, kod manjih pogona, ručno. Hlade se zrakom, a neke veće konstrukcije i vodom. Podmazivanje je najčešće prisilno, privješeno zupčastom pumpom ulja.

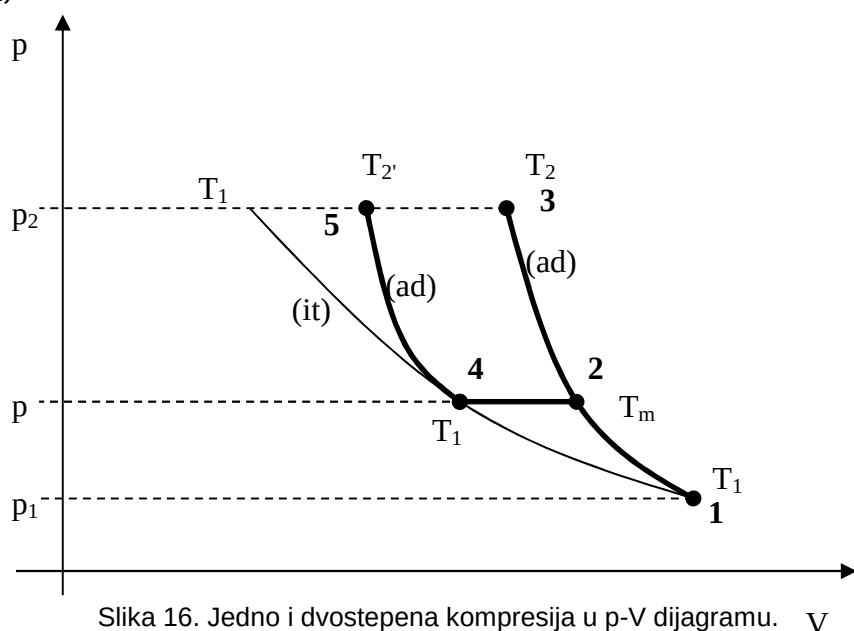
Povećanje tlaka koja se mogu postići kompresorima kreću se od svega nekoliko bara, što je razina puhalo, do 1000 bara (superkompresori). Pri tome treba imati na umu da se povećanjem tlaka, povisi i temperatura prema jednadžbi stanja idealnog plina

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T,$$

gdje je p [Pa] tlak, V [m³] volumen, m [kg] masa, R [J/kgK] plinska konstanta i T [K] apsolutna temperatura. Promjenjive veličine u gornjem izrazu su p , V i T pa promjena jedne dovodi do promjene ostalih dvaju¹³².

Ova je činjenica bitna kako bi se razumjela konstrukcijska potreba da kompresori startnog zraka (povećanje tlaka zraka od oko 3 MPa) budu dvo ili trostepeni s međuhlađenjem do početne temperature. Zašto ne mogu biti jednostepeni? Promotrit će se dva procesa prikazana na p-V dijagramu na slici 16.

Jedan je proces jednostepena adijabatska kompresija na kraju koje je postignuto stanje zraka p_2 i T_2 . Drugi se proces sastoji od adijabatske kompresije do tlaka p_m ¹³³ i temperature T_m , izobarnog hlađenja do početne temperature T_1 (točka leži na izotermi) te opet adijabatske kompresije do tlaka p_2 i temperature T_2' . Iz dijagrama je jasno kako vrijedi $T_2' < T_2$ (nalazi se bliže izotermi T_1).



Slika 16. Jedno i dvostepena kompresija u p-V dijagramu.

Jednostepenom se kompresijom postižu znatno više temperature plina, nego što su temperature kod dvo ili trostepene kompresije s međuhlađenjem na početnu temperaturu. Visoke temperature plina dovele bi do izgaranja ulja za podmazivanje kompresora. Iako je

¹³² O promjenama stanja idealnog plina (izoterma, izobara, izohora, adijabata, politropa) pogledajte u osnovnoj literaturi.

¹³³ Ako se zna da u svakom stupnju treba biti jednako povećanje tlaka lako je izvesti uvjet $p_m = \sqrt{p_1 p_2}$. Za $p_1=0,1$ MPa i $p_2=3$ MPa izlazi $p_m=0,55$ MPa

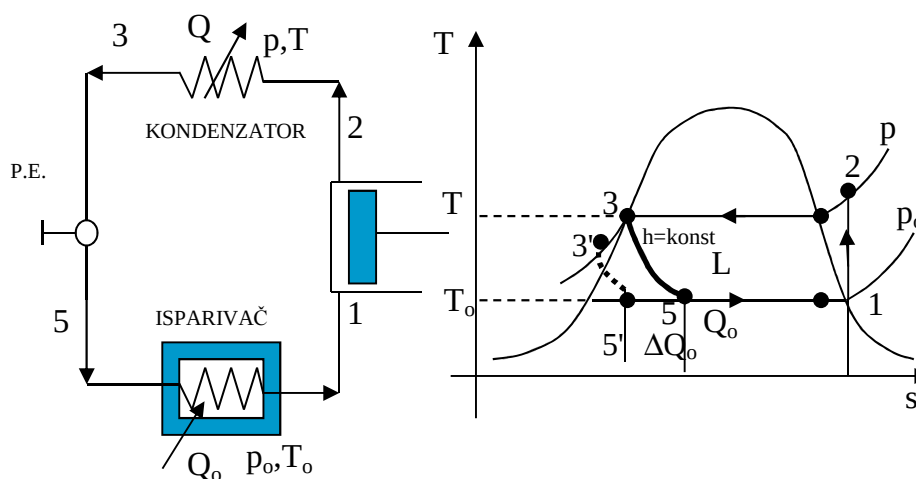
kod dvostepene kompresije manji uloženi rad kompresora (razlika rada je na dijagramu predočena površinom unutar krivulje 2-4-5-3), ne izvodi se ukoliko nije potrebno¹³⁴.

Kompresori se na brodu koriste u cjevovodima komprimiranog zraka, rashladnim uređajima, cjevovodima za proizvodnju dušika (inertnog plina) iz zraka na tankerima za prijevoz kemikalija te pri iskrcavanju tereta na LPG brodovima.

1.2.5. Primjena kompresora u rashladnim uređajima

Svrha je rashladne tehnike sniziti temperaturu nekom fluidu ili tijelu ispod temperature okoline i održati tu temperaturu. To se ne može desiti u prirodi, samo od sebe jer toplina uvijek struji s više k nižoj temperaturi. Očito je da se mora uključiti neki tehnološki proces..

Tijekom povijesnog razvoja koristilo se nekoliko izvedbi – procesa. Današnji uređaji imaju osnovne elemente kao na shemi, a proces se odvija prema ciklusu u T-s dijagramu prikazanim na slici 17.



Slika 17. Shema sustava i teoretski proces u T-s dijagramu [10]

Kompresor (na shemi prikazan jednim cilindrom) siše pare stanja 1 (p_o , T_o) i tlači ih na tlak p do stanja 2. Pregrijana para stanja 2 ulazi u kondenzator, gdje se kod brodskih izvedbi hladi morskom vodom, pri konstantnom tlaku p , a zatim ukapljuje i pri konstantnoj temperaturi T do stanja 3. Kapljevina stanja 3 ulazi u regulacijski ventil, ili općenito prigušni element (kod malih kućanskih uređaja radi se o jednostavnoj kapilari), gdje dolazi do prigušivanja po krivulji konstantne entalpije ($h=\text{konst}$) do stanja 5. Kapljevini naglo pada tlak na p_o i temperatura na T_o , a mijenja se i agregatno stanje – opet je mokra para. Para stanja 5 ulazi u isparivač, izmjenjivač topline smješten u prostoru koji se želi rashladiti, gdje preuzimajući toplinu isparava do stanja 1.

Količina topline koju para preuzme isparavajući u cijevima smještenim u rashladnom prostoru pri isparivanju zove se **rashladni učin** i **može biti nekoliko puta veća od rada utrošenog za pogon kompresora**. Rashladni učin predstavlja površina ispod dužine 1-5¹³⁵. Omjer rashladnog učina i utrošenog rada naziva se **rashladni množilac**. Pokazuje efikasnost rashladnog procesa i dat je izrazom

¹³⁴ Iskustvena je granica $p_2/p_1=8-9$.

¹³⁵ Ista se može i povećati za neki ΔQ_o , ako se predimenzioniranjem kondenzatora ili primjenom pothlađivača kondenzata krivulja prigušivanja(3-5) pomakne udesno (3'-5').

$$\varepsilon = \frac{Q_o}{L}.$$

Lako je (ali ovdje nepotrebno) dokazati da rashladnom prostoru odvedena toplina i u kompresoru uloženi rad, ovise o temperaturama isparivanja T_o i kondenzacije T .

Smanjivanjem razlike među njima povećava se rashladni množilac. Njega se ne može u stvarnim uvjetima povećavati promjenom navedenih temperatura jer ovise o vanjskim uvjetima. Koji su to? Da bi radni fluid u isparivaču preuzeo toplinu Q_o i uslijed toga ispario treba biti temperature niže od temperature fluida u rashladnom prostoru (zraka u komori provijanta) jer prema prirodnim zakonima toplina struji s više na nižu temperaturu. Također, da bi u kondenzatoru predao toplinu rashladnom fluidu (morskoj vodi), i uslijed toga se ukapljio, treba biti temperature više od temperature rashladne morske vode. **Temperature T_o i T ne mogu se približiti kako bi se povećao rashladni množilac (efikasnost rashladnog procesa) jer su određene vanjskim uvjetima.**

Radni fluid u uređaju prvotno je bio zrak, da bi kasnije bio zamijenjen umjetno proizvedenim kemijskim spojevima, derivatima metana i etana - 'freonima' (oznaka R-broj). Najčešći je u primjeni bio R-12 (monoklordiflormetan), no 80-tih se godina pokazala njegova štetnost po okoliš. Isti naime oštećuje gornje slojeve atmosfere, točnije razara molekule ozona, uslijed čega nastaju 'ozonske rupe'. Pored toga riječ je i o stakleničkom plinu. Iako je još u primjeni, postepeno se zamjenjuje s R-22¹³⁶, dvostepenim (indirektnim) uređajima s NH_3 i CO_2 te različitim azeotropnim smjesama¹³⁷.

Ovakvi se uređaji mogu nazivati i '**dizalice topline**'. Pojam je jasniji kada se čovjek prisjeti vanjskih jedinica na fasadama zgrada, koje pred ljeto niču kao gljive poslije kiše. Takvi se uređaji zimi mogu koristiti kao grijalice. Dakle, isti se uređaj ljeti koristi za hlađenje prostora, a zimi za grijanje. Prema shemi i dijagramu na slici 18 rashladnom je prostoru oduzeta toplina Q_o pri temperaturi T_o . U kondenzatoru se rashladnoj morskoj vodi preda toplina Q pri temperaturi T . Pri tome vrijedi $L = Q - Q_o$ (gdje je L rad uložen u kompresor) i $T > T_o$.

Uređaji koji se koriste za grijanje nazivaju se dizalicama topline jer oduzimaju toplinu niske temperature (nekvalitetnu, neupotrebljivu pri toj temperaturi) i predaju toplinu pri višoj temperaturi (pri kojoj se može koristiti za grijanje, npr. kućanstava). Kod malih, kućnih klima uređaja, toplina se oduzima vanjskom zraku pri okolnoj temperaturi, a predaje kućanstvu pri povišenoj temperaturi. Iste klima jedinice ljeti oduzimaju toplinu kućanstvu, a predaju je okolnom zraku. Dakle, uređaji su samo prekrenuti, što se izvodi relativno jednostavno, primjenom upravljačkog ventila (razvodnika). Isti će biti objašnjen u poglavlju o hidrauličkim cjevovodima.

Zašto kod nekih uređaja proizvođač navodi vanjsku temperaturu zraka kao uvjet primjene za grijanje prostorije¹³⁸? Specificira se donja granica (npr. -5°C) do koje se može grijati, no kada se vanjska temperatura još spusti, grijanje je onemogućeno. Objašnjenje je povezano s izmjenom topline tj. prirodnim zakonom da toplina uvijek struji s više k nižoj temperaturi. U cijevima isparivača (jedinice koja na sebe preuzima toplinu) temperatura radnog fluida mora biti niža od temperature okolnog fluida. Kada je temperatura vanjskog zraka niska to možda neće biti ispunjeno. Radni medij ne preuzima toplinu ili je ne preuzima dovoljno, pa uređaj ne može niti zagrijavati.

¹³⁶ R-12 je CFC spoj (kloro-fluoro-ugljik), R-22 je HCFC spoj (hidro-kloro-fuoro-ugljik) pa ima manje klora i manje je štetan po ozonski omotač, a novi radni fluidi su HFC spojevi (nema klora).

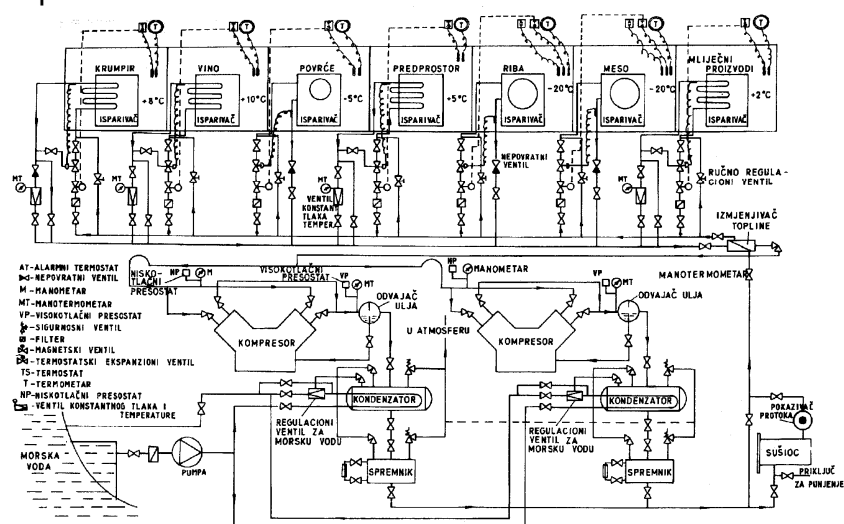
¹³⁷ Ovdje nije moguće u potpunosti objasniti proces sa smjesama. Ukratko, pri isparivanju ili kondenzaciji smjese se ne ponašaju kao čiste (jednostavne) tvari, već se sastav plinovite faze i tekućine razlikuje. To međutim nije slučaj s azeotropnim smjesama jer je riječ o smjesama s takvim udjelima sudionika da se ponašaju kao i čista tvar – sastav je plinovite faze i tekućine uvijek isti. Na tržištu ih je više, a udjeli sudionika su poslovne tajne.

¹³⁸ Za svaki uređaj takvo ograničenje postoji, ali se u ovisnosti o predviđenim vanjskim uvjetima možda ne treba navoditi.

Jedna od primjena rashladne tehnike na brodu jest u klima jedinicama, tj. za hlađenje zraka, no ipak je daleko važnija primjena u sustavima za očuvanje živežnih namirnica – tzv. provijant. Ima i drugih primjena. Neovisno o primjeni, brodski su uređaji gotovo isključivo parno-kompresijski¹³⁹ koji teoretski rade prema shemi prikazanoj na slici 19. Stvarni brodski rashladni uređaj provijanta (hrane za posadu) izvodi se kao na slici 18.

Lako su uočljiva dva kompresora i kondenzatora, što je i najčešća izvedba. Jedan kompresor radi, a drugi je rezervni. Časnik palube ne treba biti upoznat sa svim detaljima izvedbe, no može lako uočiti da se hladi veći broj različitih rashladnih prostora. Različiti su zbog vrste hrane koja se u njima čuva, temperature pri kojoj se čuva, izvedbe isparivača, potrebe posade za otvaranjem prostora i dr. To je u osnovi najveća razlika u odnosu na običan kućanski rashladni uređaj., ali se zbog nje sustav automatskog upravljanja mora bitno izmijeniti.

U objašnjenju načina regulacije treba poći od osnovnog postulata rashladne tehnike: **nikad ne hladiti više nego što je potrebno** (željeno). Kod malih kućanskih rashladnih uređaja to znači da se po postignutoj temperaturi zraka kompresor isključuje¹⁴⁰. Kod uređaja provijanta to se ne može izvesti jer se radom jednog kompresora hladi veći broj prostora, u kojima će se željena temperatura (na termostatima podešena temperatura) rijetko postići istovremeno. Prekidanje hlađenja u pojedinom rashladnom prostoru izvodi se elektromagnetskim ventilima na koje djeluju termostati, a tek kada se svi prostori ohlade na željene temperature, zaustavlja se i kompresor.



Slika 18. Rashladni uređaj provijanta. Kompresor tlači radni fluid prema morem hlađenom kondenzatoru iz kojega se preko regulacijskih ventila razvodi prema većem broju isparivača smještenih u rashladnim prostorima, a iz njih opet na usis kompresora [5]

Rad kompresora, ventilatora zraka u rashladnim komorama koje imaju prisilno strujanje, otvorenost elektromagnetskih ventila i uključenost grijača za otaplanje leda na isparivačkim cijevima svjetlosno se indiciraju na upravljačkoj ploči uređaja. Prema toj indikaciji, ali i drugim pokazateljima časnik stroja je u stanju procijeniti ispravnost rada cijelog uređaja. Naime, kompresor je takvog kapaciteta da (teoretski) tijekom 24 sata treba raditi 18 sati. Ako se kompresor povremeno ne isključuje časnik odmah može posumnjati na kvar. Ista je stvar s rashladnim komorama. Ako se elektromagnetski ventili povremeno ne zatvaraju (prekidaju hlađenje jer je postignuta tražena temperatura), može se također sumnjati na kvar. Najčešći problem u radu parno-kompresijskih rashladnih uređaja jest djelomični gubitak radnog fluida. Neki spojevi cjevovoda moraju biti rastavljivi, a zbog vibracija može doći do popuštanja i

¹³⁹ Samo na manjim plovilima još se mogu naći apsorpcijski s primjenom plinskog kuhala.

¹⁴⁰ Isključuje se pogonski stroj – elektromotor i to vrši temperaturni prekidač (termostat).

curenja radnog fluida. Uređaj sa smanjenom količinom slabije hladi te se tražene temperature uopće ne mogu postići (pa kompresor kontinuirano radi) ili se postižu rjeđe.

Klimatizacijski sustav nadgrađa objašnjen je prije. U rashladnoj sekciji centralne jedinice nalazi se isparivač parno-kompresijskog rashladnog uređaja gotovo jednake izvedbe kao u slučaju sustava za čuvanje hrane.

Osim ovih dvaju primjena parno-kompresijski rashladni uređaji koriste se na brodovima ribolovcima, za hlađenje tereta u skladištima, za hlađenje (ukapljivanje) plinova (tereta na LNG i LPG brodovima) te za hlađenje CO₂ u niskotlačnim protupožarnim cjevovodima. Ima nekih tehnoloških razlika ipak se kod većine radi o parno-kompresijskim rashladnim uređajima. Jedino se sustav hlađenja skladišta tereta izvodi kao indirektni: osnovnim parno-kompresijskim uređajem hladi se rasolina (otopina vode i soli), a rasolinom zrak u skladištima. Ovakvi su sustavi toplinski lošiji od direktnih jer je potrebna veća temperaturna razlika (rasolina mora biti niže temperature od zraka, a radni fluid parno-kompresijskog uređaja niže temperature od rasoline). Ako je za direktni rashladni uređaj temperaturna razlika

$$\Delta T_{dir} = T_{zrak,sklad} - T_{rad,fl} ,$$

a kod indirektnog ukupna temperaturna razlika iznosi

$$\Delta T_{indir} = (T_{zrak,sklad} - T_{rasol}) + (T_{rasol} - T_{rad,fl}) = T_{zrak,sklad} - T_{rad,fl} ,$$

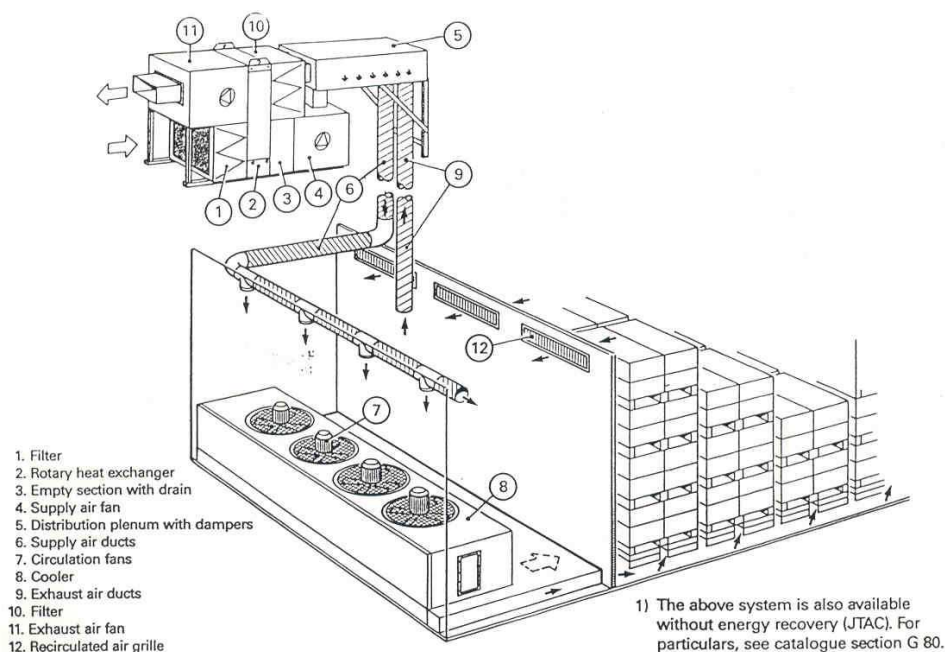
može se pisati $\Delta T_{indir} > \Delta T_{dir}$.

Iako toplinski lošiji, ovi se uređaji koriste zbog lakšeg praćenja u radu, tj. održavanja. Otkrivanje mjesta propuštanja u parno-kompresijskim uređajima je dugotrajan postupak. Primjenom indirektnog hlađenja, parno-kompresijski uređaj je izveden kompaktno, sa što manje cijevi i rastavljivih spojeva, a propuštanja u cjevovodu rasoline je ne samo lako otkriti (stvaraju se kristali soli) već i lako nadomjestiti. U sabirni tank dodaje se voda i sol dok se ne postigne potrebna koncentracija otopine.

Zašto se u takvim cjevovodima koristi rasolina, a ne čista voda? Indirektno hlađenje s vodom u sekundarnom dijelu, može se primjenjivati u klimatizaciji (iako na brodovima rijetko) jer su potrebne temperature zraka dovoljno visoke te ne postoji opasnost zaleđivanja vode u cijevima. Potrebne temperature zraka u skladištima ipak su niže te bi se čista voda mogla zalediti. Dodavanjem soli u vodu postiže se snižavanje temperature skrućivanja, no samo do određene koncentracije pri kojoj se postiže najniža temperatura skrućivanja. Za vodene otopine kuhinjske soli i kalcij-klorida najniže temperature skrućivanja i dopuštene temperature su:

- 23 %-tna vodena otopina kuhinjske soli (NaCl) ima najnižu temperaturu skrućivanja koja iznosi -21°C, a dopuštena je temperatura -16°C;
- 30 %-tna vodena otopina kalcijevog klorida (CaCl₂) ima najnižu temperaturu skrućivanja koja iznosi -55°C, a dopuštena je -45°C.

Sustav prikazan na slici 19 ima jednostavan, direktan rashladni uređaj koji hladi zrak u rashladnoj sekciji centralne jedinice dok je nešto složeniji cjevovod distribucije zraka unutar skladišta te u dijelu za pripremu zraka.



Slika 19. Cjevovod klimatizacije (hlađenja) skladišta tereta.

Centralna jedinica, koja se sastoji od dvaju filtarskih sekcija (1, 10), dva ventilatora (tlačni – 4, isisni – 11) i regeneratora ostvaruje potreban dotok svježeg zraka i iskorištava energiju (regenerator). Dovod svježeg zraka potreban je za održavanje sastava zraka u skladištu. Prehrambeni proizvodi, mada su ubrani zeleni i čuvaju se pothlađeni ipak dišu, uslijed čega dolazi do ispuštanja štetnih plinova. Koncentracije istih se održavaju u dopuštenim granicama ventilacijom. Distribucijskim se cjevovodom dovodi zrak do usisa ventilatora skladišta, koji ga tlače na rashladne cijevi te po dnu skladišta. Preuzimanjem topline zrak se u skladištu grije, diže i kroz otvore (12) vraća u pretkomoru. Dio isisava ventilator (11), a dio preostalog zraka te dovedeni svježi vraća se na rashladnik.

Ovakva je izvedba toplinski loša jer se hladi zrak u cijelom skladištu. Izolacija skladišta mora biti kvalitetno izvedena, zauzima dosta mjesta i smanjuje volumen skladišta.

Modernija rješenja pretpostavljaju kontejnerski prijevoz tereta. Tada se hladni zrak distribucijskim cijevima dovodi u svaki pojedini kontejner. Povrat zraka može biti izveden na isti način, cijevima na rashladnik, ili u skladište. O tome će ovisiti i izolacija skladišta.

Budući da se veliki broj različitih tereta prevozi kontejnerima te da nije potreno sve hladiti, postoje rješenja i za takav prijevoz. Na kontejner u kojem se prevozi teret koji je potrebno hladiti, ugrađuje se mali rashladni uređaj (tzv. clip-on jer je skidljiv). Nakon ukrcaja takvog kontejnera isti se treba uključiti u brodsku elektroenergetsku mrežu čime započinje hlađenje. Dužnost je brodaru održavati zahtjevanu temperaturu te se u takvim kontejnerima kontinuirano mjeri i na kružni dijagram ispisuje temperatura zraka. Ista služi kao dokaz u slučaju kvara tereta.

2. UREĐAJI ZA SPREČAVANJE ZAGAĐIVANJA OKOLIŠA I UŠTEDU ENERGIJE

Prilozi IV i V konvencije MARPOL reguliraju sprječavanje zagađivanja morskog okoliša otpadnim tekućinama iz sanitarnih prostora te krutim otpadom, a prilog I sprječavanje zagađivanja uljima.

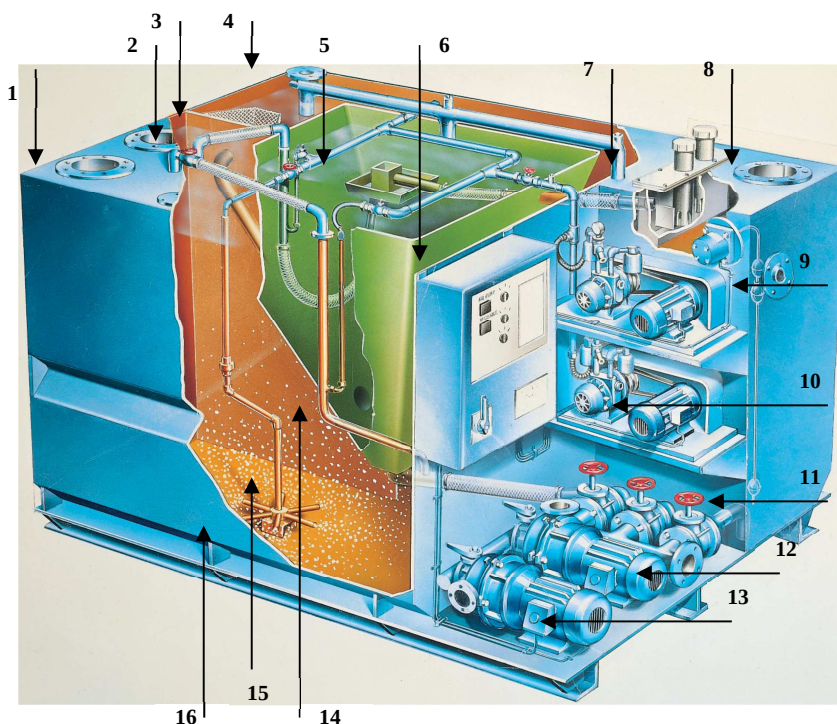
2.1. Obrada fekalnih voda

Otpadne vode mogu biti **sive i crne** (fekalne). Mogu se sakupljati u sabirnom tanku volumena prema sljedećem izrazu

$$V = f \cdot n \cdot q \cdot t,$$

ili prerađivati u uređaju za obradu fekalija. U navedenom izrazu f je koeficijent i odabire se u rasponu od 0,1 do 1 (najčešće 1), n je broj osoba na brodu (posade i putnika), q je količina otpadnih voda koju generira jedna osoba tijekom 24 h i iznosi 50 l ako se sakupljaju samo fekalne vode ili 250-300 l ako se sakupljaju i sive vode, a t vrijeme zadržavanja u luci (npr. 2 – 10 dana).

Uređaji za obradu fekalnih voda mogu biti kemijski i biološki, kada koriste aerobne bakterije (bakterije čiji se život odvija uz prisustvo kisika). Biološki uređaj prikazan je na slici 20. Crne fekalne vode ulaze kroz otvor (1) u prostor sakupljanja i obrade aerobnim bakterijama (15). Zrak se dobavlja radom kompresora (10) kroz distribucijski cjevovod (16). Izlazi u obliku sitnih mjehura koji miješaju fekalije i omogućuju život aerobnih bakterija. Iz obradnog prostora vrši se prelijevanje u tank taloženja ili sedimentacije (14). Gušća masa sakuplja se na skošenom dnu, a plutajuće komponente (aktivirani talog) se kroz otvor (5) i prozirnu cijev (2) vraćaju u tank (15).



Slika 20. Uređaj za preradu fekalija uz pomoć aerobnih bakterija: (1) dovod crne (fekalne) vode, (2) prozirna cijev za kontrolu povrata aktiviranog taloga, (3) vizualna kontrola, (4) odušnik, (5) otvor za povrat plutajućeg taloga, (6) upravljačka kutija, (7) klorinator, (8) dovod sive otpadne vode, (9) preliv u nuždi, (10) kompresori zraka, (11) prekidači razine, (12) ventilska stanica i spoj pumpi, (13) pumpe, (14) taložni tank, (15) tank obrade aerobnim bakterijama, (16) distribucija zraka [10]

Pročišćena voda se iz prostora (5) vodi u prostor dodavanja dezinfekcijskog sredstva (prostor kloriranja) te se zajedno sa sivim vodama koje dolaze kroz otvor (8) izbacuje automatskim radom pumpe (6). Radom pumpe upravlja prekidač razine (11), koji na najnižem položaju isključuje pumpu, na srednjem je uključuje, a ako se postigne najviši položaj aktivira se alarm visoke razine. I ostali se prostori mogu prazniti radom pumpe (prilikom remonta ili zbog predaje na kopno) pomoću ventilske stanice (12). Svi prostori su spojeni na zajednički odušnik (4). Suspenzija krutog taloga iz tanka (14) može se radom pumpe voditi i u spaljivač smeća.

2.2. Prerada krutog otpada

I **kruti se otpad** može sakupljati u, za to, predviđen prostor. Volumen takvog prostora određuje se prema izrazu

$$V = n \cdot q \cdot t,$$

gdje je q uobičajena vrijednost količine smeća za jednu osobu i iznosi 5 dm^3 . Uobičajeno je rješenje da se otpad (domaćinski, otpad tereta, otpad pri održavanju) sakuplja nekoliko dana te da se na otvorenom moru spaljuje u spaljivaču smeća. Spaljivati se smije gotovo sve, osim posuda pod tlakom te stakla ako temperature izgaranja mogu doseći 1000°C . Osim krutog otpada spaljuje se i talog (ulja) iz tanka taloga te kruti talog iz uređaja za obradu fekalija, a ako je energetska vrijednost otpada niska, može se u ložište dovoditi teška nafta. Potpaljivanje je slično potpaljivanju generatora pare (propuhivanje, inicijalni plamen pomoću lakog dizelskog goriva) pa se ovdje neće opisivati.

Na velikim putničkim brodovima količina krutog otpada je znatna (prema broju osoba na brodu) pa se javlja očit problem u sakupljanju istog. Nadalje, takav otpad može biti i relativno velikih dimenzija (npr. veće goveđe kosti). Sakupljanje se izvodi cjevovodom velikog promjera (u koje se smeće baca), a u cijevi, neposredno ispred tanka za skupljanje, ugrađuju se automatski, mehanički pogonjeni, sjekači.

Tijekom plovidbe otvorenim morem smeće se spaljuje u spaljivačima (incineratorima). Osim krutog otpada u njima se spaljuje u talog (engl. sludge) sakupljen u tanku taloga koji se obično nalazi u dvodnu strojarnice. Postupak potpaljivanja jest kao kod loženog generatora pare: najprije se izvodi propuhivanje, zatim slijedi stvaranje inicijalnog plamena pomoću posebnog plamenika i dizelskog goriva, nakon čega se počinje ubacivati smeće. Ukoliko je energetska vrijednost smeća niska tijekom postupka se u ložište ubrizgava dizelsko gorivo kako bi temperatura uzgaranja bila između 800 i 900°C . Po završetku spaljivanja ložište se ponovo provjetrava.

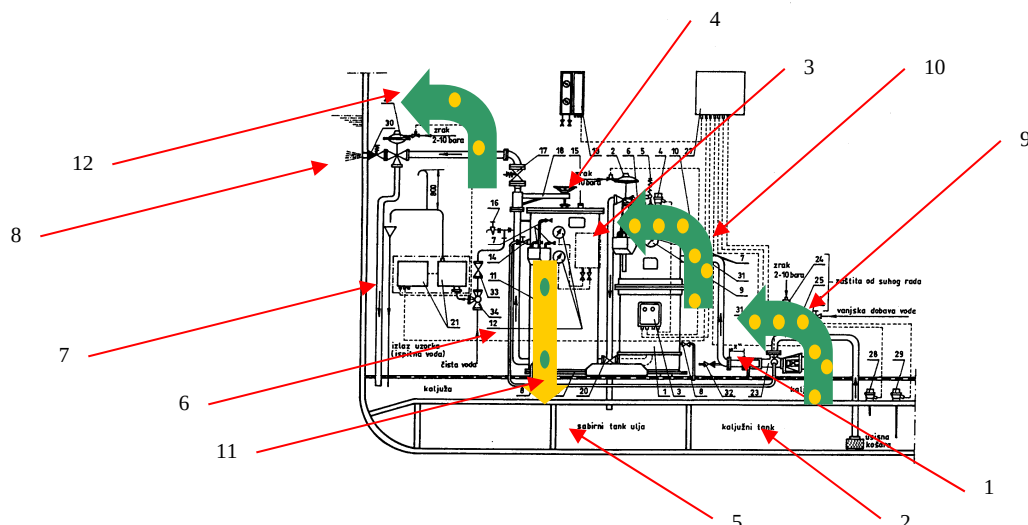
2.3. Kaljuža

Kaljuža, namjerno ili nenamjerno ispuštena tekućina na dnu strojarnice, u tunelskoj kobilici, kondenzat ili ostatak tereta sakupljen na dnu skladišta, tekućina s dna pikova i drugih brodskih prostora sakuplja se u sabirnom tanku kaljuže, a zatim prije ispuštanja pročišćava. Pročišćena voda ispušta se na otvorenom moru pri plovidbenoj brzini ne manjoj od 7 čv uz uvjet da ima manje od 15 ppm^{141} ulja. Svi uređaji za čišćenje kaljužnih voda koriste različitu gustoću vode i ulja i mehaničkih nečistoća. Uređaj proizvođača Hamworthy izveden je poput tanka, ispunjen okomito postavljenih pločama korugiranog (valovitog) lima. U početku rada

¹⁴¹ Ppm – engl. part per million, milijunti dio.

ispuni se vodom, a zatim se dovodi kaljužna voda te se ulje kao lakše izdiže na površinu. Kada ga se sakupi dovoljno otvara se elektromagnetski ventil kojim se ispušta u tank taloga.

Druga, česta izvedba, jest proizvođača Turbulo. Prikazan je na slici 21.



Slika 21. Kaljužni separator proizvođača 'Turbulo'

Dobavna pumpa kaljužnog separatora (1) siše zauljenu vodu (9) iz sabirnog tanka kaljuže (2) i tlači (10) u prvi stupanj uređaja (3). U toj se posudi nalaze slogovi 'tanjura' oko kojih zauljena tekućina počinje kružiti. Kruženje se postiže tangencijalnim spojem cijevi s posudom, a osim kruženjem, razdvajanje vode i ulja postiže se zagrijavanjem do oko 80°C. Pri vrhu posude sakuplja se ulje i povremeno pušta (11) otvaranjem ventila upravljano prekidačem razine (4) u tank taloga (5). Voda s dna posude ide u drugi, filtarski stupanj (6), a zatim (12) preko osjetnika zauljenosti van broda (7). Osjetnik mjeri električnu vodljivost vode na izlazu iz drugog stupnja¹⁴² pa ako je voda zadovoljavajuće čista troputni ventil (8) je u položaju za ispuštanje, a ako nije vraća vodu nazad u kaljužu ili kaljužni tank. Zakonska je granica 15 ppm, ali se često granica prebacivanja ventila postavlja na 12 ppm (na 15 ppm se oglašava alarm).

2.4. Proizvodnja slatke vode

Slatka voda koristi se u rashladnom sustavu, kao kotlovska voda te za potrebe posade i putnika (piće, pranje, kuhanje). U prva se dva slučaja radi o destiliranoj vodi jer je izvorska voda ili kišnica tvrda. Za ljudski je organizam destilirana voda neodgovarajuća, no ista se, relativno lako može preraditi u pitku vodu prihvatljive kvalitete. S druge strane, pitka voda u mnogim je područjima svijeta upitne kvalitete pa se upotrebom destilirane i na odgovarajući način pripremljene vode (mineralizirana, sterilizirana) izbjegavaju mnoge crijevne bolesti i trovanja. Pri određivanju potrebnog kapaciteta uređaja za proizvodnju slatke vode uzima se da spomenuta dva sustava gube zbog propuštanja oko 1 %, a za jednu se osobu uzima oko 120 litara dnevno¹⁴³.

Čovjek je u smišljanju rješenja kako iz morske ili bočate vode proizvesti destiliranu, bio prilično inventivan. Neka od predlaganih rješenja su u potpunosti odbačena jer ne postižu

¹⁴² Električna vodljivost vode i ulja se znatno razlikuje te će veće prisustvo ulja u vodi dovesti do mjerljive promjene vodljivosti.

¹⁴³ Na luksuznim putničkim brodovima često se troši i 200 – 300 litara vode po osobi na dan.

nikakvu mjerljivu promjenu u sastavu vode, no postoji i nekoliko prihvaćenih. Morska voda u osnovi je otopina većeg broja soli, ali uglavnom kuhinjske soli (NaCl). Metode razdvajanja molekula vode (H_2O) i soli dijele se na volumenske, površinske i individualne. Kod volumenskih se metoda, djeluje na cijeli 'uzorak' vode, kod površinskih se razdvajanje vode i soli odvija na nekoj površini, a kod individualnih se djeluje na ione soli. Na današnjim se brodovima koriste rješenja iz svih triju grupa.

Kod individualnih metoda primjenjuju se **kemijski reagensi** koji se vezuju s molekulama soli otopljenima u vodi, a nastale čestice talože se kao mulj. Koriste se kao sredstva za preživljavanje na čamcima i splavima za spašavanje¹⁴⁴. Na manjim brodovima koji plove obalnim morima na kojima se za grijanje koriste mali toplovodni kotlovi ili kotlovi koji proizvode paru tlaka do 1 bar, izvorska se voda tretira kemijskim aditivima kako bi bila pogodna za takve uređaje.

Površinska metoda koja se na brodovima koristi je **reverzibilna (obrnuta) osmoza**. Osmoza je prirodan proces kod kojega se kroz neku propusnu opnu izjednačavaju sastavi dvaju tekućina, dok se za obrnutu osmozu ulaže rad kako bi se razlika sastava tekućina s dviju strana opne povećala. Za rad ovakvog uređaja potrebne su visokotlačne pumpe, odnosno električna energija (jer je najčešći pogon elektromotorima). Ovakvi su uređaji do nedavno primjenjivani samo na manjim luksuznim jahtama, ali se danas sve češće sreću i na većim brodovima, naročito na onima s elektromotornom propulzijom.

Najčešći su uređaji koji koriste metodu **destilacije**, a to slijedi iz prirode porivnih strojeva. Kako je prije navedeno, radi se o toplinskim strojevima. Svi toplinski strojevi moraju imati rashladni spremnik te je nusproizvod prerade energije otpadna toplina. U protivnom bio bi to perpetuum mobile druge vrste. Takva pretvorba energije u mehanički rad rezultira, dakle, otpadnom toplinom, toplinom koja se može koristiti za destilaciju.

Postupak destilacije sastoji se od zagrijavanja otopine, čiji se jedan, lakše hlapljiv sastojak želi odvojiti i naknadne kondenzacije hlapljivije komponente. U ovom se konkretnom slučaju zagrijava morska voda (otopina H_2O i soli), voda isparava, a zatim se pare kondenziraju. Patentiran je veći broj destilacijskih uređaja, no najčešći je niskotlačni ili vakuumski.

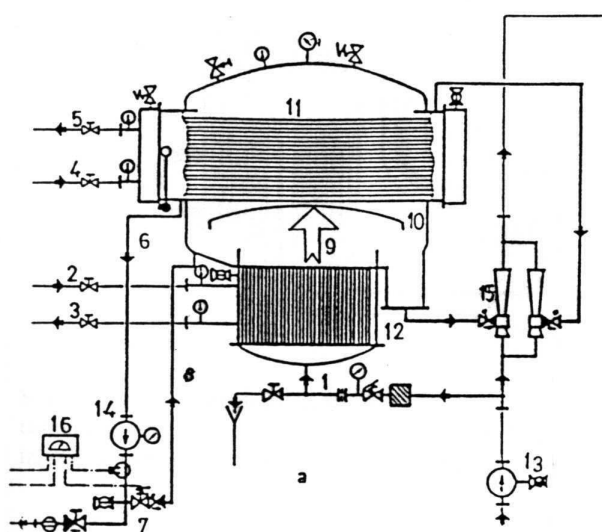
Najčešći je iz jednostavnog razloga. Primjenjuje se redovito kod motorne propulzije čija je učestalost na brodovima mnogo puta navedena. Kod modernih motora (sporookretni dizelski) za ovu svrhu iskoristiva otpadna toplina sadržana je u visoko temperaturnoj rashladnoj vodi temperature oko 80°C (na izlazu iz motora).

Ako se zna da temperatura isparivanja slatke vode pri atmosferskom tlaku iznosi 100°C, da je zbog otopljenih soli napetost površine morske vode veća zbog čega je nešto veća temperatura isparivanja te da kod svake izmjene topline mora postojati mala temperaturna razlika između fluida koji se zagrijava i ogrjevnog fluida¹⁴⁵, jasno je da se proces mora voditi pri sniženom tlaku. Takav vakuumski jedno stupanjski generator slatke vode prikazan je na slici 22.

Morska voda ulazi u donjem dijelu posude (1) i struji kroz okomito postavljene cijevi tjerana dobavnom pumpom (6), koja osim toga daje i pogonski fluid ejektorima. Oko cijevi cirkulira ogrjevni fluid, visoko temperaturna slatka rashladna voda glavnog motora. Obično između dovodne (2) i odvodne cijevi (3) ogrjevne vode postoji regulacijski ventil koji se podešava intenzitet zagrijavanja, a time i isparivanja.

¹⁴⁴ U posudu se zagrabi morska voda, doda reagens te je rezultat reakcije svojevrsna bočata voda. Dovoljno dobra za takav slučaj nužde.

¹⁴⁵ Samo za izmjenjivač topline koji ima beskonačno veliku površinu te bi se temperature izjednačile.



Slika 22. Jednostepeni vakuumski uređaj s cijevnim izmjenjivačkim površinama i uronjenim grijačem [9]

Kada se zatvori odzračni ventil smješten na vrhu posude ejektor (na slici onaj desni) počinje stvarati potlak u posudi. Budući da isparivanje još nije započelo, more se prelijeva u prostor (12) iz kojeg ga siše ejektor rasoline (15). Po postizanju dovoljnog potlaka (npr. 50 – 70 %-tni vakuum) otvaraju se zaporni ventili na cijevima ogrjevnog fluida. Zbog sniženja apsolutnog tlaka u posudi i porasta temperature morske vode u cijevima u nekom će trenutku započeti isparivanje. Para (9) se diže prema odjeljivaču kapljica (10), a ostatak (rasolinu) odvodi ejektor.

Kapljice morske vode nastale rasprskavanjem mjehura pare i molekule vode (H_2O) udaraju u odjeljivač, pri čemu se kapljice hvataju na stjenku, a molekule ogibaju oko odjeljivača¹⁴⁶. Nakupljene kapljice slijevaju se dolje, a molekule vode dižu se u prostor kondenzatora (11). Kondenzator se hladi morskom vodom kroz dovodnu (4) i odvodnu cijev (5). Para se orosi na cijevima i slijeva u tavu. Kada se sakupi dovoljno kondenzata (vidljivo na bočnom nivokaznom staklu) starta se pumpa destilata (14) koja siše s dna kondenzatora – tave (6).

Kvaliteta proizvedenog destilata provjerava se na izlazu salinometrom (16) koji, u biti, mjeri električnu vodljivost¹⁴⁷. Ukoliko je izmjerena slanost veća od podešene granice (često je to 2 mg soli po jednoj litri vode) salinometar otvara elektromagnetski ventil (7) i vraća destilat kroz spoj (8) u posudu¹⁴⁸. Ako slanost zadovoljava destilat se sprema u skladišne tankove slatke vode. Iz njih se po potrebi nadopunjavaju sustavi napojne vode generatora pare i rashladne vode motora, a dio se, nakon steriliziranja i mineraliziranja sprema u tankove pitke vode.

Ovakvih uređaja ima na teretnim brodovima, kada se izvode kao jedno ili dvostepeni, a kada su potrebni veliki kapaciteti (veliki putnički brodovi) izvode se sa do šest stupnjeva¹⁴⁹. Takvi, šesterostepeni uređaji mogu proizvoditi i do 800 m³/dan.

¹⁴⁶ Ovaj odjeljivač koristi činjenicu da kapljice vode imaju veću masu od molekula te neće uspjeti zaobići prepreku. Ima i odjeljivača koji hvataju kapljice zbog njihovih dimenzija, a izvode se kao višeslojna žičana mreža.

¹⁴⁷ Čista destilirana voda ne provodi električnu struju, ali ovisno o preostalom udjelu soli mijenja se vodljivost.

¹⁴⁸ Kod nekih manjih uređaja ispušta se u kaljužu.

¹⁴⁹ Vrlo slični su adijabatski uređaji, koji se masovno koriste u zemljama sjeverne Afrike i Bliskog istoka s po nekoliko desetaka stupnjeva.

3. SEPARATORI GORIVA I ULJA

Teško dizelsko gorivo (engl. heavy fuel oil – HFO) u sebi sadržava mehaničke nečistoće i vodu. Mehaničke su nečistoće komadići školjkaša, kamenja te pijeska. Voda u gorivu može biti prisutna od ukrcaja, a može biti rezultat puštanja nekih brodskih ogrjevnih cijevi. Gorivo (teško i lako) se najprije čisti u odgovarajućim taložnim tankovima, djelovanjem sile gravitacije. To bi bilo dovoljno efikasno uz uvjet vrlo plitkog tanka, kako bi nečistoće veće gustoće od goriva dovoljno brzo potonule na dno tanka, te uz uvjet mirne plovidbe. Niti je tako plitak tank velike površine moguće smjestiti u brodsku konstrukciju, niti se može ostvariti mirna plovidba te se efikasno čišćenje mora ostvariti u za to predviđenim uređajima – separatorima.

Umjesto slabe i spore sile gravitacije, u njima se koristi centrifugalna sila. Što jača sila to brže i efikasnije čišćenje. Ovi uređaji rade s nekoliko tisuća okretaja u minuti (oko 6000 okr/min). Izvode se poput zdjele (engl. bowl) u kojoj se nalaze preokrenuti tanjuri koji rotiraju velikom brzinom. Prljavi fluid dovodi se kroz središnju cijev u dno zdjele te zbog trenja počinje rotirati zajedno s tanjurima. Zbog veće gustoće na periferiji (obodu) zdjele sakupljaju se najprije mehaničke nečistoće, a zatim, prema unutrašnjosti, voda. Napajanje je kontinuirano pa novi fluid stalno istiskuje pročišćeni uz konus 'tanjura' prema vrhu 'zdjele' i kućišta, te prema dnevnom tanku. Odvojene nečistoće ispuštaju se povremeno, automatskim otvaranjem 'zdjele', u tank taloga.

Ovdje je ukratko opisan rad separatora teškog goriva, a međusobno slični separatori lakog dizelskog goriva i ulja za podmazivanje neznatno se razlikuju. Prije separacije fluid je potrebno zagrijati: teško gorivo na 90 do 100°C, lako gorivo i ulje za podmazivanje na 80 do 90°C. Uređaji su potencijalno opasni (zbog relativno velikog broja okretaja) pa se kao zaštita ugrađuju osjetnici vibracija. Također, povremeno (tri do šest mjeseci) ih je potrebno rastaviti i ručno očistiti. Brodski su sustavi tako izvedeni da uvijek postoji rezerva. Najčešće se ugrađuju po dva separatora za teško gorivo i jedan za lako, ali se jedan od separatora za teško gorivo može koristiti i za separaciju lakog. Separatora ulja za podmazivanje također ima više i to barem dva ili tri. Separatori se gotovo nikada ne isključuju.

Kapacitet separatora teškog goriva određuje se prema potrošnji glavnog stroja i svih potrošača teškog goriva koji trebaju raditi u plovidbi. Kapacitet separatora lakog dizelskog goriva kod novijih brodova nije toliko važan jer se isto koristi samo u nuždi, a dnevni tank sadržava rezervu za barem osam sati rada. Separator ulja za podmazivanje treba biti u stanju pročistiti ukupnu količinu ulja u sustavu dva do tri puta tijekom 24 sata.

4. POSUDE POD TLAKOM

U zbirci tehničkih pravila HRB-a nalazi se i dio 'Kotlovi, izmjenjivači topline i posude pod tlakom'. Očito, nešto je iz te grupe uređaja već obrađeno. U prvom je dijelu bilo riječi o generatorima pare – kotlovima. U poglavlju 1 pisano je o primjeni kompresora u rashladni uređajima. Međutim, izmjenjivači topline i hidrofori zbog česte primjene zaslužuju svoj prostor u ovom materijalu.

4.1. Izmjenjivač topline

Izmjena topline pojavljuje se u svim strojevima, uređajima i sustavima na brodu. Ponekad je ta izmjena poželjna, a ponekad smanjuje stupanj iskoristivosti, tj. stvara gubitke energije. Primjer poželjne (i potrebne) izmjene topline je hlađenje košuljica motora visokotemperaturnom slatkim rashladnom vodom ili zagrijavanje teške nafte parom, a neželjene, gubici zračenjem na okolinu (gotovo svih strojeva i uređaja u strojarnici).

Poznata su tri mehanizma izmjene topline:

- provođenje ili kondukcija, kroz kruta tijela¹⁵⁰;
- konvekcija, između krute stijenke i fluida;
- zračenjem, pri čemu je količina energije koju neko tijelo primi zračenjem zbroj apsorbirane, emitirane i reflektirane energije.

U ovom se poglavlju ne razmatra izmjena topline u strojevima i uređajima već u izmjenjivačima topline koji su dio cjevovoda, i koji se u ovisnosti o cilju izmjene topline nazivaju rashladnici, grijači, isparivači, kondenzatori. Izmjena topline vrši se strujanjem dvaju fluida, najčešće u suprotnom smjeru (protusmjerno), s nasuprotnih strana neke metalne stijenke. Stjenka može biti cijevnog oblika ili ploča. Pojavljuju se, dakle, izmjena topline provođenjem (kroz stjenku) te konvekcija između stijenke i fluida.

Zračenje (s vanjskog plašta izmjenjivača na okolinu) je u ovom slučaju samo gubitak, no s obzirom na brzinu procesa može se zanemariti. Uz tu pretpostavku može se tvrditi da je dovedena količina topline jednaka odvedenoj tj. da vrijedi $Q_{dov}=Q_{odv}$.

Količina topline koju na sebe primi teška nafta pri zagrijavanju parom (odvedena toplina) iznosi

$$Q_{odv} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_{izl} - t_{ul}),$$

gdje je $\dot{m}$ [kg/s] maseni protok nafte, c_p [J/kgK], a t [°C] ulazna i izlazna temperatura¹⁵¹.

Za isti slučaj, ali sa strane ogrjevnice pare jednačba glasi

$$Q_{dov} = D \cdot (h'' - h'),$$

pri čemu je D [kg/s] maseni protok pare, h'' [J/kg] entalpija pare na ulazu (teoretski je to entalpija suhozasićene pare) i h' [J/kg] entalpija pare na izlazu iz grijača (teoretski je to entalpija vrele vode jer se u grijaču potpuno kondenzira, ali ne pothladi).

¹⁵⁰ Provođenje između slojeva pri strujanju fluida najčešće se zanemaruje.

¹⁵¹ U ovom slučaju razlike temperatura može se uvrstiti i u stupnjevima kelvina.

Osim ovih dviju jednadžbi, za fluide, bitna je jednadžba kojom se izražava potrebna površina izmjenjivača, a može se napisati kao

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta t_{\log}.$$

Količina topline data ovim izrazom jednaka je prethodnim, a veličine u istoj znače: k [W/m²K] ukupni koeficijent prolaza topline¹⁵², A [m²] površina izmjenjivača te $\Delta t_{\log}$ [K] logaritamska razlika temperatura. Gornja je jednadžba važna jer se mogu uključiti i neki eksploatacijski uvjeti. U ovom slučaju, pri radu se sa strane nafte stvaraju koksne naslage, a sa strane pare kamenac. Oboje u biti predstavlja toplinski otpor jer povećava debljinu stjenke kroz koju toplina prolazi. Ukupni je koeficijent prolaza topline k zbog toga manji.

Takve ili slične situacije se javljaju kod svih izmjenjivača topline. Nakon nekog broja radnih sati potrebno je površine čistiti. Može se pokušati bez rastavljanja (dodavanjem kemikalija koje otapaju naslage), ali često je rastavljanje nužno. Kako cijeli pogon ne bi zbog toga bio zaustavljen, strojni se sustavi uvijek izvode s po dva izmjenjivača topline.

Osim toga, kako period između dva čišćenja ne bi bio prekratak, teoretska se površina izmjenjivača povećava. Takva, povećana izmjenjivačka površina, i sa zaprljanim će stjenkama zadovoljavati potrebe neko vrijeme. Časnici stroja procjenu potrebe čišćenja izmjenjivača topline donose na osnovi ulaznih i izlaznih temperatura fluida. Mora postojati određena temperaturna razlika ulaza i izlaza. Ako je manja od normalne ukazuje na zaprljanje. Moderne, kompjutorski nadzirane strojarnice, imaju i automatski nadzor zaprljanosti grijača te se časnik stroja na vrijeme upozorava o zaprljanju.

Većina izmjenjivača topline nalazi se u strojarnici, no časnik palube s nekima se ipak sreće relativno često: zagrijači tereta na tankerima za ulja i kemikalije, rashladnici ukapljenih plinova, isparivači i kondenzatori u klima uređajima, fontane za pitku vodu s rashladnicima itd.

Najčešći su cijevni izmjenjivači topline. Snop cijevi smješta se u cilindrični plašt. Cijevi mogu biti glatke, orebrene i s izdancima. Zadnje dvije izvedbe povećavaju površinu izmjene topline, ali otežavaju čišćenje. Drugo je rješenje s pločama. Tipičan je predstavnik takvih izmjenjivača centralni rashladnik slatke vode. Uvjet primjene istog je mala razlika tlakova između dvaju fluida¹⁵³. I ploče mogu biti korugirane (valovite).

Ako se izmjena topline provodi kontinuirano, neprekidnim strujanjem dvaju fluida sa suprotnih strana izmjenjivačke površine radi se o rekuperatoru. Kada se izmjena topline vrši naizmjenično govori se o regenerotoru¹⁵⁴. Primjer regeneratora je ljudski nos: kada čovjek zimi izdiše topli zrak, zagrijava kapilare u nosu, a one kod udisanja, zagrijavaju zrak prije ulaska u pluća.

Osim ulaznih i izlaznih cijevi za oba fluida te termometara na njima, na izmjenjivačima topline često se ugrađuju sigurnosni ventili¹⁵⁵, ventili za ispuštanje (kondenzata, morske vode), ventili za odzračivanje i druga armatura.

¹⁵² Ovisi o konvektivnim koeficijentima dvaju fluida α_1 i α_2 , debljini stjenke δ i konduktivnom koeficijentu λ .

¹⁵³ U protivnom dolazi do savijanja ploče i otežanog protoka fluida s te strane.

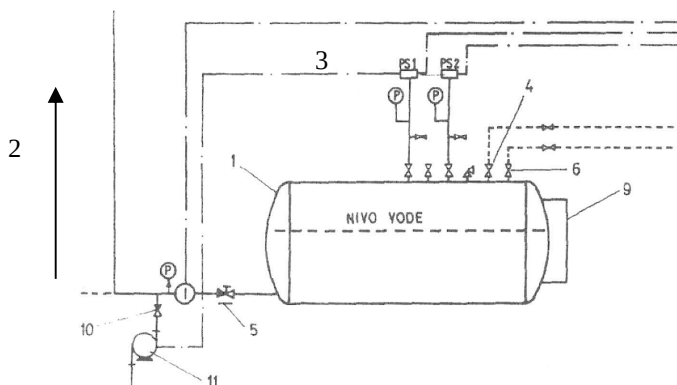
¹⁵⁴ Spomenut je u jednom od klimatizacijskih sustava, a vrlo je čest rotacijski regenerativni zagrijač zraka na generatorima pare.

¹⁵⁵ Ako su s plaštem, to su posude pod tlakom pa prema propisima moraju imati taj ventil.

4.2. Hidrofor

Hidrofor pripada grupi uređaja koje se nazivaju posude pod tlakom. Već je spomenuto da se koristi u sustavima dobave slatke vode u nadgrađe (piće, pranje i kuhanje) gdje zamjenjuje zastarjelu izvedbu s gravitacijskim tankom na vrhu nadgrađa te u automatskim protupožarnim sustavima za gašenje prskanjem.

Izvodi se kao horizontalna (kao na slici 23) ili vertikalna cilindrična posuda (1). Donji je dio ispunjen radnim fluidom, a gornji sa zrakom. Posuda je pod tlakom zraka, a to znači da je cijeli sustav pod tlakom. Koji će to tlak biti, ovisi o potrebnoj visini dizanja radnog fluida. Kada se u sustavu slatke vode otvori slavina, iz hidrofora poteče voda (2) tjerana tlakom zraka. Zbog potrošnje pada razina vode u hidroforu, a zbog širenja, pada i tlak zraka. Kada tlak padne na najdonju dopuštenu vrijednost (minimalna dopuštena razina vode u hidroforu) tlačni prekidač (3) uključuje dobavnu pumpu (11). Ista opskrbljuje potrošače, ali puni i hidrofor. Kada tlak zraka u hidroforu dosegne maksimalnu vrijednost (najviša dopuštena razina) tlačni prekidač isključuje dobavnu pumpu.



Slika 23. Hidrofor [4]

Osim spoja za punjenje hidrofora vodom postoji i spoj za nadopunu zraka. To je potrebno iz razloga što će voda s vremenom otopiti (apsorbirati) sav zrak. Drugi tlačni prekidač na shemi je alarmni. Na sličan način funkcionira hidrofor u sklopu 'sprinkler' protupožarnog sustava. Razlika je što se nakon potrošene slatke vode iz hidrofora starta pumpa morske vode.

Primjer: Hidrofor radi s tlačnim prekidačem koji dobavnu pumpu vode uključuje pri 0,3 MPa, a isključuje pri 0,6 MPa. Do koje visine nadgrađa može hidrofor dobiti vodu ako se nalazi na trećoj podnici strojarnice, a još su dvije podnice strojarnice između hidrofora i glavne palube? Zanimaju se otpori strujanja u cjevovodu! Visinski razmak između podnica (strojarnice i nadgrađa) iznosi 3 m.

Rješenje:

Za ovaj je proračun bitan najgori slučaj – prazan hidrofor, tj. najniža dopuštena vrijednost tlaka. U zadatku nije precizirano, no u praksi se koriste vrijednosti manometarskog tlaka pa će prema zakonu o spojenim posudama tlak od 0,3 MPa u hidroforu dignuti vodu u cijevi na visinu

$$h = \frac{p}{\rho g} \approx \frac{3 \cdot 10^5}{10^3 \cdot 10}$$
$$h \approx 30 \text{ m.}$$

Zanemarujući visinu vode u samom hidroforu dobiveni rezultat znači da ovaj hidrofor može dignuti vodu na 7. palubu nadgrađa (3 x 3 m u strojarnici i 7 x 3 m nadgrađa). U ovom se rješenju u potpunosti zanemario potreban pretlak vode u cijevi na najgornjoj palubi.

Ako se pretpostavi da iznosi barem 0,9 bar račun se mijenja pa korisna visina sada iznosi

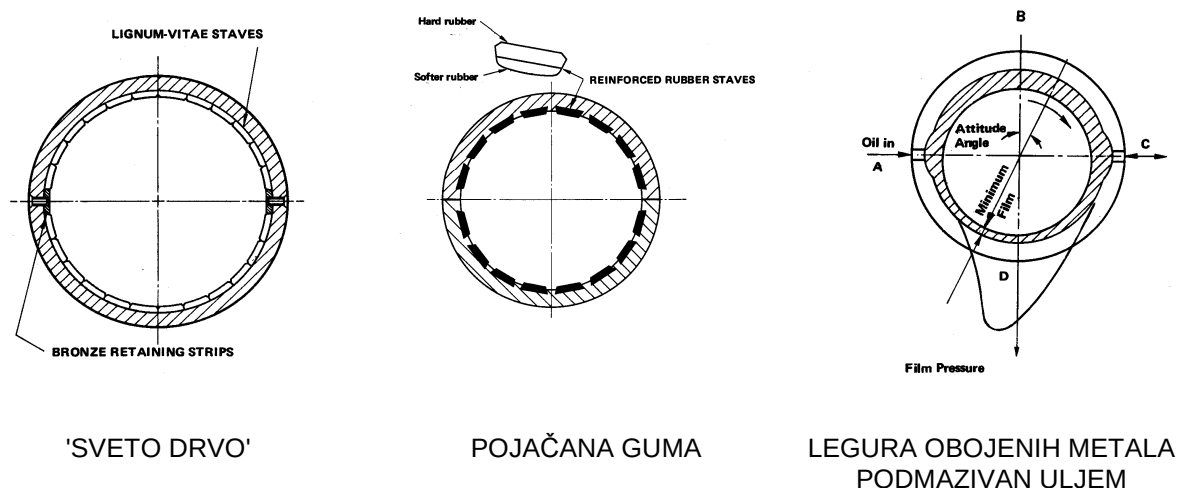
$$h = \frac{p}{\rho g} \cong \frac{(3-0,9) \cdot 10^5}{10^3 \cdot 10}$$

$$h \cong 21 \text{ m},$$

što odgovara 4. palubi nadgrađa.

5. STATVENA CIJEV

Zbog velike se mase međuvratila (spoj priрубnice glavnog porivnog stroja i propelernog vratila) oslanjaju na klizne radijalne ležajeve. S propelerom se vratilom mora učiniti isto. Istovremeno, treba spriječiti prodor morske vode u strojarnicu. Propelerom se vratilo vodi kroz **statvenu cijev**. U njoj su najčešće dva klizna radijalna ležaja, pramčani i krmeni, iako ima izvedbi i s jednim. Vrlo stare konstrukcije i mali brodovi imaju krmeni ležaj hlađen morem. Nekad se izrađivao iz 'svetog drva', a današnji (mala plovila) su gumeni. Razne izvedbe ležajeva prikazane su na slici 24.



Slika 24. Izvedbe krmenih ležajeva statvene cijevi.

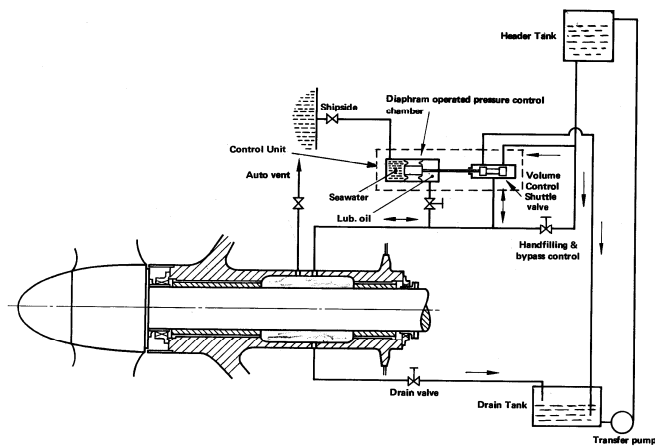
Kod većih snaga i promjera vratila izvode se i pramčani i krmeni ležaj kao klizni, izgrađen od legure obojenih metala te hlađen i podmazivan uljem. Tlak ulja za podmazivanje mora biti veći od tlaka morske vode¹⁵⁶, kako bi se u slučaju propuštanja brtve spriječilo prodiranje mora u ulje, no ne i prevelik jer bi se previše ulja gubilo. Pri radu (plovidbi) se ulje zagrijava i treba ga hladiti. Najjednostavnije je rješenje smještajem tanka sa slatkom vodom oko krmenog ležaja. Toplino preuzima slatka voda, a kroz oplatu broda predaje ju morskoj vodi.

Mnogi napredniji sustavi imaju cijevne rashladnike u kojima se ulje hladi niskotemperaturnom slatkom rashladnom vodom. Drugi je problem postizanje i održavanje potrebnog tlaka ulja. Uobičajena (jednostavna i jeftina) izvedba sastoji se od napojne pumpe, cjevovoda te slivnog i gravitacijskog tanka. S ležajeva se ulje slijeva u slivni tank, odakle ga siše i tlači prema gravitacijskom tanku, napojna pumpa. Tlak ulja postiže se odgovarajućim smještajem gravitacijskog tanka (dovoljno visoko iznad ležajeva) i razinom ulja u njemu.

Takvom je izvedbom teško zadovoljiti traženo (da je tlak ulja malo veći od tlaka morske vode) kada se radi o brodu s velikom razlikom u gasu. Riječ je o tankerima velikih nosivosti, koji su ili u potpunosti nakrcani s teretom ili plove u balastu. U tom se slučaju ugrađuju dva gravitacijska tanka: visoki i niski. Prvi se koristi kada brod plovi opterećen (jako uronjen), a drugi kada plovi u balastu.

Modernija i sofisticiranija rješenja izvode se s osjetnicima tlaka morske vode i ulja te regulatorima tlaka ulja. Jedno od takvih rješenja nalazi se na slici 25. S jedne strane membranskog elementa djeluje tlak morske vode, a s druge tlak ulja. Razlika tlakova pomiče regulacijski element te mijenja tlak ulja.

¹⁵⁶ Što ovisi o uronjenosti krmene strane broda?



Slika 25. Gravitacijsko podmazivanje rezajeva stativne cijevi s regulacijom tlaka ulja [9]

6. BRODSKI CJEVOVODI

Dijele se u tri grupe:

- cjevovodi opće službe,
- pogonski cjevovodi,
- cjevovodi specijalne namjene.

Klasifikacijska društva propisuju materijale iz kojih se izrađuju, načine označavanja, ispitivanje, izvedbe. Cjevovodi opće službe omogućuju ugodan boravak posade i putnika na brodu, osiguravaju sigurnost osoba, tereta ili broda, sprječavaju zagađivanje okoliša, omogućuju daljinsko upravljanje (ventilima) i dr. Pogonski cjevovodi (direktno ili indirektno) omogućuju nesmetan rad glavnog porivnog stroja pa o vrsti porivnog stroja ovisi koji su, te njihove izvedbe. Cjevovodi specijalne namjene omogućuju ukrcaj i iskrcaj tereta ili održavanje tereta tijekom plovidbe, vrše prevenciju požara u teretnim prostorima ili oko njih i sl. Dakle, povezuju se s teretom te ovise o vrsti tereta koji brod prevozi.

Na prvi je pogled jasno da se radi o velikom broju različitih cjevovoda i časnik ih palube ne treba sve detaljno poznavati. Zato će se ovdje objasniti pogonski cjevovodi te neki cjevovodi opće službe. Pogonski iz razloga što od završetka pripreme, upravljanje porivnim strojem preuzima časnik na mostu. Indikacija parametara glavnog porivnog stroja odnosi se u velikoj mjeri na veličine radnih fluida (pogonskih sustava) te je poznavanje istih, barem u nekoj osnovnoj mjeri, važno za sigurnost stroja i broda. Neke cjevovode opće službe časnik palube direktno koristi ili isti rade automatski te odsustvo tog djelovanja može utjecati na sigurnost broda ili optimalnu plovidbu.

6.1. Cjevovodi opće službe

Od velikog broja cjevovoda opće službe ovdje će se obraditi cjevovodi kaljuže, balasta, hidrauličke i pneumatike te dva protupožarna sustava (protupožarni cjevovod s ugljičnim dioksidom za prostore strojeva i skladišta, automatski protupožarni cjevovod za gašenje prskanjem). Cjevovodi ventilacije i klimatizacije, koji također zaslužuju, barem neka osnovna objašnjenja, spomenuti su u prethodnim poglavljima.

6.1.1. Cjevovod kaljuže

Cjevovod kaljuže ugrađuje se s ciljem sakupljanja otpadnih zauljenih voda, njihove obrade (prije spomenuti kaljužni separator) te ispuštanjem van broda. Kaljužne se vode sakupljaju u sabirnom tanku jer njihovo prisustvo na dnu strojarnice (žarg. u santinama) utječe na stabilitet i trim broda. Osim toga, redovito su zauljene pa mogu dovesti do požara, biti zagušljive ili otrovne. Osim iz strojarnice, sakupljaju se iz svih prostora iz kojih više nema gravitacijskih izljeva kao što su: tunnelska kobilica, pramčani i krmeni pik, skladišta tereta. Pojednostavljena shema cjevovoda kaljuže s naznačenim mjestima smještaja usisnih ogranaka prikazana je na slici 26.

Sakupljanje se izvodi strateški razmještenim kaljužnim zdencima, volumena barem $0,2 \text{ m}^3$. Kaljužni zdenac je prostor 'upušten' u dvodno, iz kojeg kroz usisnu stopu siše pumpa kaljuže. U strojarnici se nalaze dva, smještena na oba boka pramčane pregrade (prema teretnom

prostoru) te jedan ili dva na bokovima krmene pregrade¹⁵⁷, kako bi se neovisno o nagibu ili trimu broda sakupljena kaljužna voda mogla odstraniti. U tunelskoj kobilici redovito je na krmenom dijelu, što je i logično ako se zna da je zbog smještaja strojarnice i nadgrađa na krmi, brod gotovo uvijek zatežan.

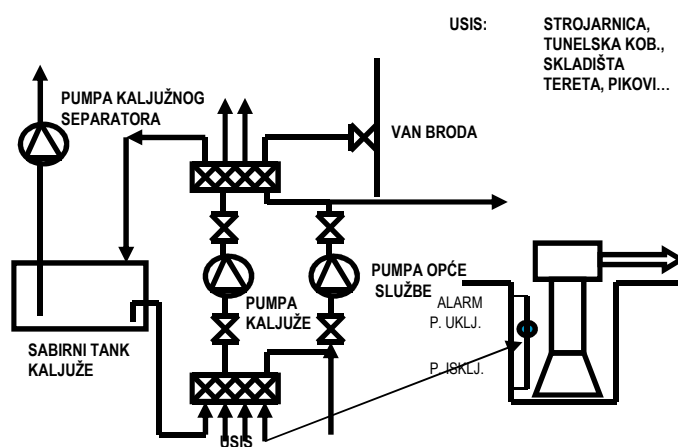
Kaljužni ogranci vode iz svih zdenaca prema usisnoj strani pumpe kaljuže. Budući da su prema propisima potrebne barem dvije pumpe, da iste tlače u sabirni tank kaljuže, na priključak na palubi za predaju na kopno, van broda u slučaju nužde, usisni i tlačni spoj ostvaruje se preko, tzv. ventilske stanice¹⁵⁸. Primjenom zajedničkih usisnih i tlačnih ventilskih stanica smanjuje se ukupan broj ventila pa time i cijena cjevovoda.

Promjer cjevovoda određuje se prema dimenzijama trupa (za ogranke i prostora iz kojeg vode), a prema poznatom promjeru cjevovoda određuje se kapacitet pumpe kaljuže u skladu s izrazom

$$Q|v_{\min} \geq 2 \text{ m/s}.$$

Kapacitet pumpe mora biti takav da brzina fluida u cijevi bude barem 2 m/s. Osim malih plovila na kojima pumpa kaljuže može biti pogonjena ručno, zahtijeva se mehanički pogon. Redovito je to elektromotorni pogon. Pumpe moraju biti samosisne pa su se nekad uglavnom koristile stapne, a danas centrifugalne sa zračnim ejektorom (vidi sliku 9).

Uobičajena je procedura sakupljanje kaljužnih voda u sabirnom tanku. Isti je smješten u dvodnu strojarnicu. Pod dopuštenim uvjetima, zasebna pumpa, pumpa kaljužnog separatora, siše kaljužnu vodu i tlači je prema separatoru te iz njega, van broda. Rad kaljužnog separatora objašnjen je prije.



Slika 26. Pojednostavljena shema cjevovoda kaljuže.

Automatsko startanje pumpe kaljuže može se izvesti pomoću prekidača razine kao na detalju (dolje desno). Prekidači razine izvode se s plovkom, a na nekim razinama zatvaraju ili prekidaju strujni krug. Prema shematskom prikazu na slici na najdonjem položaju prekidač isključuje pumpu kaljuže, na srednjem uključuje pumpu, a kada kapacitet pumpe kaljuže nije dovoljan (pa razina usprkos rada pumpe i dalje raste) na najvišoj razini uključuje alarm.

Kod daljinskog i automatskog upravljanja pomoću osobnih računala s pojedinim se alarmom povezuju četiri veličine, koje se zadaju preko programskog paketa. Promjena vrijednosti tih parametara može se izvršiti tek uz odobrenje ovlaštene osobe (upravitelj stroja, a pristup je

¹⁵⁷ Broj zdenaca na krmenoj pregradi ovisi o približnom obliku tlocrta najdonje podnice strojarnice: ako je trokutasta – jedan, a ako je oblik trapezoidan – dva.

¹⁵⁸ Blok više ventila pomoću kojih se smanjuje potreban broj ventila.

uz, npr. lozinku ili ključ). Te su veličine: vrijednosti uključivanja i isključivanja alarma, blokirna grupa te vremensko zatezanje.

Ako je razina kaljuže veća od neke dopuštene gornje vrijednosti javlja se alarm. Kada se vrijednost mjerene veličine opet nađe unutar dopuštenih vrijednosti, alarm se isključuje. Alarm se blokira automatski ili ručno (također uz dopuštenje ovlaštene osobe). Primjer automatskog blokiranja alarma je slučaj niskog tlaka ulja za podmazivanje glavnog motora, ako je motor zaustavljen i ne rade pumpe ulja. Svakome je jasno da u tom slučaju taj alarm nema smisla i on se, logično, automatski blokira.

Primjer neodgovornog ručnog blokiranja i svrha vremenskog zatezanja objasniti će se upravo na slučaju kaljuže. Kod brodova klase automatizacije AUT 1, tijekom plovidbe noću, javljanje alarma 'prebacuje' se u kabinu dežurnog časnika stroja. On bi trebao spavati u radnom odijelu i u slučaju javljanja alarma trebao bi stepenicama (nikako liftom, kako u slučaju nestanka struje ne bi ostao zaglavljen u njemu) sići u strojarnicu, izvršiti pregled i poduzeti odgovarajuće mjere.

Ako je more malo uzburkano, zbog naginjanja broda na jednu stranu, prividno raste razina vode u kaljužnom zdencu i javlja se alarm. Časnik siđe u strojarnicu, prihvati alarm u ECR, izvrši pregled strojarnice, ustanovi da razina nije previsoka, zaključiti da se alarm javio samo zbog naginjanja (malo većeg vala) te se vrati u kabinu. Kada se ovo ponovi nekoliko puta, svaki će čovjek pokušati pronaći neko rješenje. Jedno, loše, bilo bi ručno blokiranje alarma. Naravno, pod uvjetom da je to upravitelj stroja omogućio jer ima povjerenja u posadu. U tom bi slučaju brod bio nezaštićen u slučaju velikog prodora mora u strojarnicu. To nitko ne bi primijetio (a alarm je blokiran) sve dok ne bi bilo prekasno.

Kako bi se takve akcije učinile bespredmetne, programski se ugrađuje vremensko zatezanje. U ovom slučaju, ovisno o karakteristikama trupa, podesi se vremensko zatezanje u trajanju između 30 i 60 sekundi. Brod će se nagnuti na jednu stranu, razina će postati previsoka, no neće se javiti alarm već vremenski relej započinje odbrojavanje. Samo ako razina ostane previsoka onoliko vremena koliko je vremensko zatezanje, javit će se alarm. Kada je vremensko zatezanje dobro podešeno, vjerojatnije je da će unutar tog vremena doći do izravnavanja trupa pa će i vrijednost razine pasti ispod dopuštene. Alarm se neće niti javiti!

6.1.2. Cjevovod balasta

Balastiranje se izvodi kako bi se kod svih stanja trupa (rasporeda tereta, zaliha goriva, vode, ulja) održao optimalan nagib i trim trupa, a momenti savijanja te poprečne sile u konstrukciji održali unutar dopuštenih vrijednosti. Projektanti trupa u tom smislu raspoređuju tankove balasta i to su redovito tankovi dvodna (ispod prostora tereta), pramčani i krmeni pik, tankovi dvoboka. Kod tankera propisi su stroži pa zbog zaštite okoliša balast mora biti potpuno odvojen od tereta. Samo se u nuždi tankovi tereta smiju koristiti kao balastni (engl. heavy weather ballast tanks).

Cjevovod balasta dimenzionira se prema volumenu najvećeg tanka balasta $V[m]$, a u skladu s izrazom

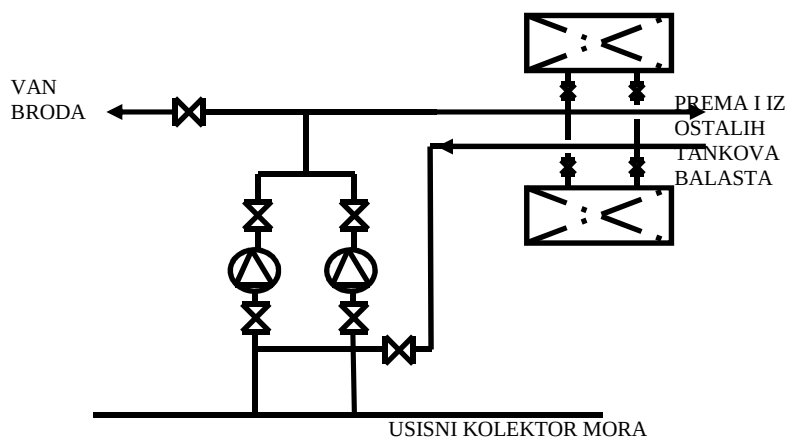
$$d_{bal} \geq 18\sqrt[3]{V} [mm].$$

Pumpe balasta¹⁵⁹ moraju biti takvog kapaciteta koji će u cjevovodu ostvariti brzinu strujanja od barem 2 m/s (izraz kao i za kaljužu). Tankovi dvodna mogu se puniti gravitacijski¹⁶⁰. Ostali

¹⁵⁹ Dvije s mehaničkim pogonom, ali jedna može biti pumpa opće službe, kaljužna, rashladne morske vode, protupožarna. Time se smanjuje ukupni broj pumpi i cijena gradnje.

¹⁶⁰ Kako? Zašto ne i visoki tankovi u dvoboku?

se pune (i prazne) radom pumpi balasta. Cjevovod mora biti izveden tako da se svaki tank balasta može napuniti i isprazniti. Najbolje rješenje omogućuje istovremeno pražnjenje bočnog tanka i prebacivanje balasta na suprotnu stranu. Vrlo pojednostavljena shema takve izvedbe prikazana je na slici 27.



Slika 27. Pojednostavljena shema cjevovoda balasta [10]

Ukratko, usisna strana svake pumpe spojena je na usisni kolektor morske vode te na usisni ventil svakog tanka balasta. Također, svaka pumpa može tlačiti van broda te prema svakom tanku balasta. Ovakvim se rješenjem omogućuje istovremeno prebacivanje balasta s jednog na drugi bok.

Jednostavnije i jeftinije rješenje imat će samo jednu usisno tlačnu cijev prema tankovima. Tada se prebacivanje balasta s jednog na drugi bok izvodi na način da ga najprije s jednog boka izbacimo van broda, a zatim punimo tank na suprotnom boku.

Specijalna izvedba cjevovoda balasta koristi se na RO-RO i kontejnerskim brodovima. Specifična je po tome što se prebacivanje balasta s jednog na drugi bok ostvaruje automatski, ovisno o trenutnom rasporedu tereta, a prema signalu nagiba broda - 'inklinometra'. Takav se sustav naziva protunagibni (engl. antiheeling). Instrument za mjerenje nagiba trupa (inklinometar) kontinuirano 'šalje' signal upravljačkoj jedinici koja po izjednačavanju stvarne vrijednosti nagiba s podešenom (dopuštenom), automatski započinje prebacivanje balasta, što rezultira izravnavanjem trupa.

Moguće su izvedbe s centrifugalnom pumpom i većim brojem daljinski (hidraulički) upravljanih ventila (četiri daljinski upravljana ventila, dva na usisnoj i dva na tlačnoj strani) te s aksijalnom (propelernom) pumpom, koja je prekretna pa sustav tada ima manji broj ventila (obično samo jedan). Postoji i rješenje s kompresorom zraka umjesto pumpe, no tada tankovi moraju biti dimenzionirani za više tlakove.

6.1.3. Hidraulika i pneumatika

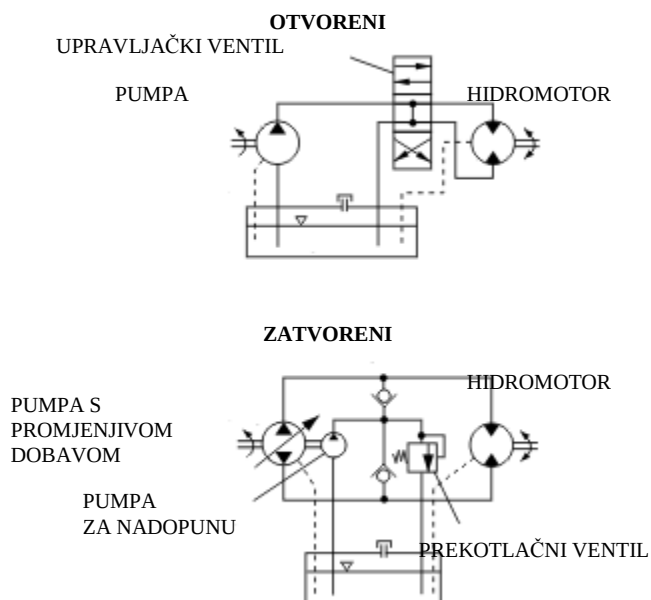
Ovi se cjevovodi koriste za daljinsko upravljanje i pogon pomoćnih uređaja. Jedna od primjena pneumatike jest kod glavnog motora¹⁶¹. Zrak je pogodan jer ga ima u neograničenim količinama, može ga se akumulirati i čist je (pod uvjetom da se filtrira i odvlažuje). Loša je osobina da je kompresibilan (kao i svaki plin) pa se tlakovi u ovim cjevovodima kreću oko

¹⁶¹ Manevarski zrak. Pogonski cilindar polužja visokotlačnih pumpi goriva, kada se primjenjuje elektronski regulator.

0,35 MPa. Uobičajena je izvedba sa spremnikom radnog zraka (0,8 MPa), iz kojega se zrak filtrira i odvlažuje te vodi u cjevovod kontrolnog zraka¹⁶².

Zbog tog se lošeg svojstva plinova za veće prienosne snage primjenjuje hidraulika. Hidraulički se sustavi u osnovi sastoje od pumpi, usisnog ili slivnog tanka, upravljačkih i drugih ventila, filtara, rashladnika, hidromotora te cijevi.

Hidraulički cjevovodi mogu biti izvedeni kao otvoreni i zatvoreni (slika 28).



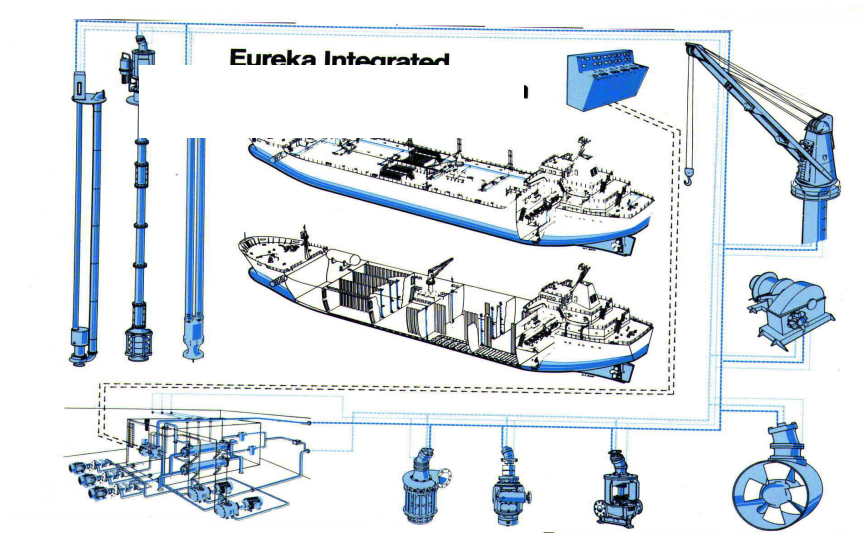
Slika 28. Otvoreni i zatvoreni krug

Tlakovi u ovim sustavima kreću se u rasponu od 5 MPa do 35 MPa, a samo prisustvo bilo kakvog plina u hidrauličkim sustavima vrlo je štetno. U otvorenom hidrauličkom krugu promjena smjera vrtnje hidromotora vrši se pomoću upravljačkog ventila. Pumpa uvijek tlači u istom smjeru, a povrat iz hidromotora ide u slivni tank. Promjena smjera vrtnje hidromotora u zatvorenom se krugu izvodi promjenom smjera dobave hidrauličke pumpe.

Druga je podjela hidrauličkih cjevovoda na: cjevovode konstantnog tlaka, cjevovode konstantnog volumena te cjevovode promjenjivog volumena. Za brodske se palubne uređaje prvi rijetko primjenjuju jer su problemi kontrole te zagrijavanja radnog fluida presloženi. Cjevovodi konstantnog volumena daleko su češći. Pumpa daje konstantan volumen pa se broj okretaja hidromotora regulira pritvaranjem prigušnog (kontrolnog) ventila. Višak radnog fluida vraća se direktno na usis pumpe. Treće se rješenje sastoji od pumpe s promjenjivom dobavom koja radi s konstantnim brojem okretaja. Broj okretaja hidromotora ovisi o volumenu radnog fluida koji dobavlja pumpa.

Cjevovodi mogu biti izvedeni kao jedinični – jedna pumpa opslužuje jedan hidromotor. Drugo je rješenje da jedna ili više pumpi u paralelnom radu opslužuje zajedničkim cjevovodom više potrošača (analogija s visokotlačnim cjevovodom goriva modernih dizelskih motora – common rail). Takav zajednički cjevovod prikazan je u vrlo pojednostavljenom obliku na slici 29.

¹⁶² Ili zraka za automatiku. Nakon filtra/sušioća tlakovi su oko 0,35 MPa, a u samom cjevovodu kontrolnog zraka oko 0,15 MPa.



Slika 29. Zajednički hidraulički sustav [9]

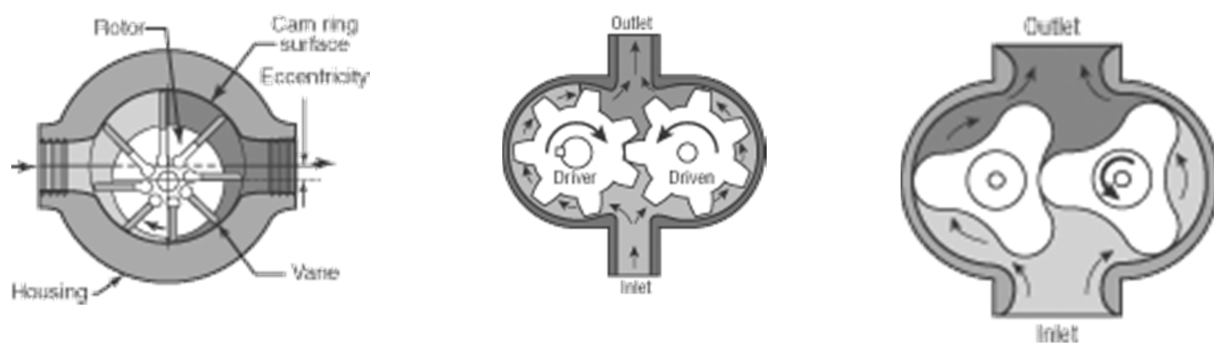
Za razliku od, možda, uvriježenog mišljenja, radni fluid ne mora biti ulje. Koriste se umjetni esteri ili kombinacije estera i ulja, voda i vodene otopine, glikol. Radnom se fluidu dodaju aditivi kako bi se stvorilo ili poboljšalo neka svojstva. Svojstva koja bi radni fluidi trebali imati su: stabilnost kod povišenih temperatura, kemijska stabilnost, nekorozivnost, konstantnost viskoziteta (ili preciznije, mala promjenjivost) u cijelom temperaturnom rasponu, ekološka prihvatljivost (biorazgradljivost u roku od nekoliko dana), otpornost na zapaljenje, niska cijena.

Visoki tlakovi u hidrauličkim sustavima postižu se volumenskim pumpama. Neke su prikazane na slici 30. U sustavima može biti samo jedna ili čak nekoliko hidrauličkih pumpi. Ako su potrebni veći kapaciteti pumpe rade u paralelnom radu. Ako je riječ o hidrauličkom sustavu za pogon nekog bitnog broskog uređaja (npr. kormilarskog stroja, pramčanog propelera) moraju postojati dvije pumpe. Radna i rezervna.

Za pogon vitala redovito se koriste rotacijski **hidromotori**, a za daljinsko upravljanje ventilima ili poklopcima skladišta tereta uglavnom linearni hidromotori (**aktuatori**). Hidromotori su analogni pumpama, no samo onima kojima se može mijenjati smjer vrtnje. Aktuatori se sastoje od cilindra, glave cilindra i klipa te izvode kao na slici 31. Klip je dvoradni: ulje pod tlakom dolazi s jedne strane, a iz druge se prazni i obratno. Pomicanje klipnjače u jednoj tipičnoj primjeni djeluje na vreteno ventila (otvara ga ili zatvara).

Zbog nejednolike dobave i visokih tlakova u ovim se sustavima s tlačne strane pumpi ugrađuju akumulatori¹⁶³. Izvode se s mijehom ili klipom kako je prikazano na slici 32. Pored toga, kompenziraju udarne valove koji se javljaju u cjevovodu. Kada tlak u cjevovodu raste, akumulator se puni radnim fluidom (kompresijom mijeha ili pomicanjem klipa), a kada tlak počne opadati, održava ga akumulator jer mijeh ili klip istiskuju radni fluid u cjevovod.

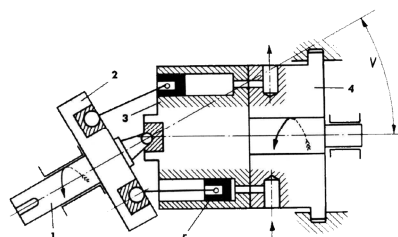
¹⁶³ Objašnjeno u poglavlju stapnih (klipnih pumpi).



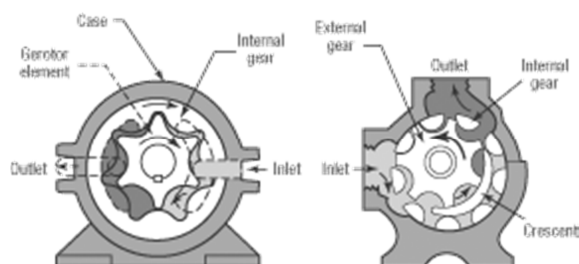
(a) lamelasta

(b) zupčasta (s dva zupčanika)

(c) reznjasta

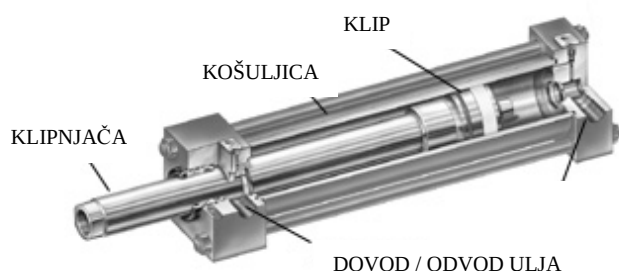


(d) aksijalna s rotirajućim klipovima i promjenjivim hodom (1 – pogonsko vratilo, 2 – ploča, 3 – rotirajuće kućište s cilindrima, 4 – stator, 5 – klip)

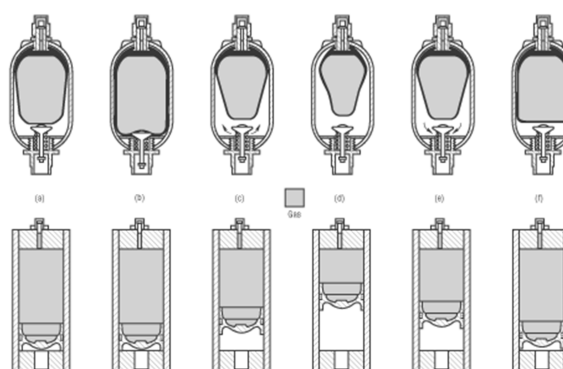


(e) zupčaste s unutrašnjim ozubljenjem

Slika 30. Volumenske pumpe u hidrauličkim sustavima



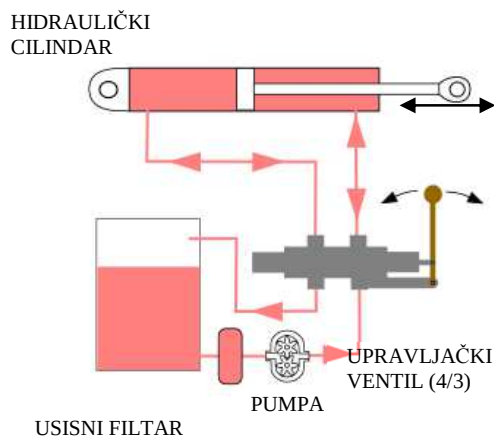
Slika 31. Aktuator.



Slika 32. Akumulatori s mijehom i klipom: (a) i (e) prikazuju prazno stanje, (d) maksimalno napunjen akumulator.

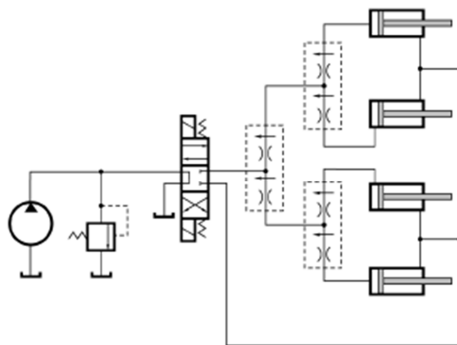
Jedna jednostavna primjena aktuatora prikazana je na slici 33. Ručicom upravljačkog ventila usmjerava se ulje na jednu ili drugu stranu cilindra, što dovodi do linearnog pomicanja klipa. Iz pasivne se strane ulje slijeva u usisni (slivni) tank.

Osim akumulatora, zbog visokih su tlakova i volumenskih pumpi vrlo važni prekotlačni ventili. Isti povezuju tlačnu i usisnu stranu pumpi (tank) te u osnovi funkcioniraju kao sigurnosni ventili.



Slika 33. Upravljanje linearnim hidromotorom (aktuatorom).

Na slici 34 prikazana je primjena hidrauličkog sustava, odnosno linearnog hidromotora, za otvaranje poklopca skladišta tereta. Pumpa siše iz slivnog tanka. Odmah na tlačnoj strani pumpe spojen je prekotlačni ventil. Zatvoren je silom opruge, koja se podešava u skladu s maksimalnim radnim i ispitnim tlakom. Kada tlak radnog fluida nadjača silu opruge (crtkana linija) ventil ispušta fluid u slivni tank (usisna strana pumpe).



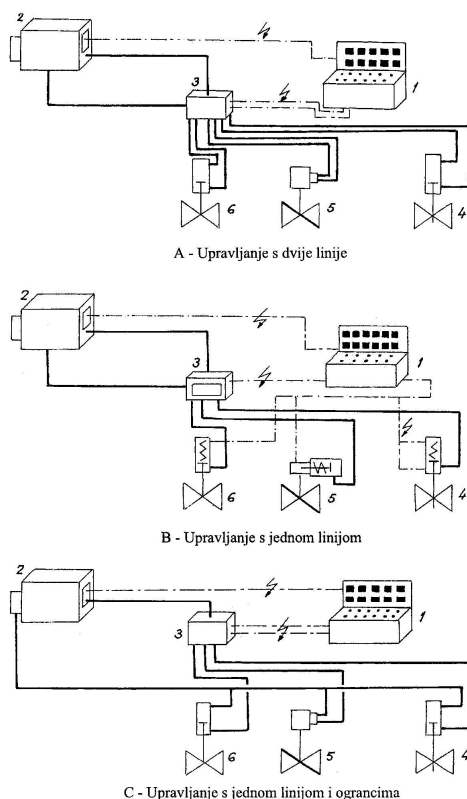
Slika 34. Primjena hidraulike za zatvaranje poklopca skladišta tereta.

Funkcija sustava – otvaranje poklopca skladišta – ostvarena je pomoću razvodnog ventila. Ovaj ventil označava se sa 4/3, što znači da ima četiri otvora (četiri cijevi) i tri položaja. Sheme se crtaju u neutralnom položaju pa se u ovom slučaju radni fluid slijeva u tank – nema pomicanja klipova. Razvodni ventil u kućištu ima pomični dio (poput klipa) s kanalima za protok izvedenim kao na shemi. Kada ventil dobije upravljački signal, koji teoretski može biti pneumatski, hidraulički, električni ili ručni, savladava se sila opruge te se pomiče unutarnji dio ventila. Ovisno o pomaku (na shemi gore ili dolje) pomicati će se i klipovi (na shemi lijevo ili desno).

Važna primjena aktuatora jest za otvaranje i zatvaranje ventila (zapornih elemenata). Vreteno svakog pojedinog ventila upravlja se aktuatorom pa izvedba kao na slici 33, gdje se položaj upravljačkog ventila aktuatora mijenja ručno, ne bi bila opravdana. Svrha je ovakvih sustava olakšati korištenje, pa se kod brodskih cjevovoda želi ostvariti daljinsko otvaranje ventila – iz nekog centralnog upravljačkog mjesta (kontrolna prostorija strojarnice - ECR ili kontrolna prostorija tereta).

U potpunosti je svejedno radi li se o zajedničkom cjevovodu za više potrošača (kao na slici 29) ili samo o upravljačkom cjevovodu za daljinsko upravljanje ventilima. Taj je hidraulički sustav uvijek pod tlakom. Pumpa stlači medij u akumulator te se po postizanju referentnog

tlaka zaustavlja. Potrošnja će se najprije zadovoljavati iz akumulatora, a daljnji će pad tlaka dovesti do ponovnog upućivanja pumpe. Otvaranje i zatvaranje zapornih elemenata (ventila, leptir ventila, zasuna) može se izvesti s dvije linije, s jednom linijom te s jednom linijom i ograncima kako je prikazano na slici 35.



Slika 35. Izvedbe cjevovoda za daljinsko upravljanje zapornim elementima. Zaporni elementi su redom: (4) zasun, (5) leptir ventil, (6) ventil (s pladnjem); (1) je upravljačka konzola, (2) agregat (hidraulička pumpa i akumulator), (3) razvodni sklop – elektromagnetski upravljački ventili za svaki aktuator (zaporni element).

Na upravljačkoj konzoli iscrtan je sistemski nacrt cjevovoda čijim se ventilima daljinski upravlja. Za svaki ventil ugrađena je sklopka s dva položaja (0/1; otvoren/zatvoren). Prebacivanjem sklopke u položaj 'otvoren' šalje se električni impuls elektromagnetskom upravljačkom ventilu (u razvodnom sklopu) nekog zapornog elementa koji se želi otvoriti. Hidraulički radni fluid pod tlakom dolazi na aktuator te otvara zaporni element.

Kod sheme A, radni fluid pušta se s jedne ili druge strane aktuatora, kako bi se zaporni element otvorio ili zatvorio, dok se kod sheme B pušta samo na jednu stranu. Čim tlak padne, opruga gura klip aktuatora i zatvara zaporni element. Shema C se razlikuje od sheme A po jednom zajedničkom vodu.

Ovakva rješenja se na brodovima ugrađuju već nekoliko desetaka godina. Današnji se razlikuju u načinu slanja upravljačkog (električnog) signala. Više se ne koriste upravljačke konzole i sklopke kao nekad, već osobna računala. Sistemski nacrt cjevovoda prikazuje se na ekranu, a umjesto prebacivanja sklopke korisnik klikanjem tipke miša na nekom zapornom elementu sheme šalje signal za otvaranje/zatvaranje. Ovaj se način razlikuje i po indikaciji krajnjeg položaja aktuatora tj. zapornog elementa. Na upravljačkoj konzoli s obje strane sklopke nalazile su se led diode, koje bi se nakon što klip aktuatora dođe do krajnjeg položaja, palile pokazujući otvorenost ili zatvorenost zapornog elementa¹⁶⁴. Kod

¹⁶⁴ Tu se u praksi javljaju greške jer klip aktuatora dobije prazan hod pa iako je zaporni element u biti otvoren nema indikacije. Klip ne dođe do samog kraja i ne zatvara se strujni krug koji pali led diodu.

kompjutorskih sustava upravljanja starije generacije indikacija položaja ventila ostvarivala bi se promjenom znamenke (0 – zatvoreno, 1 – otvoreno). Na novijim izvedbama promjena položaja zapornog elementa indicira se korisniku promjenom boje simbola na kompjutorskoj shemi (npr. crna boja – zatvoren, boja cjevovoda – otvoren). Način korištenja je promijenjen, no izvedba je ista. Klikanjem miša šalje se električni impuls elektromagnetskom ventilu, koji onda djeluje na aktuator.

Osim do sada navedenih elemenata hidrauličkih cjevovoda važni su filtri i rasladnici. Filtri, zato jer se pri radu otkidaju metalni komadići koji mogu s radnim fluidom dospjeti do hidromotora i pumpi. Budući da su zazori mali, takvi komadići mogu dovesti do oštećenja i zastoja u radu. Obično se koriste magnetski filtri. Rashladnici, zato što se radni fluid zagrijava, a poznato je da se sa zagrijavanjem smanjuje viskozitet. Zbog preniskog viskoziteta ne bi mogao ostvarivati svoju funkciju te ga je potrebno hladiti. Hladi se vodom u cijevnom izmjenjivaču¹⁶⁵, koji je neizostavan element hidrauličkih cjevovoda.

6.1.4. Kormilarski uređaj

Kormilarski stroj služi za usmjeravanje kretnje broda. Djeluje na osovinu lista kormila. Pojam kormilarski uređaj je širi te podrazumijeva kormilarski stroj te sustave 'izdavanja naredbi' za zakretanje stroja kao i prijenosa povratnog signala o izvršenom pomaku. Ima različitih izvedbi, od ručnog upravljanja na najmanjim plovilima, preko parnih koji su gotovo napušteni, do današnjih hidrauličkih ili elektrohidrauličkih koji su jedna je od važnih primjena hidrauličnog sustava na brodu.

Prije svega, potrebno je definirati snagu kormilarskog stroja. List kormila u neutralnom (središnjem) položaju i kada brod miruje ne predstavlja otpor, no kada se brod kreće i list kormila ima neki otklon od središnjeg položaja na njega djeluje sila. Što veća plovidbena brzina i otklon lista to veća sila. Hvatište sile nalazi se u težištu površine lista, tj. projekcije površine lista na ravninu okomitu na smjer sile te se javlja moment sile $M = F \cdot k$, gdje je k krak sile u odnosu na osovinu lista.

Navedeni moment potrebno je savladati kormilarskim strojem, snaga kojega je definirana umnoškom momenta sile na list kormila u najgorem položaju i kutne brzine zakretanja lista ω . Snaga iznosi

$$N = M \cdot \omega ,$$

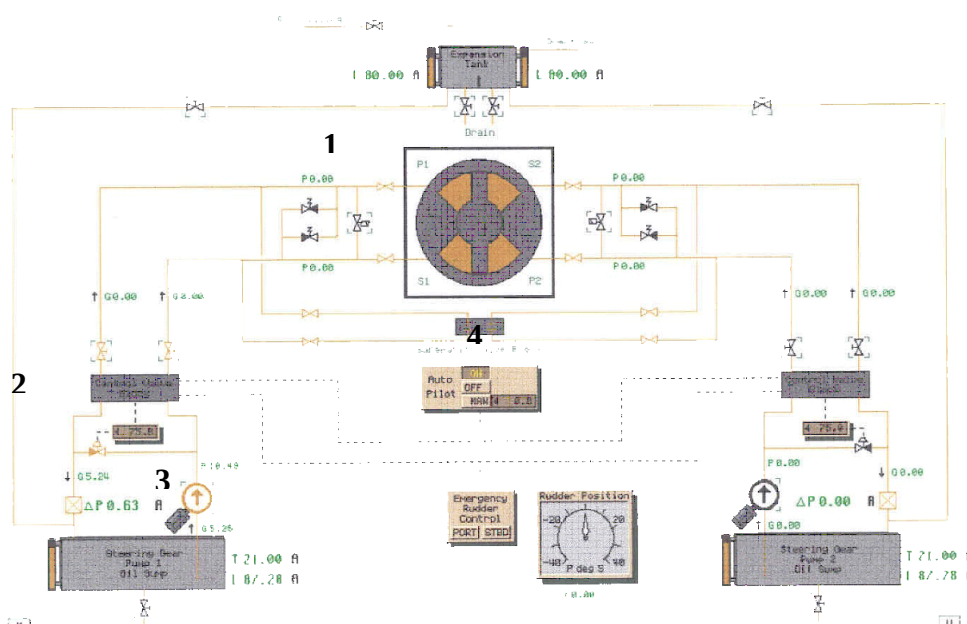
gdje je kutna brzina definirana izrazom $\omega = \frac{2\alpha}{t}$ u kojem je α najveći kut odklona lista, a t vrijeme potrebno za prebacivanje lista iz jednog u drugi krajnji položaj. Za brodove koji zahtijevaju veće manevarske sposobnosti, kao što su remorkeri ili tankeri za prijevoz kemikalija (zbog opasnosti tereta), kutevi odklona su veći, a vrijeme prebacivanja kraće. Maksimalne kuteve odklona, kao i vrijeme prebacivanja, propisuju klasifikacijska društva, obično se kreću u rasponu od 30° do 40°, a vrijeme prebacivanja od 20 do 30 sekundi.

Snaga je definirana za najgori položaj lista kormila. Možda je očito, ali vrijedi spomenuti, da se radi o najvećem odklonu lista i najvećoj plovidbenoj brzini. Nadalje, radi se o brodu pod punim opterećenjem. Ovo je logično jer je tada list kormila maksimalno uronjen i sila njegovog zakretanja ili zadržavanja u željenom položaju sigurno je veća u odnosu na samo djelomično uronjem trup (i list kormila).

¹⁶⁵ Iako se u radu hladi, prije startanja ga je možda potrebno zagrijavati.

Stari brodovi imali su pored glavnog i pomoćni kormilarski uređaj manje snage. Ista je definirana za najveći gaz (opterećenje trupa), ali samo pola najveće plovidbene brzine ili barem 7 čv, za samo 15° otklona lista i 60 sekundi prebacivanja u suprotni položaj¹⁶⁶. Današnje konstrukcije često imaju dva potpuno jednaka hidraulička sustava te se ne može govoriti o glavnom i pomoćnom kormilarskom uređaju, već o uređaju koji je u pogonu i rezervnom. Takva je izvedba, s krilnim ili rotacijskim kormilarskim strojem, prikazana na slici 36. Ako je ventil 4 u stanju koji oslobađa list kormila, upravljački ventil (2) 'pušta' ulje pod tlakom u dvije dijagonalne komore kormilarskog stroja (1), a iz nasuprotne dvije ulje se vraća u slivni tank. Ovakvi se strojevi izvode s 2 ili 3 krila, tj. četiri ili šest komora.

Uzimajući u obzir postojanje satelitske navigacije, elektroničkih navigacijskih karata i sofisticiranog kompjutorski izvedenog automatskog navođenja, objašnjenje upravljanja kormilarskim kolom može se činiti nepotrebno, no ako se pomisli na mogućnosti greške i gubitka satelitskih veza (izazvanih namjerno ili slučajno), shvatljivo je suprotno.



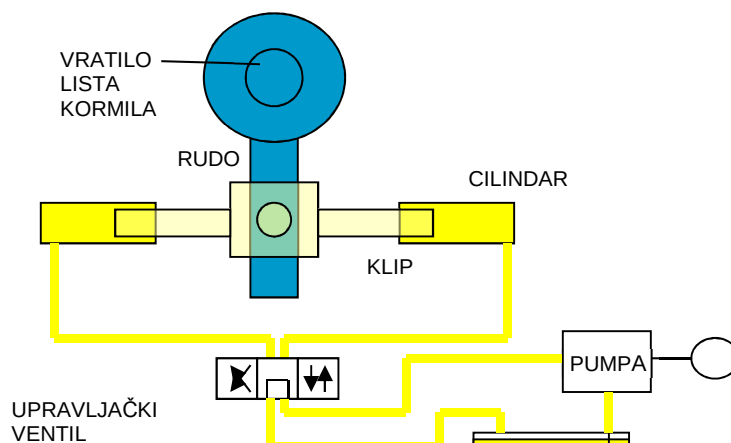
Slika 36. Dvokrilni rotacijski hidraulički kormilarski uređaj: (1) dvokrilni kormilarski stroj, (2) upravljački ventil, (3) pumpa u pogonu, (4) ventil za blokiranje lista u položaju (neutralnom)

Upravljanje brodom (listom kormila) može biti vremensko ili slijedno (praćeno). Preko jednostavnih hidrauličkih shema objasniti će se oba. Slika 37 prikazuje klipni hidraulički kormilarski uređaj s vremenskim kormilarenjem. Pumpa radi kontinuirano pa u neutralnom položaju upravljačkog ventila (kao na slici) samo cirkulira ulje kroz cjevovod tj. vraća ga u slivni (usisni) tank. Kada upravljački ventil¹⁶⁷ dobije signal s mosta ulje pod tlakom ide u jedan od cilindara, a iz drugog se slijeva u tank. Dok je upravljački ventil u pomaknutom položaju (ima signal) hidraulički sustav radi i otklanja rudo tj. rotira vratilo lista kormila te se takvo kormilarenje naziva vremensko.

Upravljački ventil može primiti električni signal direktno s upravljačkog mjesta, a može i indirektno hidraulički ili pneumatski. Tada električni signal s upravljačkog mjesta (mosta) prima najprije pilot ventil, a zatim isti djeluje na upravljački ventil kormilarskog stroja.

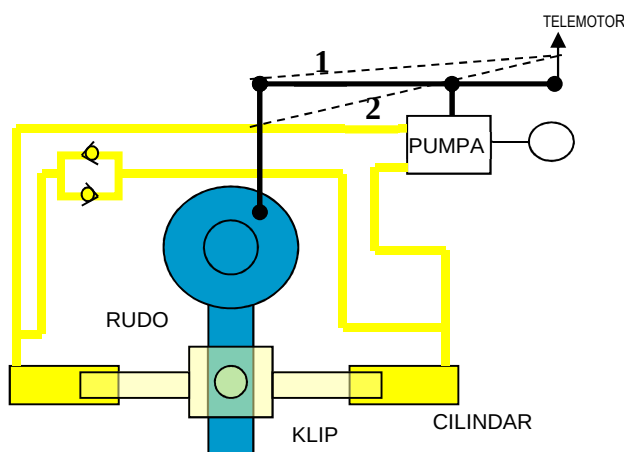
¹⁶⁶ Prema pravilima HRB-a.

¹⁶⁷ Ventil 4/3 ima četiri otvora (spoja s cjevovodom) i tri položaja.



Slika 37. Vremensko kormilarenje.

Gotovo identičan hidraulički sustav može izvoditi slijedno kormilarenje. Prikazan je na slici 38. U ovoj se izvedbi koristi pumpa s promjenjivom dobavom i promjenjivim smjerom dobave¹⁶⁸. Signal s mosta djeluje na telemotor¹⁶⁹ koji pomiče upravljačku polugu u položaj 1. Lijevi kraj poluge spojen je na glavčinu ruda i u tom je smislu nepomičan, no pomicanje telemotora djeluje na upravljačku polugu hidrauličke pumpe. Pumpa počinje s tlačenjem prema jednom od cilindara i ta dobava traje dok se zbog zakretanja glavčine ruda pa time i oslonca upravljačke poluge ne postigne položaj 2, kada je poluga pumpe ponovo u neutralnom položaju (nema dobave). Rad hidrauličkog sustava prati signal s upravljačkog mjesta (telemotor), odnosno pomak telemotora određuje i otklon lista kormila.



Slika 38. Slijedno kormilarenje.

Časniku palube od izuzetne je važnosti poznavanje **upravljanja kormilarskim strojem u nuždi**. Ovdje se može raditi o kvaru jednog hidrauličkog cjevovoda, ali već je poznato da postoji drugi, rezervni. Također, može biti riječ o gubitku signala s mosta ili povratnog signala na most. Upravljanje se u tom slučaju vrši lokalno, iz prostorije kormilarskog stroja. Osoba koja se nalazi u prostoriji kormilarskog stroja po primitku usmenog naloga s upravljačkog mjesta (mosta) djeluje direktno na upravljački ventil ili smjer dobave pumpe. Osim

¹⁶⁸ Radijalna ili aksijalna klipna pumpa.

¹⁶⁹ Telemotor nije ništa drugo do hidraulički cilindar - aktuator. Zakretanje kormilarskog kola na mostu šalje hidraulički signal te pomiče klip telemotora u jednu stranu. To (prema slici 13) dovodi do pomicanja upravljačkog polužja pumpe kormilarskog stroja.

električnog, hidrauličkog ili pneumatskog signala s upravljačkog mjesta koji uzrokuje aktiviranje upravljačkog ventila, na njega se može djelovati i ručno¹⁷⁰.

Na brodovima nosivosti i porivne snage o kojima se ovdje uglavnom radi, zakretanje lista kormila ne može se izvesti drukčije (ručno). Kod manjih je brodova takva izvedba moguća. Hidraulički kormilarski uređaj ima jedan dvoradni cilindar, koji u normalnom radu, prema signalu s mosta, dobija radni fluid u jedan radni prostor, dok se iz drugog radni fluid vraća u slivni tank. Kada je hidraulički uređaj u kvaru, na gornji se kraj osovine lista kormila natakne dugačko rudo te se snagom dvaju ili više ljudi može pri manjim plovidbenim brzinama izvršiti zakretanje. Osim smanjene plovidbene brzine potrebno je premostiti radne prostore hidrauličkog cilindra. Postoji cjevovod i zaporni ventil na njemu koji povezuje dva radna prostora hidrauličkog cilindra. Kada se navedeni ventil otvori povezani su radni prostori cilindra te zakretanje lista kormila i posljedično pomicanje klipa naprosto prelijeva radni fluid s jednog u drugi radni prostor. U protivnom, takvo bi djelovanje bilo nemoguće jer bi klip kormilarskog stroja bio blokiran, a s njime i list kormila.

6.1.5. Palubni uređaji

U ovu se grupu uređaja ubrajaju pritezna i sidrena vitla, teretna vitla, neki uređaji koji su povezani s teretom (pumpe tereta, grijači, rashladnici, elementi sustava inertnog plina...), pramčani propeler, aktivni stabilizatori te dr.

Sidrena i pritezna vitla mogu se pogoniti parom (danas rijetko), hidraulički ili elektromotorima. Redovito su dvobrzinski, pa će se sidro podizati većom brzinom sve do ispred oka, a zatim smanjenom, (po preporuci HRB-a) s manje od 7 m/min. I pritezanje konopa izvodi se isto – slobodan konop priteže se većom brzinom, a privlačenje broda smanjenom. Zbog jednostavnosti se sidrena i pritezna vitla često pogone jednim strojem, tj. na jednom su vratilu, a tada redovito postoji i izvrstiva spojka.

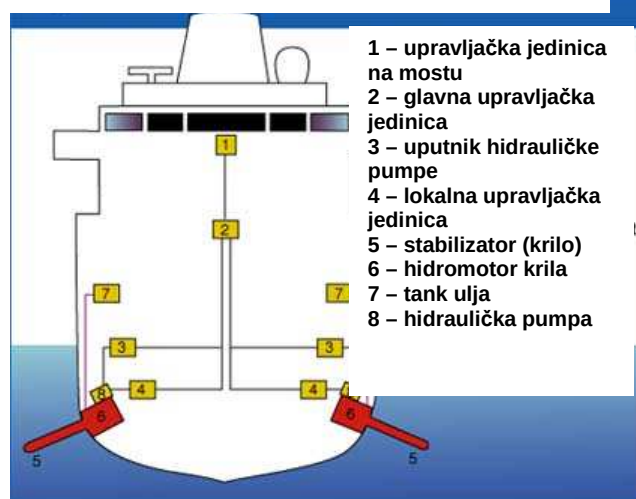
Sidrena vitla moraju imati izvrstivu spojku između lančanika i pogonske osovine, a ako je prijenos nesamokočan, moraju imati i automatsku kočnicu. Ista se aktivira pri nestanku pogonske energije ili isključenju pogona. Ako je predviđeno daljinsko upravljanje puštanjem lanca kada je lančanik isključen od pogonskog stroja, mora postojati automatska tračna kočnica koja ne dopušta brzinu lanca veću od 180 m/min. Na mjestu daljinskog upravljanja indicira se duljina ispuštenog lanca te brzina ispuštanja.

Kod dvobrzinskih hidrauličkih strojeva postoje dvije upravljačke ručice: za promjenu smjera te za promjenu brzine. Za detaljnije objašnjenje rada potrebna su dodatna znanja o hidrauličkim sustavima, koja će se dati u poglavlju o brodskim cjevovodima opće službe.

Tijelo u prostoru ima šest stupnjeva slobode gibanja: translaciju u smjeru x, y i z osi te rotaciju oko navedenih osi. Kada se govori o stabilizatorima broskog trupa, misli se na metode i uređaje kojima se smanjuje rotacija oko uzdužne osi broda (valjanje). U tu se svrhu koriste ljuljne kobilice, tankovi tj. automatsko prebacivanje balasta te aktivni stabilizatori. Ljuljne kobilice smanjuju valjanje svojom površinom i na većim se plovilima ne koriste. Automatsko prebacivanje balasta se koristi¹⁷¹, ali kod manjih brzina rotacije. Aktivni stabilizatori rade na principu avionskog krila. Mogu biti hidraulički ili električki pokretani, a upravljački signal daje žiroskop. Shematski prikaz hidrauličkog pogonskog sustava i izvučenih stabilizatora dat je na slici 39.

¹⁷⁰ Ili direktno na upravljačkom ventilu ili na njegovom pilot ventilu nalaze se zelenom (za okret u desno) i crvenom (za okret u lijevo) bojom označene upravljačke ručice. Pritiskom na njih djeluje se na upravljački ventil kao što to radi signal upravljačkog cjevovoda (hidraulički) ili električni impuls (ako je ventil elektromagnetski).

¹⁷¹ Vidi kasnije poglavlje – *Cjevovod balasta*.



Slika 39. Hidraulički pogon aktivnih stabilizatora.

Najjednostavniji način upravljanja jest pomoću žiroskopa, kada naginjanje broda (uslijed bočnog vala) predstavlja vanjski moment žiroskopa. Djelovanje žiroskopa rezultira električnim impulsom upravljačkoj jedinici stabilizatora koja zakreće krila stabilizatora (par nasuprotnih) kako bi stvorila spreg sila u suprotnom smjeru.

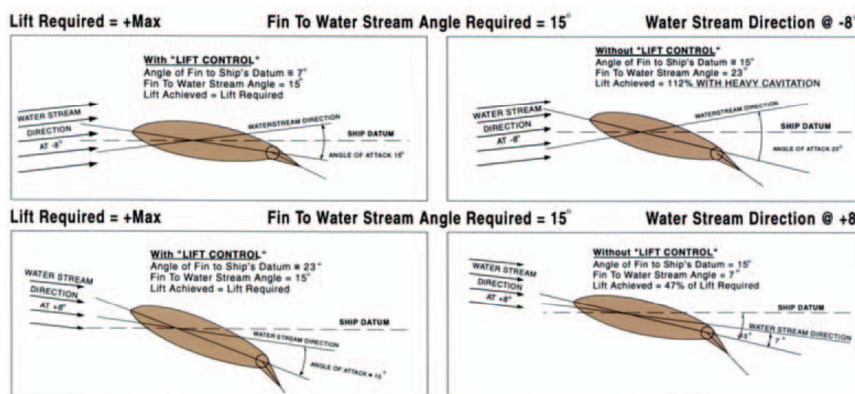
Nešto naprednija tehnika koristi, pored osnovnog signala žiroskopa, i naprezanje u osovini krila. Naprezanje i deformacija osovine posljedica su sile uslijed nestrujavanja trenutne struje morske vode na krilo i njegovog trenutnog poprečnog presjeka¹⁷². Električni impuls (kao posljedica deformacija osovine) uspoređuje se s osnovnim signalom žiroskopa te se kut između nagiba krila i trenutne lokalne struje fluida (morske vode) korigira kako bi se postigao željeni protunagibni efekt.

Na slici 40¹⁷³ prikazan je položaj krila za pozitivan i negativan upadni kut trenutne lokalne morske struje i horizontalne osi te oba sistema upravljanja. Kod klasičnog sustava upravljanja žiroskopom pojavljuje se statička greška jer se ne uzima u obzir trenutna lokalna struja morske vode (val), tj. njezin upadni kut. Ovaj, moderniji sustav upravljanja to uzima u obzir, korigirajući položaj (kut) krila i potrebnu zakretnu silu.

Na dvije desne slike prikazano je krilo zakrenuto u odnosu na horizontalnu os za 15° jer toliko traži upravljački algoritam na osnovi djelovanja žiroskopa. Greška je u odstupanju trenutne lokalne struje mora od zamišljene horizontalne osi. Na gornjim slikama upadni je kut -8°, a na donjim +8°. Kut između lokalne morske struje i krila na slici gore desno iznosi 23°, a dolje desno 7°. Zbog te se činjenice kod sustava

¹⁷² Postiže se zakretnim krilcima na stražnjem dijelu krila.

¹⁷³ Za dodatne informacije pogledati: <http://sperrymarine.northropgrumman.com>



Slika 40. Postignuti otklon krila s korektivnim djelovanjem i bez njega.

upravljanja kao na slikama desno, potrebna sila bitno razlikuje od ostvarene. Na lijevim je slikama, kod sustava upravljanja krilima s korekcijom, u oba slučaja kut između trenutne lokalne morske struje i krila 15° . Dakle, kut otklona krila nije podešen u odnosu na zamišljenu horizontalnu os (i teoretski smjer strujanja mora) već u odnosu na trenutnu lokalnu struju.

6.1.6. Protupožarni cjevovodi

Na brodovima se primjenjuje desetak i više protupožarnih cjevovoda. Ovdje će se obraditi nekoliko tipičnih rješenja: za prostore strojeva, za prostorije nadgrađa te za prostore tereta.

Uglični dioksid je sredstvo koje požar gasi gušenjem. Činjenica da pri ispuštanju izlazi u obliku suhog leda i vrlo je niske temperature ne pridonosi značajnije gašenju. Zbog toga se ugrađeni sustavi smiju primjenjivati samo u zatvorenim prostorima¹⁷⁴, kao što su prostori strojeva, skladišta tereta ili boja.

Zbog njegovog prirodnog stanja (plin) potrebno ga je ukapljiti. Klasifikacijska društva određuju potrebne količine (mase) ugljičnog dioksida, koje su za zaštitu velikih prostora (velikih volumena) značajne. Tolika masa CO_2 u prirodnom bi stanju zauzimala ogroman brodski prostor. Ukapljivanje¹⁷⁵ se izvodi na dva načina: visokim tlakom pa se takav sustav naziva visokotlačni, visokim tlakom (ali ne kao kod visokotlačnih sustava) i hlađenjem, a takav se sustav naziva niskotlačnim.

Kod visokotlačnih sustava potrebna masa CO_2 čuva se u većem broju, relativno malih spremnika. U svakom se masa CO_2 kreće u rasponu od 30 do 50 kg. Tlak u spremnicima je 5,6 MPa kada je temperatura u prostoru čuvanja 20°C . Svi se spremnici čuvaju u posebnom prostoru (engl. CO_2 room), koji je u pravilu na razini glavne palube i **ne smije biti dio štićenog prostora**¹⁷⁶. Također, važno je znati da se prostor ventilira isisnom ventilacijom koja se ne smije nikada isključivati.

Ispitni tlak boca visokotlačnog sustava iznosi oko 15 MPa ili više. U slučaju porasta temperature zraka u prostoru¹⁷⁷ tekući CO_2 se širi te raste tlak u spremnicima. Ako

¹⁷⁴ Ne treba miješati prijenosne protupožarne aparate s ugrađenim sustavima. Prijenosni se, očito, smiju koristiti i na otvorenom. Rezultat gašenja će biti upitan, ali barem se odgađa širenje požara. Ugradnja sustava za otvoreni prostor nema smisla jer će se uvjeti za nastanak požara brzo obnoviti (okolni zrak).

¹⁷⁵ Točno bi bilo reći stanje mokre pare jer se posude djelomično ispunjavu kapljevitom, a manjim dijelom plinovitom fazom.

¹⁷⁶ Kako bi se moglo prići ako sustav daljinskog aktiviranja zakaže i aktivirati sustav lokalno (mehanički, ručno).

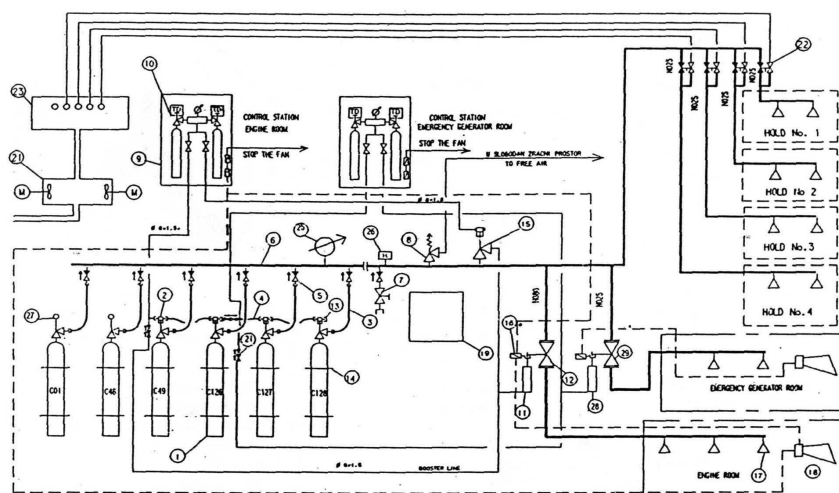
¹⁷⁷ Približno istu temperaturu imat će i CO_2 u bocama.

temperatura naraste na 54°C boce je potrebno hladiti. Hlade se vodom. U protivnom rasprskava se sigurnosna pločica te CO₂ izlazi iz spremnika.

Niskotlačni sustavi rade s daleko nižim maksimalnim tlakovima u spremnicima¹⁷⁸. Prema HRB-ova maksimalni tlak iznosi 2 MPa pa su i ispitni tlakovi daleko niži. Takvi tlakovi nisu dovoljni da se CO₂ ukaplji pa ga je potrebno hladiti. Hladi ga se parno-kompresijskim rashladnim uređajem kojemu je isparivač uronjen u posudu s CO₂, na temperaturu od -18°C.

Jedna od važnijih provjera koja se mora provoditi jest ispravnost spremnika plina. Visokotlačni se provjeravaju vaganjem, gdje gubitak više od 10% deklarirane mase znači neispravnost ili se jedna od boca izvaže te se izvana ultrazvučno odredi položaj razine tekućine. Na ostalim se spremnicima samo ultrazvučno provjerava razina, tj. uspoređuje s razinom u prvoj boci. Niskotlačni spremnici imaju pokazivače razine.

Visokotlačni cjevovod s CO₂ za prostore strojeva i skladišta tereta prikazan je na slici 41. Kako bi se ispustio CO₂ potrebno je otvoriti ventile na bocama. Ako se štiti velik prostor, dakle velik je i broj boca, boce se otvaraju daljinski i to gotovo istovremeno. Sustav otvaranja je pneumatski¹⁷⁹. U ormarima (kabinetima) za daljinsko aktiviranje nalaze se po dvije pilot boce – glavna i boca za slučaj nužde. U njima je manja količina CO₂ (npr. desetak kilograma).



Slika 41. Protupožarni cjevovod s CO₂ [9]

Ormari za daljinsko aktiviranje su zaključani i samo ih odgovorna osoba može otključati. Prema pravilima to je komandant broda ili neki stariji časnik, kojemu je povjereno rukovođenje gašenjem. Za strojarnicu je to upravitelj. Otvaranje vrata na ormaru oslobađa mikroprekidače koji prekidaju prisilnu ventilaciju strojarnice (zaustavljaju ventilatore i zatvaraju klapne u glavnim cjevovodima ventilacije strojarnice) i uključuju CO₂ alarm. Alarm ima prepoznatljiv zvučni i svjetlosni signal i time se osoblju stroja daje znak da se pristupa gašenju te da što je moguće hitnije napuste prostor stroja. U nekim slučajevima automatski se zaustavljaju pumpe goriva i ulja u strojarnici (zapaljive tekućine). Po izlasku se zatvaraju ventilacijski otvori strojarnice, kako bi se spriječila prirodna ventilacija, te zatvaraju brzozatvarajući ventili na tankovima goriva i ulja smještenim u strojarnici. **Odgovorna osoba (koja odlučuje o početku gašenja) osobno se mora uvjeriti da su svi napustili prostor strojeva.**

¹⁷⁸ Ima ih svega nekoliko ili čak samo jedan.

¹⁷⁹ To je i najčešći, ali daljinsko otvaranje može se izvesti električki, hidraulički ili elektro-hidraulički.

Na unutarnjoj strani vrata ormara za daljinsko aktiviranje postoji uputstvo za rukovanje. Redovito se najprije otvara lijevi ventil, a nekoliko sekundi nakon toga i desni. Otvaranjem prvoga otvaraju se boce s CO₂ jer se CO₂ iz pilot boce pušta na serijski spojene aktuator ventilu (baterije)¹⁸⁰. Istim se plinom može otvarati i ventil za ispuštanje, ali to ne bi bilo dovoljno brzo. Za strojarnicu vrijedi propis da se barem 85 % proračunate mase CO₂ mora ispustiti u roku ne dužem od dvije minute. Zato se otvara drugi (desni) ventil, čime se otvara tzv. 'buster' ventil (engl. booster), odnosno ubrzava otvaranje ventila za ispuštanje.

Nakon što je CO₂ ispušten i požar pogašen, potrebno je čekati barem 36 sati prije početka ventilacije. Tek kada upravitelja stroja obiđe strojarnicu i uvjeri se da je hladna, može se pristupiti ventilaciji. Naime, masa CO₂ za strojarnicu proračunava se prema izrazu

$$G=1,79 \cdot V \cdot \varphi$$

pa kako je φ koeficijent koji ovisi o obliku strojarnice, a V [m³] volumen iste, slijedi da sredstva ima samo za jedno gašenje. Kada bi se ventilirala topla strojarnica požar bi se mogao obnoviti!

Na shemi su prikazana dva prostora strojeva (donji je strojarnica, a gornji prostorija generatora električne energije u nuždi, koji je uvijek u posebnoj prostoriji u nadgrađu) i dva ormara za daljinsko aktiviranje. Taj broj mora biti izjednačen – koliko se prostora strojeva štiti, toliko je ormara za daljinsko aktiviranje. Sve su boce preko nepovratnih ventila spojene na zajednički kolektor¹⁸¹. Plin iz pilot boca ormara za strojarnicu djeluje na početak serijskog spoja aktuatora ventila boca s CO₂, a plin iz pilot boca ormara za prostoriju generatora u nuždi samo na dvije krajnje desne boce (zbog nepovratnog ventila na cjevovodu za aktiviranje).

Skladišta tereta štite se na isti način. Kada se cijevnim vatrodojavnim uređajem otkrije požar u skladištu, kroz iste se cijevi ispušta CO₂. Boce s CO₂ za skladišta tereta otvaraju se ručno. Budući da skladišta nisu istog volumena, projektom treba odrediti koliko se boca treba otvoriti za pojedino skladište. Nakon što se požar u skladištu pogasi prostor se neće ventilirati, već se čeka do prve sljedeće luke. Požar se mora prijaviti vlastima i kod iskrcaja moraju biti prisutni vatrogasci¹⁸².

Za razliku od ovog sustava, prostorije nadgrađa štite se automatskim protupožarnim sustavom – sustavom za gašenje prskanjem¹⁸³, tzv. *sprinkler* sustavom. Sličan se sustav koristi za palube vozila, no ovaj redovito radi s višim tlakovima vode i aktivira se ručno.

Sprinkler sustav (slika 42) hermetički je zatvoren i uvijek pod tlakom. Tlak u sustavu održava hidrofor (1) – iscrpni izvor vode (slatke). Kada se voda iz hidrofora potroši tlačni prekidač uključuje pumpu morske vode (11) – neiscrpni izvor. Sustav je podijeljen u sekcije prema obliku i veličini paluba nadgrađa. Svaka sekcija ima svoj alarm (2), koji se aktivira kada se u toj sekciji pojavi protok vode. Protok će se pojaviti kod prsnuća bulba rasprskivača (sprinklera) ili prilikom ispitivanja alarmnog sustava otvaranjem testnog pipca (7).

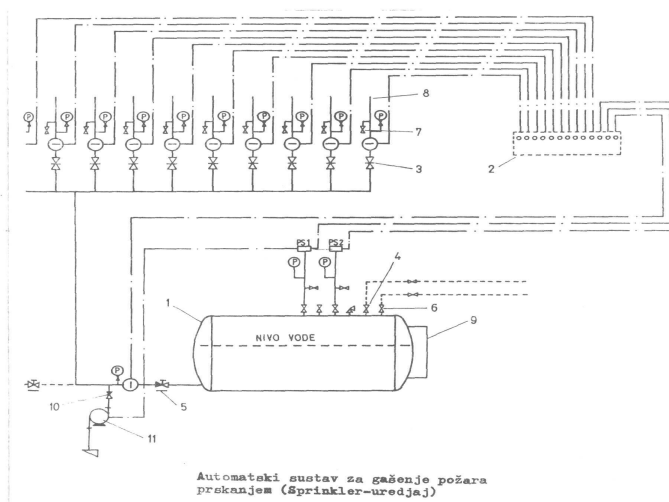
Broj sekcija nije ograničen, ali jest broj rasprskivača po sekciji koji iznosi 200. Tlakovi u cjevovodu su relativno niski, ali nisu propisani iznosi. Pravilo određuje da tlak na najgore rasprskivaču mora biti najmanje toliki da rasprsnuta voda pokriva površinu od barem 28 m². Iskustveno je to otprilike 1 bar manometarskog tlaka. Cjevovod mora biti presjeka kako bi dolazilo barem 5 l/minm² štice površine.

¹⁸⁰ Ovisno o ukupnom broju boca to iziskuje izvjesno vrijeme, ali u osnovi je sustav brz.

¹⁸¹ Prve dvije s lijeve strane sadržavaju CO₂ za skladišta tereta, a ostale četiri za strojarnicu.

¹⁸² Požar se mora prijaviti.

¹⁸³ Zašto sustav s CO₂ za strojarnicu ne smije biti automatski?



Slika 42. Automatski sustav gašenja prskanjem ('sprinkler') [4]

Za prostorije nadgrađa podešava se rasprskavanje bulba kod temperature od 68 ili 79°C¹⁸⁴. Točna temperatura prskanja ostvaruje se veličinom zračnog mjehura koji se ostavlja u bulbu. Ostatak bulba ispunjen je tekućinom. Povišenje temperature u štíćenom prostoru dovodi do širenja tekućine u bulbu i kompresije zraka. Tek kada tlak dovoljno naraste rasprsnje se staklo bulba i započinje gašenje.

Sprinkler sustav može biti mokar ili suh. Suh se koristi kada se želi izbjeći zaleđivanje vode u cijevima kod sniženih temperatura. Ukoliko je sustav u potpunosti ispunjen vodom – mokar je, a ako su sekcije (samo sekcije!) ispunjene zrakom – suh je. Moguće su i kombinacije, na način da se ljeti koristi mokri, a zimi suhi sustav ili da su neke sekcije mokri, a neke suhi sustav.

Halogenirani ugljikovodici ili kraće haloni proizvode se iz metana (CH₄) ili etana (C₂H₆). Umjesto atoma vodika u molekule su 'ugrađeni' halogeni elementi poput kroma (Cr) ili broma (Br). Ovakvi su spojevi vrlo interesantni za tehnologiju gašenja požara jer su potrebne količine za uspješno gašenje vrlo male. Problem je u zagađivanju okoliša, tj. promjenama u atmosferi koje uzrokuju atomi halogenih elemenata nakon ispuštanja.

Halon 1301 je u osnovi jedini interesantan za primjenu na brodovima jer je gotovo bezopasan po čovjeka. Čovjek se može zadržati u prostoru u koji je ispušten H1301 u koncentraciji od 5 do 7% volumena 15 minuta bez opasnosti po zdravlje. Uslijed visoke temperature uzrokovane požarom H1301 raspada se na kemijski jako aktivne spojeve koji kemijski reagiraju sa sudionicima požara te na taj način kemijskim putem prekida požar¹⁸⁵. Pri tome nastaju i spojevi broma i drugih halogenih elemenata koji su toksični, no ukoliko se potrebna koncentracija halona postigne u skladu s pravilima, koncentracija spomenutih otrovnih spojeva su zanemarive. Haloni 1211 i 2402 nekoliko su puta otrovniji za ljudski organizam i na brodovima nisu primjenjivani.

Spremnici halona u pravilu se izvode s dušikom, tj. ekspanzija dušika će istjerati halon iz spremnika nakon otvaranja ventila. Otvaranje spremnika dušika je kao i u slučaju ugljičnog dioksida pneumatsko, a lokalno, mehaničko koristi se ukoliko daljinsko aktiviranje zakaže. Budući je samo protupožarno sredstvo bezopasno po čovjeka, spremnici mogu biti smješteni u prostoru gašenja.

¹⁸⁴ Ako su u prostoriji normalno više temperature i prskanje bulba može se podesiti na višu temperaturu.

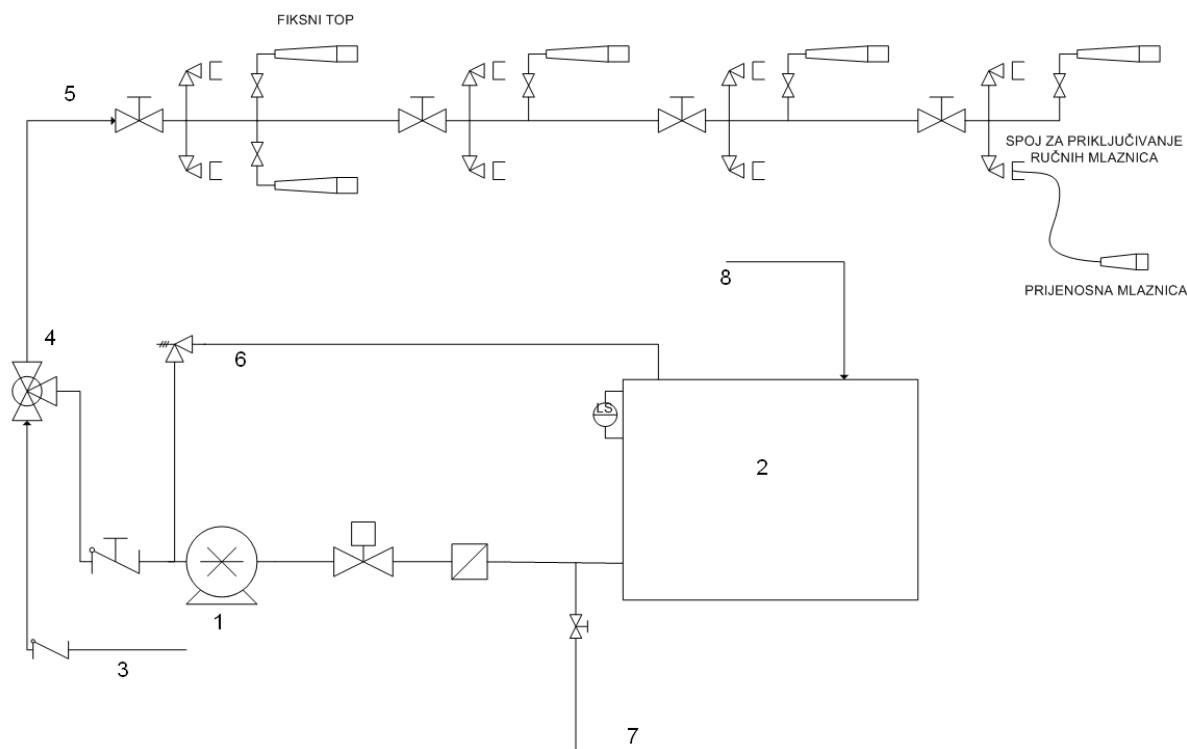
¹⁸⁵ Požar je u većini slučajeva nekontrolirana oksidacija, reakcija gorive tvari s kisikom, uz pojavu veće količine topline.

Ekološki prihvatljive alternative za halone, koje uz to još i gase požar na sličan način su Inergen, FM 200 i FM 13. Inergen je mješavina plinova dušika, ugljičnog dioksida i argona – sve plinova koji se nalaze u atmosferi. Njihov maseni udio u tlačnim spremnicima nije identičan udjelu u atmosferi. Iza komercijalne oznake FM 200 krije se heptafuoropropan HFC-227ea, a FE 13 je prvobitno razvijan kao radni fluid rashladnih uređaja. Sva tri navedena sredstva sigurna su za ljude te se po izbijanju i detektiranju požara aktiviranje sustava može izvesti automatski.

Na brodovima se primjenjuju mehaničke ili zračne pjene i kemijske pjene. Sustavi koji koriste kemijske pjene rijetki su. Primjenjuju se na tankerima za prijevoz kemikalija. Mehaničke pjene proizvode se prvotnim miješanjem (morske) vode i pjenila te naknadnim dodavanjem zraka. Razlikuju se prema koncentraciji pjenila, odnosno prema ekspanzijskom omjeru.

Na otvorenim palubama tipično se ugrađuju sustavi s teškim pjena ekspanzijskih omjera od 1:5 do 1:7. Ugrađeni topovi imaju domete 50-tak metara i više, a brodovi moraju imati i barem četiri prijenosne mlaznice za pjenu. Jedan od važnih kriterija za procjenu ispravnosti sustava je sposobnost prekrivanja cjelokupne teretne palube pjenom.

Slika 43 prikazuje sustav teške pjene na palubi tankera za ulja. Cjevovod pjene na palubi zapornim je ventilima podijeljen u sekcije kako bi se mogao izolirati dio cjevovoda oštećen eksplozijom tanka. Svaka sekcija na oba boka ima priključke za prijenosne mlaznice.

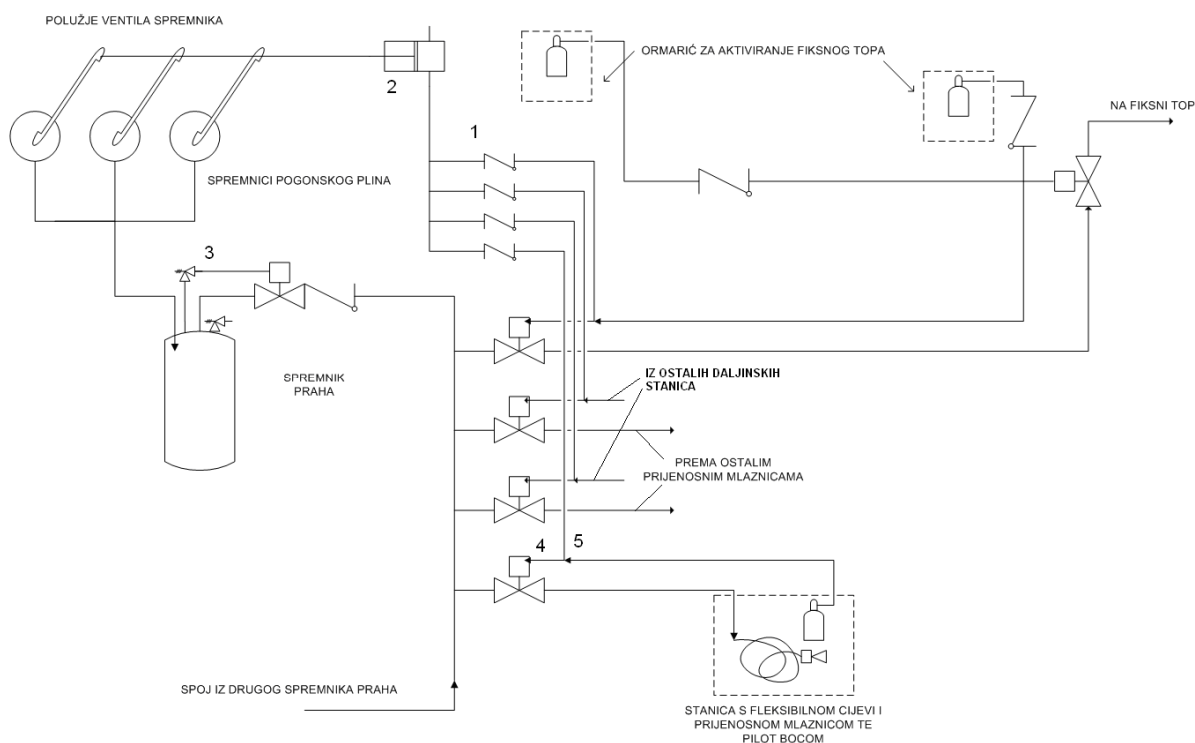


Slika 43. Protupožarni cjevovod s pjenom na palubi tankera: 1 – pumpa pjenila, 2 – tank pjenila s alarmnim prekidačem, 3 – spoj pumpe morske vode (npr. glavna protupožarna), 4 – dozator pjenila (troputni ventil mješač), 5 – cjevovod na palubi, 6 – povrat u slučaju prvevisokog tlaka pjenila, 7 – spoj za ispiranje, 8 – punjenje pjenila [11]

Pumpa pjenila 1 siše iz tanka 2 i tlači pjenilo ka uređaju za doziranje 4. Sustav može imati vlastitu pumpu morske vode ili biti spojen na protupožarnu pumpu ukoliko ona zadovoljava. Doziranje pjenila važno je za postizanje potrebnog ekspanzijskog omjera pjene. Koristi se više metoda: nekoliko njih koriste mlazne pumpe, pomoću tlačno-membranskog dozatora, modernije metode imaju mjerače protoka vode i pjenila te upravljačke jedinice koje upravljaju regulacijskim ventilima.

Kada bi se razmatralo samo mehanizme gašenja požara prah bi sigurno bio među najboljim protupožarnim sredstvima. U zatvorenim se prostorima pojavljuje problem čišćenja opreme nakon gašenja prahom te je ipak povoljnija primjena na otvorenim palubama.

Tipičan sustav za otvorenu palubu prikazan je na slici 44. Brodovi nosivosti veće od 1000 t imaju dvije potpuno neovisne radne stanice i u svakoj od njih barem jedan spremnik dovoljnog volumena kako bi u njemu pohranjena količina praha omogućavala rad svih ugrađenih i svih prijenosnih mlaznica najvećim kapacitetom u trajanju od barem 45 sekundi. Shema prikazuje jedan spremnik u jednoj od stanica te priključak ka drugoj radnoj stanici.



Slika 44. Shema cjevovoda gašenja s prahom i djelovanje na upravljačke ventile: 1 – nepovratni ventili za djelovanje na spremnike pogonskog plina, 2 – aktuator spremnika plina, 3 – ventil konstantnog tlaka, 4 - spoj za otvaranje ventila za ispuštanje praha, 5 – spoj za otvaranje spremnika pogonskog plina [11]

Sustav se aktivira iz bilo kojeg od ormarića razmještenih po teretnoj palubi. U svakom od ormarića nalazi se pilot boca. Otvaranjem ventila na pilot boci otvara se pneumatski ventil na cjevovodu praha 4, a plin zatim djeluje kroz cjevovod 5 na odgovarajući nepovratni ventil 1 na pneumatski aktuator 2. Aktuator zakreće polužje ventila na spremnicima pogonskog plina. Pogonski plin ulazi u spremnik praha, djelomično se miješa s prahom, a dio ostaje pri vrhu spremnika praha. Kada se u spremniku praha postigne radni tlak plina, otvara se ventil 3 te plin otvara pneumatski upravljani ventil, te prah kroz njega i otvoreni ventil 4 dolazi do ormarića koji je i aktivirao sustav. Nakon uspješnog gašenja cjevovod je potrebno propuhivati pogonskim plinom i u prvoj luci obnoviti potrošeni prah.

Voda ima neke dobre, ali i neke loše karakteristike kada se radi o gašenju požara. Dobre su sigurno dostupna količina te rashladna svojstva. Na brodovima se ugrađuje nekoliko sličnih sustava koji požar gase prskanjem vode. Razlikuju se načinom rasprskivanja, postupkom aktiviranja sustava i dr. U nadgrađu se tipično ugrađuju automatski sustavi koji požar gase prskanjem vode primjer kakav je već opisan. Slični sustavi, ali ne automatski, koriste se na palubama vozila. Proces gašenja u tom slučaju aktivira čovjek¹⁸⁶, otvaranjem potrebnih ventila te uključivanjem pumpe morske vode. Važno je istaknuti kako sustavi koji gase

¹⁸⁶ Ima i suprotnih rješenja – automatski na palubama vozila, a čovjek aktivira u nastambama.

prskanjem vode nisu primjenjivi u prostorima strojeva, tj. u prostorima u kojima se javljaju požari klase B i E.

Nasuprot tome, sustavi koji gasu raspršivanjem vode (engl. water mist) smiju se primijeniti i u takvim prostorima. U čemu je razlika? Potonji rade s višim tlakovima te se voda finije rasprši. Tako raspršena voda ne provodi električnu struju, a tijekom postupka gašenja primijeni se mala količina vode. Najnovija rješenja koriste tlakove čak i više od 14 MPa ili se voda rasprši plinom za raspršivanje¹⁸⁷. Zbog finog raspršivanja voda brzo prima toplinu i isparava te osim hlađenja djeluje na požar brzim gušenjem.

Sustav koji također koristi vodu je i glavni protupožarni cjevovod. Duboko u strojarnici, ispod vodene linije, smještene su barem dvije protupožarne pumpe. Po cijeloj su strojarnici razmješteni crvenom bojom¹⁸⁸ označeni protupožarni ventili. Pored njih, u pripadnim košarama, nalaze se protupožarna crijeva koja završavaju zapornim organom i mlaznicom. U nadgrađu i na otvorenim palubama protupožarni su ventili ugrađeni u protupožarne ormariće ili niše. Na njihovim se vratima ispisuje slovo H. U njima su i protupožarna crijeva. Na putničkim brodovima crijeva su spojena na ventile, a sustav je pod tlakom.

Protupožarne pumpe moraju biti kapaciteta u skladu s nosivošću broda, a najmanji tlak koji postižu na najgorem protupožarnom ventilu broda najmanje nosivosti mora iznositi barem 0,2 MPa. Na teretnom brodu najveće nosivosti to iznosi najmanje 0,28 MPa, a na najvećem putničkom brodu 0,4 MPa.

Pored prije navedenih pumpi brod mora imati i protupožarnu pumpu za nuždu. Tipična situacija kada se koristi je požar u strojarnici, kada su ostale pumpe neupotrebljive. Stoga se ova pumpa uvijek mora smjestiti van strojarnice. To može biti prostor pramčanog pika ili prostor kormilarskog stroja. I njezin je kapacitet ovisan o nosivosti broda. Pokreće ju stroj ugrađen u istom prostoru, a danas najčešće elektromotor. Preporuka je da se upućivanje može izvršiti lokalnim uputnikom te s otvorene palube, a brodovi većih dimenzija upućivanje protupožarne pumpe u nuždi imaju i s komandnog mosta.

6.2. Pogonski cjevovodi

Broj i izvedba pogonskih cjevovoda ovisi o vrsti pogonskog stroja. Najbrojniji su i najsloženiji kada je riječ o sporookretnom dizelskom motoru pa će biti i objašnjene te izvedbe. Radi se o cjevovodima: goriva, ulja za podmazivanje, rashladne vode, komprimiranog zraka, pare (kondenzata i napojne vode), ispirnog zraka te ispušnih plinova. Posljednja dva relativno su jednostavna i u dovoljnoj mjeri opisana u poglavlju o dizelskim motorima.

6.2.1. Cjevovod goriva

Gorivo se ukrcava u skladišne ('bunker') tankove. To su tankovi dvodna, pramčani i krmeni pregradni tankovi (npr. odjeljuju prostor strojeva od tereta), visoki bočni tankovi. Njihov volumen određuje se u postupku osnivanja broda jer količina goriva koju ukupno mogu sadržavati mora predstavljati dovoljnu zalihu goriva za plovidbu između pretpostavljenih odredišnih luka, proračunskom plovidbenom brzinom (uz proračunsku potrošnju goriva), pri vanjskim uvjetima koji dodatno povećavaju potrošnju goriva (niske temperature zraka pa je potrebno više pare za grijanje, nemirno more koje povećava potrošnju) itd. Općenito postoje

¹⁸⁷ Engl. atomizing gas, obično dušik, u svakom slučaju plin koji ne podržava gorenje.

¹⁸⁸ Crvena je boja oznaka opasnosti te su elementi svih protupožarnih cjevovoda označeni tom bojom, a također i prijenosni protupožarni aparati.

skladišni tankovi teškog i lakog dizelskog goriva, iako se, u skladu s današnjim vođenjem pogona¹⁸⁹, može opravdano pretpostaviti daleko manja potreba za lakim, no za teškim gorivom.

Ukrcaj goriva (žarg. bunker, prema engleskom nazivu tankova) vrši se preko standardnih međunarodnih prirubnica i cjevovoda za punjenje s glavne palube. Oko prirubnica je uljna tava (lim, zavaren okomito na palubu) koja je u stanju zadržati manju količinu goriva u slučaju puštanja. U slučaju ispuštanja goriva u more osoblje mora poduzeti radnje prema SOPEP-u (safety oil pollution emergency plan).

Teško se gorivo ukrcava zagrijano, a lako gorivo ne nužno. Pri tome se mora voditi računa o temperaturi ukrcavanog goriva. S današnjim kompjutorski praćenim sustavima ukrcaj je olakšan jer se na monitoru kontinuirano indicira (analogno i digitalno) razina u svakom pojedinom tanku. Uobičajeno je da se na 95 % napunjenosti javlja alarm visoke razine (LAH – level alarm high), nakon čega se brzina ukrcaja smanji i nastavlja puniti do 98 % razine, kada se javlja alarm vrlo visoke razine (LAHH).

Tankovi goriva griju se parom jednostavnim cijevnim izmjenjivačem postavljenim pri dnu tanka. Zbog oblika naziva ga se cijevna serpentina. Termostatski ventili na ulasku pare u grijač puštaju količinu pare koja će postići željenu temperaturu goriva. Grijanje skladišnih tankova nije nužno potrebno provoditi cijelo vrijeme, već se može grijati samo gorivo kojeg se namjerava prebaciti u taložni tank.

Prebacivanje goriva vrši se transfer pumpom. Postoji transfer pumpa za teško i transfer pumpa za lako gorivo. Trebale bi biti po dvije, no izvedba s po jednom te slijepim prirubnicama na usisnoj i tlačnoj strani, daje jednaku sigurnost uz daleko povoljniju cijenu. U slučaju kvara jedne, transfer se ostvaruje drugom. Potrebno je skinuti slijepe prirubnice i otvoriti odgovarajuće ventile¹⁹⁰.

Taložni su tankovi prvi stupanj čišćenja goriva. Čišćenje se vrši djelovanjem sile gravitacije. Mehaničke čestice i voda talože se na dnu tanka jer su veće gustoće od goriva. Problem leži u činjenici da se brod valja, da se gorivo kontinuirano troši, da tankovi zbog smještaja moraju biti relativno visoki (pa nečistoće moraju proći veći put). Postoji jedan taložni tank za lako te jedan ili dva za teško gorivo¹⁹¹.

Sakupljene nečistoće redovito se ispuštaju otvaranjem ispusnih ventila. Ispušta se kroz lijevak (kako bi časnici stroja mogli vidjeti što ispušta) u tank taloga. Kako bi se razdvajanje pospješilo taložni tank teškog goriva grije se na oko 50°C. Iz taložnih tankova imaju usis pumpe separatora (za teško i lako gorivo), a čisto gorivo iz separatora ide u dnevne tankove¹⁹². I dnevna tanka su dva: za teško i za lako gorivo. Volumen dnevnih tankova određuje se prema potrošnji tijekom osam sati, ili drugim riječima, količina goriva u dnevnom tanku predstavlja zalihu za barem osam sati rada.

Teško gorivo u dnevnom tanku grije se na 60 – 70°C, a lako prema potrebi. Grijač je također cijevna serpentina. Lako gorivo u dnevni tank dolazi pročišćeno, postoji mogućnost ispuštanja u tank taloga¹⁹³. Prema potrošačima gorivo ide isključivo iz dnevnih tankova. Potrošači su: glavni porivni stroj ili strojevi, dizelski generatori, generatori pare, spaljivači smeća, plinske

¹⁸⁹ Glavni motor, dizelski generatori, plinske turbine, spaljivač smeća, loženi generator pare gotovo cijelo vrijeme koriste isključivo teško dizelsko gorivo. Lako se gorivo koristi u slučaju nužde (npr. ne može se zagrijavati teško) ili prilikom potpaljivanja (generatora pare, spaljivača smeća).

¹⁹⁰ Time se uštedjelo na broju pumpi. Umjesto četiri (dvije za teško i dvije za lako) ugrađene su samo dvije, a postoji mogućnost prebacivanja u nuždi.

¹⁹¹ Kada su dva, gorivo se tijekom 24 sata taloži u jednom tanku, a iz drugog se koristi.

¹⁹² Kada brod stoji, teško se gorivo ne troši ili se malo troši, može pumpa separatora usisavati gorivo iz dnevnog tanka i vraćati ga nazad.

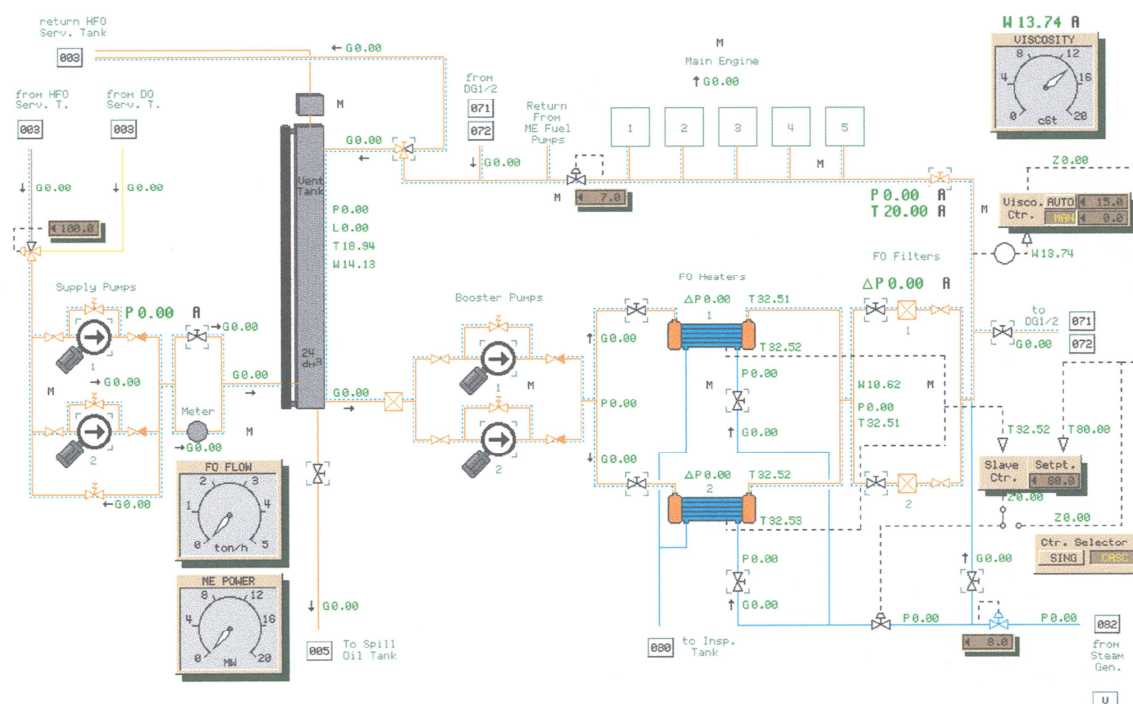
¹⁹³ Ako se probije serpentina, para će zbog višeg tlaka curiti u gorivo i tamo se kondenzirati. Kako bi se ta cijev popravila treba gorivo iz tanka ispustiti.

turbine. Svi tankovi goriva (osim tanka za miješanje) imaju odušnike koji se vode na glavnu palubu. Dizelsko gorivo ima relativno visoko plamište pa ne postoji realna opasnost nakupljanja para goriva koje bi mogle dovesti do požara ili eksplozije, ali ako se gorivo u tanku zagrijava na više temperature, cijev odušnika mora biti dovoljno visoka kako bi se pare u njoj kondenzirale i slile nazad u tank.

Priprema goriva za raspršivanje u cilindrima glavnog stroja, pomoćnih motora – generatora ili generatora pare vrši se na gotovo identičan način. Cjevovod prikazan na slici 45 opslužuje jedan sporookretni motor velike snage.

Gorivo iz dnevnog tanka siše dobavna pumpa. Postoji rješenje bez dobavne pumpe, ali u tom slučaju dnevni tank mora biti dovoljno visoko iznad cirkulacijskih pumpi. Mora postojati mogućnost rada s lakim gorivom pa se na usisnoj strani dobavnih pumpi nalazi troputni ventil za prebacivanje. Prebacivanje s teškog na lako dizelsko gorivo kod starih se pogona moralo vršiti uvijek prije početka postupka manevriranja, kako bi u cjevovodu ostalo lako gorivo. To će se danas raditi samo ako se iz nekog razloga teško gorivo ne može zagrijavati (pa postoji opasnost skrućivanja istog u cijevima) ili kod ulaska broda u dok. Neki motori rade s miješanim (mješavinom teškog i lakog goriva) gorivom te je spomenuti troputni ventil u stvari ventil mješal.

Dobavna pumpa tlači gorivo na tlak od oko 0,4 MPa. Gorivo prolazi kroz mjerac protoka, a izmjerena se veličina koristi za određivanje ukupne potrošnje goriva (u nekom duljem vremenskom periodu) te za optimiziranje plovidbe. Budući da se najčešće izvode u cijevima¹⁹⁴ te da se mogu zaprljati i blokirati, postoji mimovodni cjevovod mjeraca protoka.



Slika 45. Cjevovod goriva od dnevnih tankova do visokotlačnih pumpi glavnog porivnog stroja

U izvedbi na slici gorivo ulazi u tank za miješanje (odzračni tanka ili 'banana'), ali ima sustava gdje se odzračivanje izvodi u jednoj relativno maloj posudi s plovkom, smještenoj visoko iznad usisa cirkulacijskih pumpi. Iz tanka za miješanje, kroz usisni filter siše cirkulacijska

¹⁹⁴ Izvodi se kao propeler u cijevi koji struja goriva okreće. Protok se određuje prema broju okretaja propelera.

pumpa. Cirkulacijske i dobavne pumpe su volumenskog tipa (vijčane) pa se tvornički u kućište ugrađuje sigurnosni ventil. Na tlačnoj strani cirkulacijske pumpe su tlakovi od oko 1 MPa, koji se djelomično 'troše' na savladavanje otpora do visokotlačnih pumpi. Na usisnoj strani visokotlačnih pumpi tlak goriva bi trebao iznositi od 0,7 do 0,9 MPa. Tlak održava ventil konstantnog tlaka, koji se otvara ako je tlak previsok i pritvara ako je prenizak.

Prije visokotlačnih pumpi gorivo se zagrijava parom (teško u rasponu od 100 do 150°C, a lako se ne zagrijava ili se grije vrlo malo prili postupku prebacivanja s teškog na lako gorivo), a zatim filtrira. Tlačni filtri goriva spadaju u grupu finijih brodskih filtara, a sposobni su zaustaviti čestice veličine 30 µm i veće.

Na shemi je uočljivo da postoje po dvije dobavne pumpe, cirkulacijske pumpe, zagrijača goriva te tlačna filtra. Takva je izvedba nužna zbog propisa klasifikacijskih društava o sigurnosti poriva.

Kako se određuje količina topline koju je potrebno dovesti gorivu? To se može riješiti termostatskim ventilima, koji će grijaču puštati onoliko pare koliko je potrebno da se gorivu temperatura održava oko željene vrijednosti. Problem takve regulacije sastoji se u svojstvima različitih goriva, pri čemu se ovdje ne misli na različite gradacije, već ista teška goriva, ali različitog porijekla i sastava. Svrha grijanja nije postizanje određene temperature, već određenog kinematičkog viskoziteta, a različita će goriva (u ovisnosti o udjelu viskoznih komponenata) pri istim temperaturama imati bitno drukčiji viskozitet.

Količina topline koja se dovodi gorivu određena je položajem regulacijskog (prigušnog) ventila, a njime upravlja regulator viskoziteta ('viskorator', viskozimetar). Ovdje nema potrebe ulaziti u detalje izvedbe istih, ali treba reći da kod pada viskoziteta regulator pritvara ventil i smanjuje količinu pare koja struji kroz grijač, dok kod porasta viskoziteta otvara ventil pare.

Kako je već prije navedeno, svi vodeći proizvođači motora zahtijevaju na usisu visokotlačnih pumpi motora, viskozitet u rasponu od 6 do 17 cSt. Gorivo koje ne usiše visokotlačne pumpe, višak koji iste ispuste te manja količina iz rasprskavača vraća se u tank za miješanje. Povrat se naime, ne bi smio voditi direktno u dnevni tank jer je visokog tlaka i temperature te bi dolazilo do pjenjenja¹⁹⁵.

Kod pogona koji se vode bez prebacivanja (s teškog na lako gorivo), a uz to se brodovi kraće zadržavaju u luci, nakon što je motor zaustavljen jedna cirkulacijska pumpa nastavlja s radom. Smanjuje se željena vrijednost viskoziteta, ali se cirkulacijom goriva kroz cjevovod sprječava njegovo skrućivanje i omogućuje brže i jeftinije upućivanje motora.

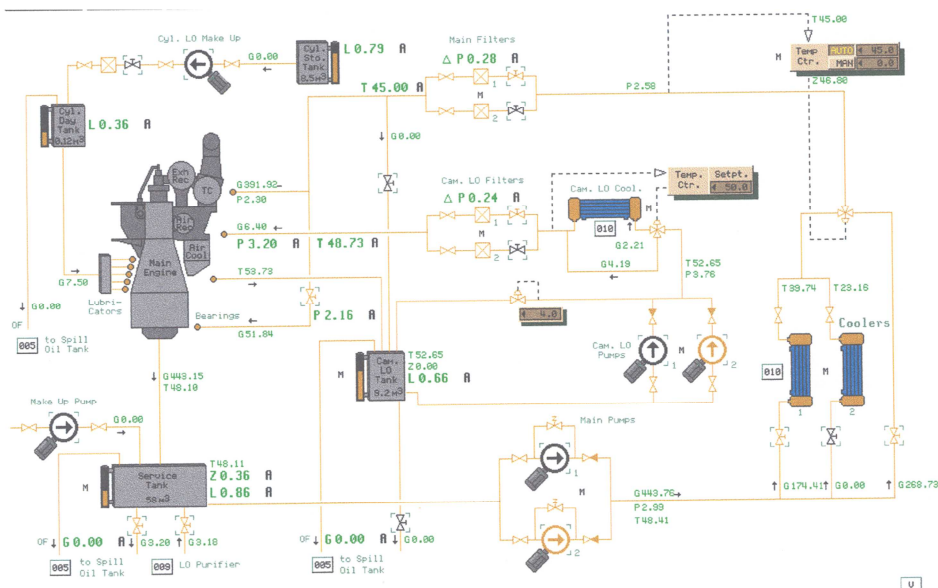
Neke se veličine prate i alarmiraju: razina u dnevnom tanku, temperatura u dnevnom tanku, tlak nakon dobavnih i cirkulacijskih pumpi, tlak i temperatura na usisu visokotlačnih pumpi, viskozitet. Aktiviranje alarma na navedenim mjernim mjestima upozorit će osoblje, prije svega stroja, o određenim greškama, no neće izazvati i zaustavljanje motora. Toga časnik palube mora biti svjestan.

6.2.2. Cjevovod ulja za podmazivanje

Sustav ulja za podmazivanje sporookretnog motora s križnom glavom sastoji se od više podsustava. Neki su fizički odijeljeni, a koriste i drukčije ulje. Odijeljeno je podmazivanje ležajeva turbopuhala (zatvoreni krug) te podmazivanje cilindara. Za podmazivanje cilindara koristi se vrlo lužnato ulje kako bi neutraliziralo kiseline nastale izgaranjem. Ostali dijelovi motora podmazuju se radom elektromotorom pogonjenih pumpi: cirkulacijske i pumpe bregaste. Dva zadnja podsustava koriste isto ulje.

¹⁹⁵ Takva mogućnost postoji, ali se koristi samo u nuždi.

Shema na slici 46 prikazuje takav cjevovod ulja. Cilindarsko ulje smješteno je u dnevnom gravitacijskom tanku, dovoljno visoko iznad lubrifikatora motora. Tank je baždaren kako bi se mogla očitavati dnevna potrošnja.



Slika 46. Shema cjevovoda ulja glavnog motora

Za razliku od cilindarskog ulja koje se pri radu motora troši¹⁹⁶ u ostalim podsustavima kontinuirano cirkulira. Glavne pumpe sišu iz slivnog tanka, smještenog u dvodnu ispod motora. Tank je sa svih strana zaštićen pregradnim tankovima, a ako mu je dno ujedno i oplata broda, mora postojati mimovod tanka na usis glavnih pumpi. U slivnom tanku mogu se nalaziti serpentine za grijanje ulja parom. Iz njega siše i pumpa separatora ulja. Ulje pročišćeno u separatoru vraća se u isti tank. Separator bi tijekom 24 sata trebao ukupnu količinu ulja u cjevovodu pročitati dva do tri puta.

Glavne pumpe su volumenskog tipa (vijčane) pa kao i u sustavu goriva imaju sigurnosni ventil. Ulje se pri radu motora zagrijava uslijed čega mu se smanjuje viskozitet. Primljenu toplinu ulje predaje slatkoj rashladnoj vodi u cijevnim rashladnicima. Temperatura ulja regulira se upravljanjem troputnim ventilom – mješačem. Regulacija se može izvoditi ručno ili automatski, PID regulatorom.

Ulje se prije ulaska u motor filtrira u tlačnim filterima. Uvijek su dva filtra, a u modernim pogonima jedan je samočistivi. Zaprljanost filtera procjenjuje se padom tlaka. Kada je razlika tlaka (pad tlaka) na ulazu i izlazu iz filtra prevelika prebacuje se na rezervni i poduzima čišćenje. Premala razlika tlaka ukazuje na neko propuštanje ili nepravilnu montažu. Finoća filtera kreće se oko 30 μm .

Kod ovakvih se motora ulje dovodi za temeljne i odzivni ležaj pri dnu kućišta motora, a postoji i dovod na križne glave. Postoji spoj s podsustavom za podmazivanje bregaste osovine koji se koristi za nadopunjavanje istog. Nadopunjavanje glavnog cjevovoda vrši se iz skladišnog tanka (pumpom za nadopunu, gravitacijski) ili izlijevanjem iz bačvi (manji pogoni).

Sustav ulja bitan je za sigurnost motora pa će poremećaj vrijednost aktivirati alarm, ali i dovesti do smanjenja okretaja motora ili čak zaustavljanja. Kao i u cjevovodu goriva treba

¹⁹⁶ Iako ima rješenja koja predviđaju sakupljanje sastruganog cilindarskog ulja u sabirnom tanku te čišćenje u posebnom separatoru.

uočiti dupliranje kapaciteta: po dvije glavne pumpe, po dvije pumpe bregaste osovine, dva rashladnika te dva tlačna filtra. Razlog je, opet, sigurnost poriva.

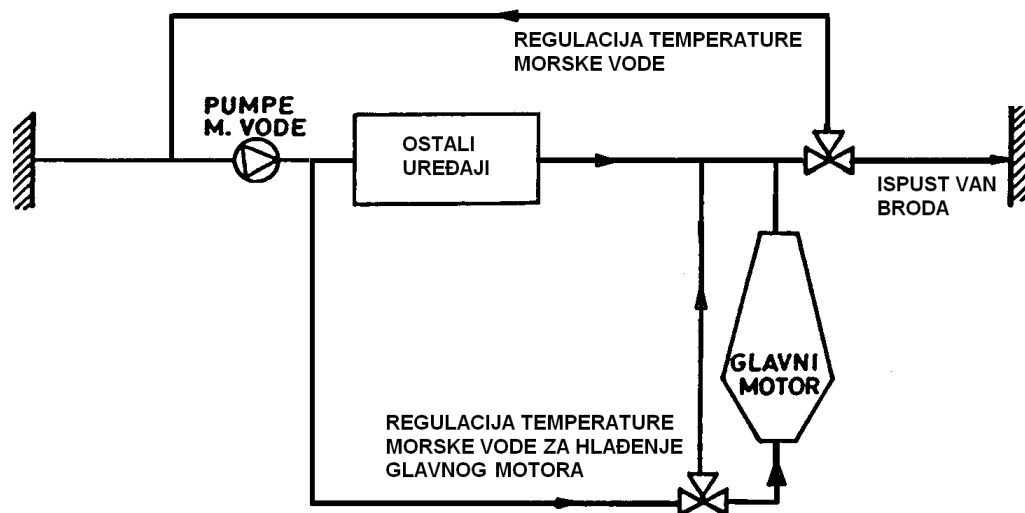
Kako se izvodi cjevovod ulja kada se poriv broda ostvaruje s dva glavna motora ili čak više njih? Da li su potrebne četiri glavne pumpe ulja? Po dvije za svaki motor. Odgovor je negativan. Ugrađuje se po jedna za svaki motor i jedna zajednička rezervna.

Kakav je cjevovod ulja pomoćnih motora – generatora (srednjeokretni dizelski motori)? Ima dvije pumpe ulja: jednu pogonjenu elektromotorom, koja se naziva pumpa predpodmazivanja i jednu privješenu. I ovdje postoje dva tlačna filtra, ali rashladnik je jedan. Postoje drugi generatori pa nije potrebno ugrađivati dva, relativno skupa, rashladnika.

Specifičnost cjevovoda ulja dizel-generatora je u automatskom radu pumpe predpodmazivanja. Brodske su elektrane automatizirane, tj. kada poraste opterećenje generatora na mreži automatski se uključuje rezervni (engl. stand-by) generator. To se treba izvesti u kratkom roku pa stroj mora biti podmazan, teško gorivo zagrijano, a cilindri predgrijani. Kada je generator u 'stand-by' načinu rada pumpa predpodmazivanja radi prema programu (npr. 30 sekundi radi pa zatim 60 sekundi ne radi), održavajući podmazanost ležajeva. Osim te uloge, pumpa će se automatski uputiti ako pri radu motora padne tlak ulja (kvar privješene pumpe).

6.2.3. Cjevovod rashladne vode

More je idealni rashladni spremnik: za ove potrebe može se reći da je neograničene veličine i velikog specifičnog toplinskog kapaciteta (dobro hladi). Stari su se motori hladili direktno, morskom vodom. Vrlo pojednostavljena shema prikazana je na slici 47. To se danas primjenjuje samo kod najmanjih strojeva. Današnji su sustavi indirektni: strojevi se hlade slatkom vodom, a ona morem. Od direktnih sustava do današnjih, modernih, indirektnih, pojavilo se više razvojnih faza, od kojih se neke još mogu vidjeti na brodovima.



Slika 47. Direktno hlađenje

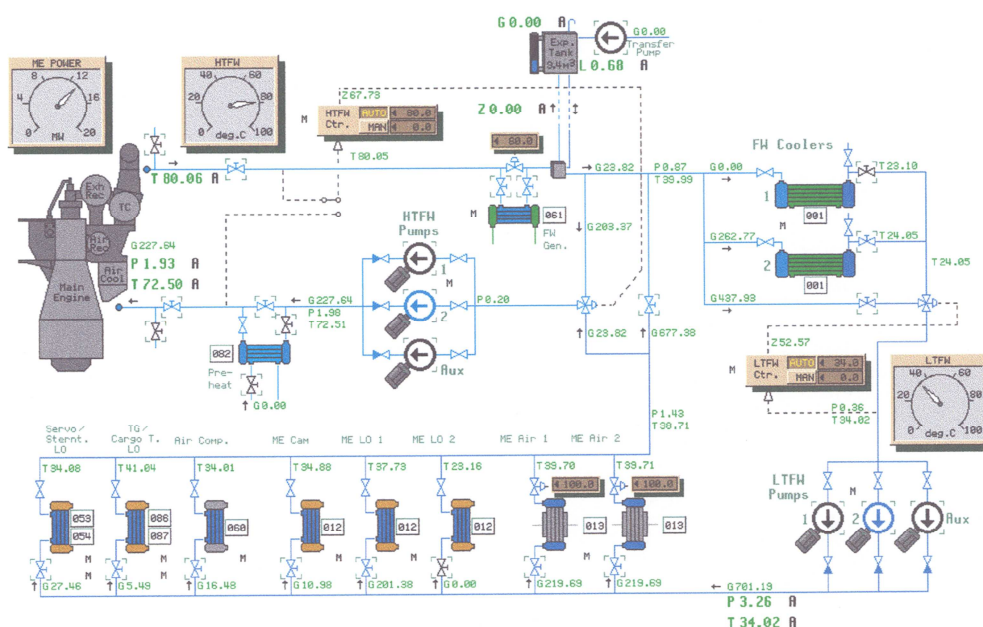
Ovdje će se objasniti jedna od novijih. Cjevovod slatke vode dijeli se u dva kruga: visokotemperaturni (VT) i niskotemperaturni (NT). VT rashladna voda hladi košuljice i glave glavnog motora i pomoćnih motora – generatora. NT rashladna voda hladi ispirni zrak i ulje glavnog motora, kompresore zraka, ulje ležajeva statvene cijevi i dr.

VT i NT voda mogu se miješati s ciljem regulacije temperature ili se u izmjenjivaču topline VT voda hladi NT vodom. Neovisno o izvedbi, slatka se voda u jednom (od dva) centralna rashladnika hladi morskom vodom.

Cjevovod slatke rashladne vode prikazan je na slici 48. U oba kruga najčešće postoje po dvije glavne pumpe (centrifugalne) i jedna, manjeg kapaciteta, lučke službe tj. pomoćna. Cjevovod je u potpunosti ispunjen vodom što se postiže visoko postavljenom ekspanzijskom posudom. U nju se vode svi odušnici¹⁹⁷, visokim položajem održava se statički tlak u cjevovodu, preko nje se vrši nadopunjavanje i dodavanje aditiva.

Temperatura VT vode regulira se troputnim ventilom (ručno ili automatski upravljanim) koji miješa povratnu VT i NT vodu. Preostala količina VT i NT vode ide u centralni rashladnik gdje se hladi morem. Temperatura NT vode također se regulira troputnim ventilom mješačem.

Prije ulaza VT vode u rashladne prostore glavnog motora paralelno je spojen predgrijač. Prije upućivanja glavni se motor mora predgrijati. U ovom se slučaju predgrijava VT vodom koju se zagrije parom¹⁹⁸. Energija koju VT voda sadržava na izlazu iz motora koristi se za proizvodnju u generatoru slatke vode o kojem se pisalo u prethodnim poglavljima.



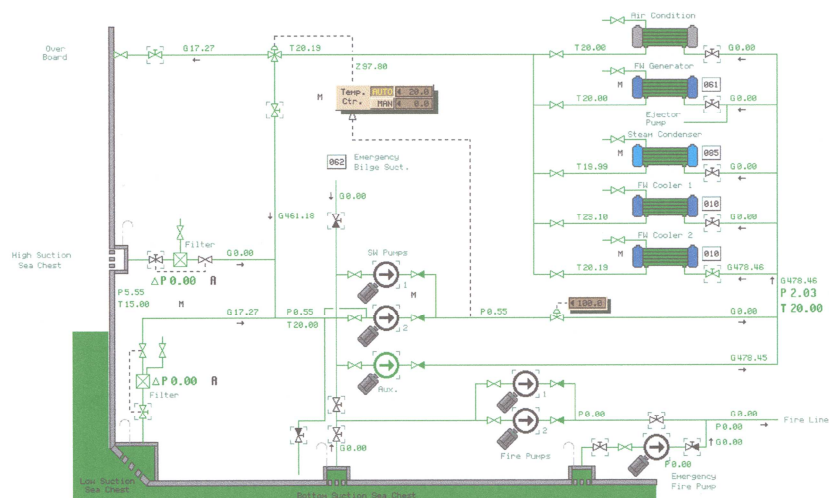
Slika 48. Cjevovod slatke rashladne vode

U jednom od dva centralna rashladnika slatka se voda hladi morem. Shema cjevovoda morske vode prikazana je na slici 49. Zbog agresivnosti morske vode ovaj se cjevovod nastoji izvesti što kompaktniji, kraći. Sve usisne košare povezuju se glavnim kolektorom morske vode. Na taj se zajednički cjevovod spajaju usisne cijevi gotovo svih pumpi morske vode: rashladne, balastne, opće službe, sanitarne, rashlade kondenzatora, generatora slatke vode. Protupožarne pumpe, a obavezno protupožarna pumpa u nuždi imaju zasebnu usisnu košaru.

¹⁹⁷ U vodi je otopljen zrak koji se pri nekim režimima može izlučiti i stvarati smetnje strujanju. Iz svih mjesta u cjevovodu u kojima bi se zrak mogao zadržati vode se odušnici u ekspanzijsku posudu.

¹⁹⁸ Kada je VT voda glavnog motora povezana s VT vodom pomoćnih, budući da u luci (ili na sidru) barem jedan pomoćni motor – generator radi, glavni se motor može predgrijati uvođenjem zagrijane VT vode iz pomoćnog motora u pogonu.

Razlikuju se niske i visoke usisne košare. U plovidbi otvorenim morem koristi se niska, a pri plovidbi plitkim kanalima visoka¹⁹⁹. Mora postojati barem jedan niski i jedan visoki usis i moraju biti smješteni na suprotnim bokovima broda²⁰⁰. Ipak, redovito su dva niska i jedan visoki.



Slika 49. Cjevovod morske vode

Direktno na usisnu košaru postavlja se usisni ('kingston') ventil kako bi se u slučaju probijanja cjevovoda mogla izvršiti potpuna izolacija. S vanjske se strane usisnih košara nalaze rešetke koje sprječavaju ulazak većih komada u cjevovod. Nakon usisnog ventila ugrađuje se usisni filter. Iako daleko finiji od rešetki, svrstava se u grube filtre. Jedna od izvedbi je perforirana ravna ploča (u kućištu), s provrtima promjera 10-tak mm, a ukupna površina svih provrta jednaka je dvostrukoj površini poprečnog presjeka cjevovoda.

Osim glavnog kolektora morske vode na usisnu su košaru spojene cijevi komprimiranog zraka i pare. Komprimirani se zrak koristi za propuhivanje košare, a parom se može izvršiti odleđivanje. Svaka košara mora imati i odušnik koji je izdignut dovoljno iznad vodene linije, a služi ispuštanju sakupljenog zraka.

Na shemi su prikazane dvije glavne pumpe morske vode velikog kapaciteta i jedna pumpa lučke službe malog kapaciteta, kao i u krugovima VT i NT slatke vode. Ovo je najčešće rješenje, ali se zbog uštede energije ponekad ugrađuje veći broj pumpi. Takvo je rješenje skuplje, ali se potrošeno brzo vraća kroz uštedu energije (goriva) za pogon pumpi. Cjevovod morske vode proračunava se za temperaturu morske vode od 32°C, a brod će prosječno tek oko 5 % vremena provesti u moru takve temperature. More će (opet statistički) uglavnom imati temperaturu od 10 do 20°C, što znači da je glavna pumpa prevelikog kapaciteta. Budući da je pumpa lučke službe premalog kapaciteta, pri nominalnom se opterećenju glavnog motora zbog rada glavne pumpe morske vode troši znatna energija.

Ušteda se može izvesti regulacijom broja okretaja. Kod najčešćih pogonskih strojeva – elektromotora, to se može izvesti promjenom broja pari polova ili promjenom frekvencije (što je skuplje rješenje). Time se mijenjaju karakteristike pumpe, ali i stupanj iskoristivosti. Drugo je rješenje da se ugradi više manjih pumpi koje se po potrebi uključuju u paralelni rad.

Morska se voda koristi za hlađenje slatke vode u centralnim rashladnicima te za hlađenje različitih kondenzatora (parno-kompresijskih rashladnih uređaja provijanta i klima jedinica, parnog sustava, destilacijskog generatora slatke vode).

¹⁹⁹ Kako se sa dna ne bi povukle nečistoće.

²⁰⁰ Zašto? Na shemi su pojednostavljeno prikazani na istoj strani.

Cjevovod morske vode je u biti protočni – more se izbacuje van broda, ali na prikazanom se cjevovodu temperatura morske vode regulira metodom recirkulacije. Dio se morske vode, zagrijane prolaskom kroz rashladnike, recirkulira na usis pumpi. Troputnim ventilom mješačem upravlja se ručno ili automatski, PID regulatorom.

Kada se radi o pogonu klase AUT1, tijekom plovidbe upravljanje je automatsko, no problem se može javiti tijekom manevriranja. Promjene su tijekom manevriranja česte i nagle pa regulator nije u stanju održavati temperaturu mora unutar željenog raspona, a poremećaj temperature mora uzrokovat će poremećaje temperature slatke vode, ispirnog zraka, ulja i dijelova motora. Zato se tijekom manevriranja podešavanje temperature morske vode vrši ručno, iz ECR.

Pumpe morske vode su, uspoređujući ih sa svim drugim pumpama na brodu, velikog kapaciteta te ovaj cjevovod ima još jednu važnu sigurnosnu funkciju. Kod prodora mora u strojarnicu koriste se pumpe kaljuže, ali ako one nisu dovoljne, mogu se koristiti pumpe rashladne morske vode. Zatvaraju se usisni ventili na kolektoru te ventil recirkulacije (jer tada nije važna regulacija temperature mora), otvara ventil za otplavlivanje strojarnice u nuždi, a mogu se startati sve pumpe rashladne morske vode.

Cjevovod morske vode izrađuje se iz sivog ili čeličnog lijeva, ugljičnog (brodograđevnog, običnog konstrukcijskog) čelika ili bakra (bronce), kako bi bio što otporniji na korozivno djelovanje mora. Čelik i lijev se zaštićuje pocinčavanjem ili premazima (na bazi epoksidnih smola npr.). Ugrađuju se i Zn-protektori. Nadalje, u morskoj se vodi nalaze manji biljni (alge) i životinjski organizmi. S porastom temperature raste i intenzitet rasta organizama na stjenkama cjevovoda te se po potrebi uključuje 'uređaj za sprječavanje obraštanja' (klorinator).

Korozija se nažalost, ne može izbjeći, no vijek trajanja cijevi može se produljiti podebljavanjem stjenki. Mogu se koristiti cijevi povećane debljine stjenke koje se po standardu hrvatske brodogradnje nazivaju cijevi ekstra debele stjenke. Ako promjer cijevi dopušta, neke se cijevi iznutra mogu obložiti gumom.

Kako je u prethodnom poglavlju navedeno, porast temperature morske vode dovest će do porasta temperature slatke vode, ispirnog zraka, ulja, ispušnih plinova pa konačno i do zaustavljanja glavnog motora. Očito je da se temperatura morske vode u cjevovodu mora održavati unutar dopuštenog raspona, no efikasnost hlađenja ovisi i o tlaku u cjevovodu.

Do iznenadnog pada tlaka u cjevovodu morske vode može doći zbog začepljenja usisne košare ili usisnog filtra, izranjanja usisne košare ili kvara pumpe. Ako je pogon automatiziran, tlačni prekidač starta rezervnu pumpu, no što ako tlak i tada ostaje nizak. Tipična situacija je plovidba plitkim kanalima. Zbog malog prostora (presjek kanala umanjen je za površinu poprečnog presjeka trupa) morska voda struji većom brzinom, a prema Bernoulli-evom zakonu mora vrijediti

$$p_s + \frac{\rho v^2}{2} = konst.$$

te dolazi do pada tlaka na usisnoj strani pumpi mora.

Nizak tlak mora na usisu pumpi dovodi do kavitacije, pumpa ne radi dobro te pada tlak na tlačnoj strani, tj. rashladni učin. Jedino moguće je smanjivanje plovidbene brzine.

6.2.4. Cjevovod komprimiranog zraka

Ovdje se prije svega misli na zrak nužan za startanje glavnog motora (uputni ili startni zrak). Komprimirani se zrak koristi i za upućivanje pomoćnih motora, propuhivanja, pogon ručnih (pneumatskih) alata, brodsku sirenu, automatiku (manevarski zrak glavnog motora) i dr.

Osnovne dimenzije ovog cjevovoda određuju se prema njegovoj glavnoj funkciji. Zrak se sakuplja u spremnicima (bocama) radom kompresora zraka. Za glavni motor moraju postojati dva spremnika ili dvije grupe spremnika. Mogu se međusobno izolirati, kako bi se polovica količine zraka koristila samo u nuždi. Manometarski tlak u spremnicima danas je najčešće 3 MPa (30 bar) i indikacija tog tlaka mora postojati na upravljačkoj konzoli glavnog motora na mostu. Dobra je praksa označiti i minimalni tlak s kojim se motor još uvijek može startati.

Sa svakim se startanjem motora troši određena količina zraka, a utrošena količina (za neki motor poznatih karakteristika) proporcionalna je trajanju procesa pokretanja. Naravno, ne bi bilo svrhovito izvesti spremnik tako da se s jednim pokušajem upućivanja motora isprazni, pa je logično da se u spremniku startnog zraka nalazi količina koja će zadovoljiti veći broj upućivanja. Za koliki je minimalni broj upućivanja motora osigurana zaliha u spremniku?

To određuju propisi klasifikacijskih društava i u osnovi ovisi o vrsti motora i propelera, tj. činjenici da li je motor prekretni ili nije, da li je propeler s fiksnim krilima ili zakretni. Kada je propeler s fiksnim krilima, svaka promjena smjera vožnje (naprijed/nazad), zahtjeva zaustavljanje i ponovno upućivanje motora. Kod takvog poriva spremnici startnog zraka moraju sadržavati pri nominalnom tlaku količinu zraka koja će omogućiti barem 12 uzastopnih upućivanja. Prekretanje kod propelera sa zakretnim krilima neće se normalno izvoditi prekretnjem motora, već hidraulički, na propeleru. Tada spremnici sadržavaju količinu zraka za barem 6 uzastopnih upućivanja glavnog motora. Ako se zrakom iz navedenih spremnika koriste i drugi potrošači, volumen im se povećava za tu potrošnju.

Spremnike startnog zraka pune glavni kompresori zraka (opet su barem dva). Glavni kompresori zraka takvog su kapaciteta da prazne spremnike ($p_{a,spr}=p_{atm}$ ili $p_{m,spr}=0$) napune do tlaka koji će osigurati traženi broj upućivanja u roku od jednog sata. Osim glavnih kompresora mogu postojati i zasebni kompresori koji pune spremnike za upućivanje pomoćnih motora – generatora. Ti su spremnici manji jer trebaju osigurati zrak za samo tri uzastopna upućivanja pomoćnih motora²⁰¹. Uvijek postoji i spremnik te kompresor radnog zraka. Taj je spremnik pod nominalnim tlakom od 0,8 MPa.

Glavni kompresori su redovito stapni, dvo ili trostepeni²⁰², a kompresor radnog zraka sve češće vijčani. Kompresori se upućuju automatski – tlačnim prekidačima spojenim na spremnik. Kada na primjer tlak u spremniku startnog zraka padne na 2,8 MPa tlačni prekidač upućuje kompresor, a kada se vrijednost tlaka povisi na 3,1 MPa (apsolutni tlak), isti tlačni prekidač isključuje kompresor.

Spremnik radnog zraka može se u nuždi puniti zrakom iz glavnih spremnika. Manometarski tlak u glavnim spremnicima je 3 MPa pa se vodi preko prigušnog ventila kako bi se tlak smanjio na tlak spremnika radnog zraka. Cjevovod mora biti izveden tako da omogućuje startanje dizelskog generatora električne energije kada su spremnici prazni.(?) Naime, kompresori su uglavnom pogonjeni elektromotorima. Kako se uspostavlja pogon ako ne rade generatori električne struje i ne mogu se uputiti jer su spremnici zraka prazni?

Jedno je rješenje pomoću generatora električne energije u nuždi. On se upućuje neovisno i može biti dovoljne snage za pogon jednog kompresora koji će puniti spremnik zraka za upućivanje glavnog dizelskog generatora. Drugo je rješenje postojanje kompresora

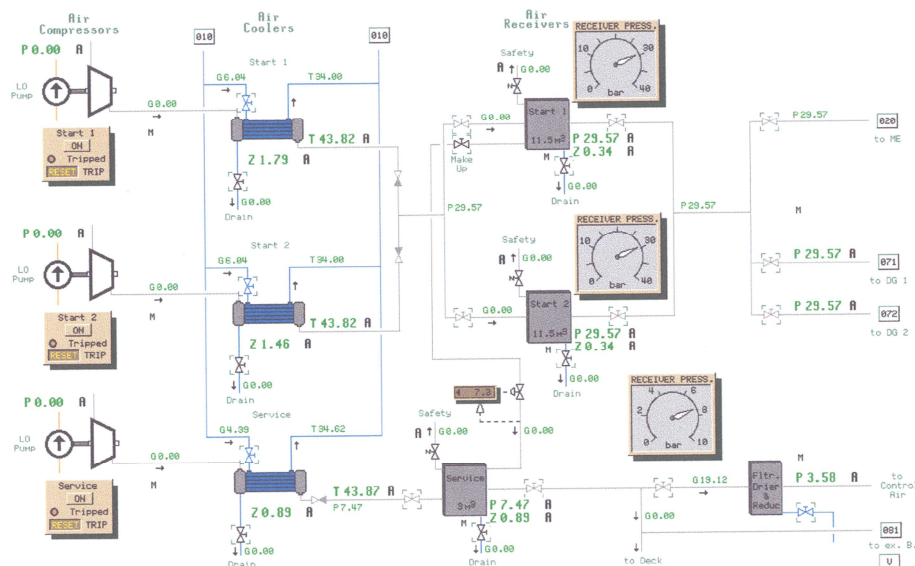
²⁰¹ Spremnici za upućivanje pomoćnih motora nisu nužni. Isti se mogu upućivati zrakom iz glavnih spremnika.

²⁰² Ima rješenja i s vijčanim kompresorima.

pogonjenog manjim dizelskim motorom koji se upućuje ručno ('kurblo'), a koji opet, puni spremnik zraka za startanje glavnog dizelskog generatora.

Očita je važnost napunjenosti spremnika startnog zraka, no zašto je važan spremnik radnog zraka? Iz ovog se spremnika 'proizvodi' (dodatnim filtriranjem²⁰³ i sušenjem) zrak za automatiku. Ako tog zraka nema ili tlak u spremniku nije dovoljan, ne mogu se ostvariti mnoge funkcije daljinskog (automatskog) upravljanja.

Shema cjevovoda komprimiranog zraka prikazana je na slici 50. Između kompresora i spremnika nalaze se rashladnici u kojima se zrak hladi slatkom NT vodom (nekad morem).



Slika 50. Shema cjevovoda komprimiranog zraka

Spremnici su posude pod tlakom te imaju sigurnosne ventile (ili rastalne pločice). Preporuka je da se ispušt iz sigurnosnih ventila vodi na otvorenu palubu, a posebno ako je protupožarna zaštita strojarne izvedena s CO₂. Kako je prije objašnjeno, CO₂ se ispušta u hermetički zatvorenu strojarnicu pa iako na prvi pogled nema opasnosti, u stvarnosti se može dogoditi da i nakon ispuštanja CO₂ temperatura i tlak u spremniku zraka narastu. Ispuštanje zraka, otvaranjem sigurnosnih ventila, moglo bi obnoviti požar u strojarnici.

6.2.5. Cjevovod pare, napojne vode i kondenzata

Ovaj je cjevovod uvršten u grupu pogonskih cjevovoda za slučaj dizelmotorne propulzije jer indirektno omogućuje rad glavnog stroja na tešku naftu. Prije je rečeno da se ista prije ubrizgavanja u cilindre, ovisno o sastavu, mora zagrijavati na temperaturu od 100 do 150°C. Dakle, para se u ovom slučaju koristi samo za grijanje goriva te je izvedba daleko jednostavnija nego na brodu s parnoturbinskom propulzijom.

Para – voda cirkulira u zatvorenom krugu: napojnu vodu pumpe tlače u generator pare, dolazi do isparivanja pa se para cjevovodom distribuira do potrošača (općenito grijača i turbina), u grijačima se kondenzira, a nakon turbina se vodi u kondenzator te se stvoreni kondenzat sakuplja u mlakom zdencu (ili tanku napojne vode). Shematski je takav sustav prikazan u prvom dijelu, a ovdje će se prikazati detaljnija izvedba (slika 51).

²⁰³ Kompresori već na usisnoj strani imaju filtre.

$$Q_{np} \geq 1,15 \cdot Q_{gp} ,$$

ako je regulacija napajanja automatizirana, a

$$Q_{np} \geq 1,5 \cdot Q_{gp} ,$$

ako nije.

Napojne pumpe su uvijek dvije, redovito jednake, a ovdje je jedna glavna i nekoliko puta većeg kapaciteta, pomoćna. Pomoćna se koristi kod velikih potrebnih kapaciteta prilikom iskrcaja tereta, kada rade turbine za pogon pumpi tereta.

Svaka od napojnih pumpi ima poseban napojni vod, a regulacija napajanja izvodi se djelovanjem na prigušni ventil. Dobro reguliranim napajanjem će se razina vode u bubnju uvijek održavati unutar željenih vrijednosti (oko sredine visine bubnja). Signal upravljačke jedinice prigušnog ventila nije samo razina vode u bubnju, već i protok pare kroz glavnu cijev te protok napojne vode.

6.3. Cjevovodi specijalne namjene

Cjevovodi specijalne namjene samo će se navesti, a detaljnija objašnjenja ostavljena su kolegijima na višim godinama studija i specijaliziranim tečajevima. Na tankerima za prijevoz ulja (sirove nafte i naftnih prerađevina) radi se o sljedećim cjevovodima: cjevovod ukrcaja i iskrcaja tereta; cjevovod posušivanja tankova i ocjeđivanja cjevovoda; cjevovod pranja tankova sirovom naftom (ili vodom); cjevovod inertiranja tankova tereta ili drugih prostora; cjevovod uzimanja uzoraka atmosfere (iz pregradnih tankova i sl.), cjevovodi grijanja i dr.

Na tankerima za prijevoz kemikalija mogu se navesti cjevovodi: ukrcaja i iskrcaja, koji je u ovom slučaju kompliciraniji jer se zbog prijevoza većeg broja različitih tereta izvodi s velikim brojem pumpi, a kada su tereti nekompatibilni, mora ih se i fizički razdvojiti; pranja tankova (morskom pa slatkim vodom); inertiranja tankova; grijanja ili hlađenja tereta; uzimanja uzoraka.

Izvedbe cjevovoda na brodovima za prijevoz ukapljenih plinova nemaju mnogo sličnosti s prethodnim, iako su po nazivima slični. Specifični su cjevovodi na ovim brodovima: ukrcaj i iskrcaj²⁰⁵ tereta; ukapljivanje tereta; inertiranje, ali ne cijelih tankova već izolacijskih slojeva; grijanja dvodna i dvoboka; uzimanja uzoraka u izolacijskim slojevima; pothlađivanja tankova prije ukrcaja tereta.

Osim prije navedenih cjevovoda, mnogi drugi, zajednički svim vrstama brodova, na tankerima su zbog pitanja sigurnosti specifične izvedbe (npr. balast i kaljuža).

²⁰⁵ Pri čemu je postupak iskrcaja ukapljenih plinova složeniji od iskrcaja npr. sirove nafte. Ukapljeni je plin lako hlapljiv pa se kod nekih rješenja tankovi tereta tlače parama.

7. LITERATURA

1. Martinović, D., Martinović, D., *Strojarski priručnik za časnike palube*, Žagar, Rijeka, 2005.
2. Martinović, D., *Brodski strojni sustavi*, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2005.
3. Pečornik, M., *Osnovi hidrauličkih strojeva*, Strojarsko-brodograđevni fakultet Rijeka, Rijeka, 1973.
4. Matković, M., *Protupožarna zaštita na brodovima*, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 1992.
5. Martinović, D., *Brodski rashladni uređaji*, Školska knjiga, Zagreb, 1994.
6. Knak, Ch., *Diesel Motor Ships Engines and Machinery*, G-E-C GAD Publishers, Copenhagen, 1979.
7. Hrvatski registar brodova, Tehnička pravila
8. Katalog tvrtke Fläkt
9. Instrukcijske knjige brodskih uređaja
10. www.pfri.uniri.hr/~pkralj
11. Kralj, P., *Priručnik dijela programa cjeloživotnog učenja za elektrotehničkog časnika broda*, Interna skripta Pomorskog fakulteta u Rijeci, 2015.