



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Katedra za strojeve i uređaje plovnih objekata

NASTAVNI MATERIJAL IZ KOLEGIJA

BRODSKI SUSTAVI

Ante Šestan
Nikola Vladimir
Ivica Ančić

Zagreb, 2024.

SADRŽAJ

1. UVOD	2
2. KLASIFIKACIJA CJEVOVODA.....	7
3. KALJUŽNI I DRENAŽNI SUSTAV	13
4. PROTUPOŽARNI SUSTAV.....	25
5. BALASTNI SUSTAV.....	32
6. MATERIJALI, VRSTE I PROIZVODNJA CIJEVI	38
7. SIMBOLIKA I OZNAČAVANJE CIJEVI I ARMATURA	46
8. METODOLOGIJA PRORAČUNA CJEVOVODA	50
8.1 Hidraulički proračun cjevovoda	51
8.1.1 Viskoznost	52
8.1.2 Laminarno strujanje	55
8.1.3 Turbulentno strujanje	59
8.1.4 Određivanje faktora otpora λ	60
8.1.5 Ukupni pad tlaka	65
8.2 Proračun čvrstoće cijevi	73
8.3 Proračun elastičnosti cjevovoda	79
8.4 Proračun toplinske izolacije	102
9. OPREMA BRODSKIH CJEVOVODA	106
9.1 Armatura brodskih cjevovoda	106
9.2 Spojevi cjevovoda	114
9.3 Brtve	123
9.4 Oslonci i ovjesi	128
10. UPRAVLJANJE ARMATUROM CJEVOVODA.....	130
11. IZRADA, MONTAŽA I ISPITIVANJE CJEVOVODA	140
12. ZAŠTITA CJEVOVODA I ARMATURE	146
13. PREPORUČENA LITERATURA	153

1. UVOD

Brodskim energetskim postrojenjima, pomoćnim strojevima i uređajima, te pojedinim dijelovima opreme ugrađenim u brod, za njihovo normalno funkcioniranje neophodna je energija. Brodski energetski sustav koristi različite oblike energije, od kemijske koja je sadržana u tekućim, plinovitim i krutim gorivima, pa do različitih sekundarnih oblika energije koji se distribuiraju putem fluida do mjesta korištenja. Nadalje, svaki uređaj ili postrojenje za svoj rad mora imati osigurano odvođenje suvišne topline, neophodno za odvijanje radnog procesa, kao i podmazivanje površina koje se međusobno taru kod gibanja.

Uskladištena goriva na brodu troše se u radnom procesu energetskih postrojenja, što uzrokuje njegovo nagibanje, pa mora postojati mogućnost da se brod ponovo može dovesti u normalan položaj.

Na brodu su u tijeku eksploatacije moguće pojave raznih oštećenja brodske konstrukcije, odnosno ugrađenih postrojenja ili uređaja. Posljedica tih oštećenja može biti prodiranje vode u trup broda u većoj ili manjoj mjeri. Moguća je također pojava požara manjih ili većih razmjera, što se na brodu sprečava primjenom raznih metoda za borbu protiv požara. Jedna od tih metoda je gašenje vodom, ali se tom prilikom upotrijebljena voda sakuplja u donjim dijelovima trupa broda. Za takve slučajeve brod mora biti osposobljen za izbacivanje vode sakupljene u njegovim najnižim dijelovima.

Posada i putnici trebaju imati osigurane normalne uvjete za život i rad na brodu. Prema tome brod se mora opskrbiti dovoljnim količinama vode, hrane i ostalih artikala putem kojih će spomenuti uvjeti biti ispunjeni. Hrana i jedan dio vode uskladišteni su unutar broda pod posebnim uvjetima da bude osigurana njihova upotrebljivost i kod visokih temperatura okoline za vrijeme dugotrajne plovidbe.

Putnički i teretni brodovi moraju biti opremljeni za samostalno ukrcavanje i iskrcavanje plinovitih, tekućih i krutih goriva, neophodnih za odvijanje energetskog procesa, te za osiguranje normalnih životnih uvjeta posade i putnika, a vrlo često i za ukrcavanje i iskrcavanje tereta. Specijalni brodovi namijenjeni za prijevoz tekućih i plinovitih tereta moraju biti opremljeni za njihovo ukrcavanje i iskrcavanje, te za prebacivanje (transfer) takvih tereta unutar broda.

Kod ratnih brodova, osim nabrojenih primjena, susrećemo se sa dodatnim zahtjevima i potrebama specifičnim za ratne brodove.

Prikazani su samo neki najvažniji primjeri u eksploataciji broda kada se pojavljuje potreba za transportiranjem nekog medija. Naglasimo za sada činjenicu, da su kod različitih tipova brodova pojedini slučajevi transportiranja medija od različite važnosti. Zajedničko je za sve primjere, da se za transport tekućine i plinova, te u pojedinim slučajevima i krutih tvari, na brodovima upotrebljavaju cjevovodi. Najopćenitije se može kazati, da tvari transportirane pomoću cjevovoda na brodu služe za:

- a. - odvijanje procesa pretvorbe energije,
- b. - sigurnost broda,
- c. - osiguranje života posade i putnika i
- d. - kao teret koji se prevozi na brodu.

U pretvorbi energije prvenstveno sudjeluju goriva. Tekuća goriva su smještena u tankovima koji mogu biti bilo gdje unutar broda, odakle ih se može crpiti pumpama. Iz opisanog rasporeda uskladištenja očita je prednost primjene tekućih goriva.

Za balastiranje broda mora također biti omogućeno prebacivanje tekućih goriva iz jednih u druge brodske tankove.

U procesu pretvorbe energije gorivo predaje veliki dio svoje energije vodi u kotlu gdje nastaje vodena para. Pomoću parovoda para se transportira prema parnim strojevima ili parnim turbinama, gdje se veći dio toplinske energije pare pretvara u mehaničku energiju. Ostatak toplinske energije sadržane u pari prelazi na rashladnu vodu u kondenzatoru. Para se ovdje hladi i kondenzira, a kondenzat se posebnim cjevovodom odvodi u tankove napojne vode.

Napojna voda se iz tanka transportira kroz napojni cjevovod u parni kotao radi ponovnog privođenja u krug procesa stvaranja vodene pare za pogon parnog stroja. Za punjenje tankova napojne vode potreban je poseban cjevovod za dovod sa kopna ili drugog objekta, a kod većih brodova je ugrađen i uređaj za destilaciju morske vode radi dobivanja napojne vode.

Kod motora s unutarnjim izgaranjem, potrebno je vodom hladiti dijelove koji su podvrgnuti visokim toplinskim opterećenjima radi održavanja dopuštenih temperaturnih granica za rad motora. Hlađenje motora može se vršiti morskom vodom ili slatkom vodom, ali slatku vodu tada treba hladiti morskom vodom. Ovdje se, prema tome, susrećemo sa primjenom cjevovoda rashladne vode.

Izgaranjem krutih, tekućih ili plinovitih goriva u ložištu kotla nastaju plinovi izgaranja. Plinove izgaranja treba dimovodom odvesti izvan broda u okolinu. Ispušni plinovi iz motora s unutarnjim izgaranjem odvođe se u atmosferu kroz ispušne lonce i ispušne cijevi. Kod većih brodova, ovi

ispušni plinovi sa temperaturom od 180 do 580 °C vode se kroz tzv. kotao na ispušne plinove. U kotlu se toplinska energija iz plinova koristi za proizvodnju pare koja služi za potrebe pomoćnih strojeva i uređaja ili za grijanje prostorija.

Između tarnih ploha u strojevima dolazi do trenja koje troši energiju. Rezultat toga je zagrijavanje sa štetnim posljedicama, ako je iznad dopuštenih granica. Sa ciljem smanjenja trošenja energije i zagrijavanja koristi se ulje za podmazivanje smješteno u tankovima broda. Iz tankova se putem pumpi i cjevovoda ulje za podmazivanje dovodi u pojedine dijelove strojeva, odakle izlazi zagrijano i onečišćeno. Onečišćenja mogu biti od vode, čestica metala ili od krutih čestica nastalih izgaranjem u cilindru motora. Zato se ulje mora hladiti pomoću rashladnika s morskom vodom i pročišćavati u filterima i separatorima.

Upućivanje velikih brodskih dizelskih motora vrši se pomoću komprimiranog zraka. Zrak dobavlja kompresor i putem cjevovoda ga tlači u boce komprimiranog zraka, a odavde se putem drugih cjevovoda transportira do mjesta upotrebe.

Za kormilarenje sve češće se koriste hidraulički kormilarski uređaji. Ovdje je ponekad potreban cjevovod medija za daljinski prijenos komandi sa zapovjedničkog mosta do kormilarskog uređaja na krmi, a uvijek je potreban cjevovod radnog medija za zakretanje kormila. Kao pogonska energija za kormilarske strojeve može se koristiti električna energija, hidrauličko ulje ili komprimirani zrak.

Kroz različite otvore na brodskoj oplati može prodirati voda u trup broda (npr. kroz statvenu cijev), jer je nemoguće na svim takvima mjestima postići apsolutnu nepropusnost. Sa palube u trup broda može također prodrijeti oborinska voda ili voda od valova, koji se kod plovidbe po uzburkanom moru prelijevaju na palubu. Unutar broda na mnogim površinama, gdje za to postoje uvjeti, dolazi do kondenzacije vlage iz zraka naročito u područjima sa visokim postotkom relativne vlažnosti. Nadalje, svaki cjevovod ugrađen u brod može biti djelomično propustan, pa će iz njega istjecati određena količina tekućine. Osjetnije količine raznih tekućina mogu prodrijeti iz cjevovoda u unutrašnjost broda ako dođe do puknuća cijevi, te kod demontaže određenih dijelova cjevovoda za vrijeme remonta. Ukupna količina tekućeg otpada nastala propuštanjima i procurivanjima sakuplja se u najnižim dijelovima broskog trupa i kaljužnim pumpama prebacuje u tankove kaljuže. Za sakupljanje i izbacivanje tako prikupljenog tekućeg otpada služi kaljužni cjevovod.

Gašenje požara na brodu obavlja se morskom vodom, inertnim plinovima i drugim sredstvima efikasnim za borbu protiv požara. Inertni plinovi su za tu svrhu uskladišteni u posebne čelične boce smještene kao baterija na jednom mjestu u brodu. Odavde se posebnim cjevovodom transportiraju u one prostore, gdje se predviđa gašenje požara sa inertnim plinovima. Za potrebe gašenja požara vodom ugrađene su posebne protupožarne pumpe, koje posredstvom

protupožarnog cjevovoda dobavljaju vodu na razna mjesta na brodu. U tom slučaju se veća količina sakuplja u kaljuži broda. Nadalje, veća količina vode dolazi u kaljužu i kod prodora morske vode kroz oštećenja na oplati trupa. Za izbacivanje sakupljene vode unutar trupa broda u tim slučajevima, uobičajena je upotreba izraza 'dreniranje', pa otuda i montaža u brodu drenažnog cjevovoda.

Teretni i putnički brodovi imaju kaljužni cjevovod dimenzioniran tako, da su zadovoljene i potrebe drenaže, pa su obje potrebe riješene montažom jednog cjevovoda. Kod ratnih brodova postoji vjerojatnost velikih prodora vode, pa se ovdje izvodi još i poseban cjevovod, tzv. velika drenaža, za izbacivanje velikih količina vode iz trupa broda.

Kod visokih temperatura okoline povećava se opasnost za pojavu požara, npr. na tankerima, te u prostorima za streljivo na ratnim brodovima. Za sprječavanje porasta temperature, na palubi tankera i u prostorima za streljivo ugrađen je poseban cjevovod za škropljenje (polijevanje). Osim toga, ugrađen je i poseban sustav cjevovoda za naplavljivanje prostora za streljivo.

Brod se mora dovesti u približno horizontalan položaj i kod različitog razmještaja tereta. Za tu svrhu koristi se voda smještena u tankovima dvodna kao balast, a za raspodjelu balastne vode po balastnim tankovima ugrađuje se u brod poseban cjevovod, tzv. balastni cjevovod.

Za osiguranje normalnih životnih uvjeta posade i putnika, na brodu se ugrađuju cjevovodi (vodovodi) vode za piće i kuhanje, slatke vode za pranje i umivanje, te morske vode za sanitarne uređaje. Nadalje, otpadne vode iz kuhinje i sanitarnih uređaja treba sakupljati i odvoditi van broda ili u posebne tankove u donjem dijelu broda, odakle se zatim otpadne vode izbacuju na propisima dozvoljeni način. Za to je potreban poseban cjevovod otpadnih voda.

Ugodniji boravak u pojedinim prostorijama zimi i ljeti osiguravaju ugrađeni cjevovodi za grijanje, te ventilacijski kanali. Danas se sve više prakticira da se u ventilacijski sustav u prostorija za boravak posade i putnika ugrađuje i uređaj za klimatizaciju.

Prijenos vijesti i komandi iz jednog u drugi prostor broda (komandni most – strojarnica, strojarnica – kotlovnica kod parobroda) obavlja se pomoću sustava veza.

Iz prethodnog opisa očito je, da su na brodu cjevovodi mnogobrojni. Ukupna duljina svih ugrađenih cjevovoda nekoliko je puta veća od duljine broda. Dobro poznavanje brodskih cjevovoda neophodno je za razumijevanje funkcije i pogona brodskih strojeva i uređaja, te za pravilno korištenje broda kao transportnog sredstva na vodi.

Kod cjevovoda za transport goriva za rad energetskog postrojenja, gubitci eksergije (smanjenje tlaka i temperature) uzrokuju povećanje potrošnje goriva. Prema tome ekonomičnost brodskih energetskih postrojenja (osnovne investicije, pogonski troškovi) ovisi o karakteristikama sustava cjevovoda, njihovog rasporeda, dimenzija (promjer, duljina) i materijala od kojih su izrađeni. Važan dio sustava cjevovoda je i armatura, koja služi za reguliranje protoka i njihovih parametara (regulacijski, prigušni i redukcijski ventili), za isključivanje pojedinih dijelova cjevovoda (zaporni ventili, zasuni), te za zaštitu cjevovoda i uređaja od nedozvoljene promjene parametara (sigurnosni ventili).

Pouzdanost rada brodskih energetskeg postrojenja ovisi o pouzdanosti njihovih cjevovoda, budući da ispadanje iz pogona pojedinih dijelova cjevovoda uzrokuje smanjenje snage ili čak potpuni prestanak rada agregata.

2. KLASIFIKACIJA CJEVOVODA

Primarna klasifikacija cjevovoda moguća je prema vrsti transportiranih tvari. Kod brodskih cjevovoda to su krute, tekuće i plinovite. Ovakva podjela pogodna je za hidraulički proračun cjevovoda, s obzirom da isti ovisi o vrsti medija, a ne i o namjeni cjevovoda.

Na brodovima se prakticira transportiranje i krutih tvari, na primjer kod ukrcavanja i iskrcavanja tereta (žito, željezna ruda, razni drugi sipki i sitni materijali). No, za te svrhe brod redovito nije opremljen odgovarajućim vlastitim cjevovodom, već se takav uređaj nalazi na kopnu. To su tzv. pneumatski elevatori za transportiranje sipkog tereta pneumatskim putem iz broda na kopno ili obratno.

Kroz najveći broj brodskih cjevovoda transportiraju se razne tekućine, a grubo ih se može podijeliti u tri grupe: voda, razne vrste ulja i otpadne vode.

U grupu voda dolaze u obzir slatke vode (voda za piće, voda za pranje i napojna voda za kotlove) i morska voda. Slatka voda normalno nema značajnijeg upliva na materijal cjevovoda. Morska voda, zbog sadržaja soli, djeluje kao elektrolit, pa kod primjene dva različita metala može uzrokovati galvansku koroziju onog sa nižim elektrokemijskim potencijalom. Pojačano korodiranje materijala cijevi uzrokovat će i kisik otopljen u vodi. Spomenimo, da morska voda crpljena neposredno iz mora ima u sebi više upijenog zraka od one, koja je odstajala u tankovima broda.

Kroz cjevovode na brodu transportiraju se ulje za podmazivanje, teško gorivo za pogon dizelskih motora, plinsko ulje i benzin, zatim kod tankera kao teret sirova nafta i njeni derivati, a kod posebno opremljenih trgovačkih brodova životinjsko i biljno ulje. Sva ta ulja, u pravilu, nisu agresivna prema materijalima cjevovoda. Neke vrste ulja su kod normalnih temperatura slabo ili nikako tekuća, jer imaju visoki viskoznošću. Zbog toga se kod njih moraju poduzeti posebne mjere (grijanje) u svrhu smanjenja viskoznosti i omogućavanja njihovog laganog transportiranja kroz cijevi.

U otpadnim vodama iz sanitarnih uređaja ima organskih tvari, koje sadrže agresivne organske kiseline. O tome se mora voditi računa kod odabira materijala za cijevi sanitarnih cjevovoda.

Grupa plinovitih medija obuhvaća zasićenu i pregrijanu paru, zrak, ispušne plinove dizelskog motora, plinove izgaranja u kotlu, plinove za gašenje požara i plinove za rashladne uređaje. Nabrojene plinovite tvari normalno nemaju upliva na materijal cijevi, odnosno za upotrebu se biraju plinovi inertni prema materijalima cjevovoda.

Daljnje mogućnosti klasifikacije brodskih cjevovoda su prema njihovoj namjeni, prema visini radnog tlaka odnosno temperature, prema ulozi u osiguranju sigurnosti broda, prema stupnju automatizacije u radu itd. Prema namjeni brodski cjevovodi se mogu svrstati u 7 osnovnih grupa, i to:

2.1 – Sustavi cjevovoda koji služe za normalno funkcioniranje brodskog energetskeg postrojenja – ovdje pripadaju sljedeći cjevovodi:

2.11 – parovodi (glavni, pomoćni, ispušni)

- 2.12 – kondenzatno-napojni
- 2.13 – rashladni (za glavne i pomoćne strojeve)
- 2.14 – cjevovodi za gorivo i grijanje goriva
- 2.15 – cjevovodi za ulje za podmazivanje
- 2.16 – ispušni cjevovod dizelskog motora, dimnjaci kotlova
- 2.17 – cjevovodi za komprimirani zrak
- 2.18 – cjevovodi ventilacijskih sustava u strojarnici i kotlovnica
- 2.19 – cjevovodi za protiskivanje i otpjenjavanje kotlova

2.2 – Sustavi za sigurnost broda, gdje se ubrajaju:

- 2.21 – kaljužni i drenažni sustavi
- 2.22 – balastni sustav
- 2.23 – protupožarni sustav s morskom vodom
- 2.24 – sustav inertnih plinova za gašenje požara
- 2.25 – sustav pare za gašenje požara
- 2.26 – sustav za gašenje požara pjenom
- 2.27 – sustav za naplavlivanje i škropljenje palube kod tankera
- 2.28 – parovodi za sidrena i pritezna vitla
- 2.29 – uređaji za signalizaciju požara

2.3 – Sustavi cjevovoda za sanitarne potrebe, sa sljedećim podgrupama :

- 2.31 – slatka voda za pranje
- 2.32 – morska voda za ispiranje
- 2.33 – krcanje i iskrcavanje slatke vode
- 2.34 – otpadne vode svih vrsta

2.4 – Sustavi cjevovoda za postizanje normalnih uvjeta života posade i putnika na brodu – ovdje pripadaju:

- 2.41 – pitka voda
- 2.42 – ventilacija i klimatizacija
- 2.43 – grijanje prostorija parom ili toplom vodom
- 2.44 – rashladni uređaji spremišta za hranu

2.5 – Sustavi cjevovoda za komprimirani zrak, sa sljedećim podgrupama:

2.51 – komprimirani zrak visokog tlaka

2.52 – komprimirani zrak srednjeg tlaka

2.53 – komprimirani zrak niskog tlaka

2.54 – cjevovodi automatike

2.6 – Specijalni sustavi cjevovoda za tekući i plinoviti teret, gdje se ubrajaju:

2.61 – ukrcavanje i iskrcavanje tekućeg tereta

2.62 – ukrcavanje i iskrcavanje plinovitog tereta

2.63 – prebacivanje tekućeg tereta unutar broda

2.64 – prebacivanje plinovitog tereta unutar broda

2.65 – grijanje i hlađenje tekućeg tereta

2.66 – cjevovod za pranje tankova

2.67 – cjevovod za inertizaciju tankova

2.7 – Sustavi cjevovoda za razne namjene – ovdje pripadaju:

2.71 – parovodi za teretna vitla i druge palubne strojeve

2.72 – cjevovodi za kormilarske uređaje

2.73 – cjevovodi hidraulike

2.74 – govorne cijevi

2.75 – odušnici, preljevi, sondiranje

2.76 – odljevi sa paluba

2.77 – cjevovodi signalizacije (kaljuža, automatika, stanje u tankovima tankera itd.)

Prikazana klasifikacija sustava cjevovoda prema njihovoj namjeni niti izdaleka nije pružila cjelovit pregled svih sustava cjevovoda, koji se pojavljuju na raznim tipovima putničkih, teretnih i ratnih brodova. To joj nije niti bila namjera. Sigurno je, da se kod pojedinih tipova broda specijalne namjene, pojavljuju i drugi sustavi cjevovoda, koji čak mogu imati važnu ulogu na određenom tipu broda. Nadalje, nisu navedeni niti svi sustav cjevovoda od manjeg značaja, a susrećemo ih na današnjim brodovima. Kod izrade prikazane klasifikacije namjerno nije učinjen pokušaj da se cjevovodi strogo svrstaju po važnosti namjene, jer se ova razlikuje u ovisnosti o tipu broda.

Pažljivim razmatranjem izložene klasifikacije može se primijetiti, da se između osnovnih grupa ne mogu povući oštre granice i da postoje međusobna prekrivanja u većoj ili manjoj mjeri. To pokazuje, da novi pokušaji sastavljanja nekih drugih klasifikacija prema namjeni, nikada ne bi uspjeli tako odabrati osnovne grupe sustava cjevovoda, između kojih ne bi bilo apsolutno nikakvih prekrivanja.

Radni tlak i radna temperatura imaju bitan utjecaj na konačne rezultate kod bilo koje vrste proračuna čvrstoće brodskih cjevovoda. Zbog toga će se još učiniti pokušaj klasificiranja brodskih cjevovoda prema ta dva parametra.

Kod brodskih cjevovoda pojavljuje se veliki raspon vrijednosti radnih tlakova, počevši od podtlaka u kondenzatorima parnih turbina, pa do vrlo visokih tlakova kod cjevovoda komprimiranog zraka na ratnim brodovima. Radni tlak u cjevovodu sastoji se od dvije veličine. Prva je iznos vrijednosti tlaka u cjevovodu kada u njemu nema strujanja, a druga je iznos tlaka potreban za savladavanje otpora prilikom strujanja medija kroz cjevovod.

Vrijednosti tlaka u cjevovodima za cirkulaciju rashladne morske vode definirane su visinom stupca vode, koji odgovara visini od plovne linije do izljeva izvan praznog broda, i otporom strujanja u cjevovodu. U istu skupinu prema vrijednostima tlaka svrstavaju se kaljužni, drenažni i balastni cjevovod, te cjevovode za transfer tekućina unutar trupa broda. Prema veličini broda, ovi tlakovi iznose 10 do 30 metara stupca vode, odnosno cca 0,1 do 0,3 MPa.

Kod dizanja tekućine u neki gravitacijski tank, ukupna vrijednost tlaka u cjevovodu sastoji se od tlaka stupca tekućine uvećanog za visinu otpora strujanja. Tekućina iz gravitacijskog tanka na mjestu potrošnje istječe uslijed vlastite težine.

Vrijednost tlaka u protupožarnom cjevovodu odgovara najvišoj točki broda gdje se mora predvidjeti gašenje požara. No vrijednost tlaka nije viša od 1,0 MPa, tako da se to može smatrati gornjom granicom tlaka u većini brodskih cjevovoda za transportiranje vode.

Veći tlakovi postoje u cjevovodima svježe pare, gdje se, ovisno o željenoj energetske učinkovitosti, mogu postići i vrlo visoke vrijednosti. Na suvremenim brodovima tlakovi svježe pare iznose oko 4,0 MPa, a ima brodova sa tlakovima od 10 i više MPa. Radni tlakovi svježe pare ujedno su i radni tlakovi napojnih cjevovoda kotlova. Točnije, tlak napojnih cjevovoda mora biti nešto viši radi savladavanja otpora u njemu.

Na brodovima, gdje je glavni parovod sa visokim vrijednostima radnog tlaka, cjevovodi svježe pare za pomoćne brodske strojeve i uređaje redovito imaju znatno niže radne tlakove, pogodne za pomoćne brodske strojeve. Ti tlakovi su obični niži od 2,0 MPa.

Vrijednost tlaka zraka kod uređaja zraka za upućivanje dizelskih motora iznosi 3,0 MPa.

U istim granicama nalaze se i radni tlakovi komprimiranih plinova rashladnih uređaja.

Posebno treba izdvojiti cjevovode sa radnim tlakom manjim od okolne atmosfere. To su svi cjevovodi ispušne pare izravno spojeni sa kondenzatorom. Kod parnih turbina podtlak iznosi do 95 kPa (apsolutni tlak 5,0 kPa). Navedeni tlakovi istovremeno su radni tlakovi kondenzatora, te radni tlakovi u cjevovodima za odzračivanje i crpljenje kondenzata iz kondenzatora.

Iz izloženog sljedi zaključak, da se u odnosu na vrijednosti radnog tlaka, brodski cjevovodi mogu svrstati u tri grupe i to: one koji rade sa podtlakom, one kojima je radni tlak do 1,0 MPa i cjevovode sa radnim tlakom većim od 1,0 MPa.

Tvrdnja da kod brodskih cjevovoda postoji veliki raspon vrijednosti radnih tlakova, u potpunosti vrijedi i za radne temperature.

Kod najvećeg broja brodskih cjevovoda radna temperatura jednaka je temperaturi okoline. To je većina cjevovoda pitke, slatke i morske vode, te raznih vrsta ulja. Rashladna voda se u izmjenjivačima topline ugrije za nekoliko desetaka stupnjeva Celzijusa, ali je redovito ispod 48 °C. Kod ulja za podmazivanje radne temperature su u istim granicama. Temperatura zagrijavanja teških ulja, radi omogućavanja njihovog transportiranja kroz cijevi, otprilike se kreću u istim granicama.

Topla voda je na brodu potrebna u kupaonicama i umivaonicama. Vrlo često se razvodi već zagrijana, iako za njezino zagrijavanje postoje i druga rješenja, npr. ugradnja posebnih grijača na mjestu upotrebe. Temperatura tople vode većinom je ispod 100 °C. U istu grupu temperatura mogu se svrstati i cjevovodi gorivo za dovod goriva u rasprskalice na kotlovima, te cjevovodi teškog goriva za pogon dizelskih motora. Temperature predgrijavanja teškog goriva iznose cca 130-140 °C.

Radne temperature cjevovoda za transportiranje pare (parovoda) znatno su više. Temperature zasićene pare ovise o njezinom tlaku i prema tablici za toplinska svojstva pare, na primjer, iznose:

Tlak (MPa)	Temperatura zasićenja (°C) (Zaokružene vrijednosti)
0,1	100 (373K)
1,6	201 (474K)
2,0	212 (485K)
4,0	250 (523K)

Temperature pregrijavanja pare iznose cca 480 – 530 °C i danas su već uobičajene.

Na današnjim brodovima, posebno ratnim, sve češće se ugrađuju plinske turbine za pogon broda. Kod ovih uređaja, u cijevima za dovod plinova izgaranja iz komore izgaranja do plinske turbine susrećemo se sa najvišim temperaturama do cca 750 °C, ali sa relativno nižim radnim tlakom.

U dimovodima za odvod plinova izgaranja iz kotlova, radne temperature su jednake izlaznim temperaturama plinova iz kotlova. Ovisno o tipu kotla, njegovom opterećenju i o iskorištenju topline plinova izgaranja, ove temperature iznose od 180 do 330 °C. Dimovodi redovito ne zadaju ozbiljne poteškoće, jer se kao kratki i široki kanali često provode kroz nepristupačne prostore na brodu. Plinovi izgaranja u njima su pod malim pretlakom, pa su eventualna propuštanja redovito beznačajna.

Visina radnih temperatura za odvod ispušnih plinova iz motora s unutarnjim izgaranjem ovisi o tipu motora i njegovom opterećenju. Kod četverotaktnih Otto motora temperature ispuha su najviše i iznose oko 750 °C. Kod četverotaktnih dizelskih motora temperature su gotovo upola manje, a kod dvotaktnih one iznose oko 350 °C. Sa smanjenjem opterećenja motora, smanjuju se i temperature ispuha. Za razliku od dimovodnih kanala, cjevovodi ispušnih plinova redovito su

duži, a i radni tlak im je osjetno veći (oko 50 kPa pretlaka). Zbog toga, cjevovodi za odvod ispušnih plinova rade pod težim uvjetima od dimovoda.

Svi brodski cjevovodi sa radnim temperaturama iznad 60 °C, u pravilu, moraju biti pažljivo i dobro izolirani. Kod jednog dijela, njihovo izoliranje treba provesti radi smanjenja gubitaka toplinske energije. Kod svih pak, izoliranje mora biti provedeno radi sprečavanja mogućnosti pojave opekotina kod posade. Ovaj zahtjev se naročito odnosi na pristupačne cjevovode, smještene u neposrednoj blizini prolaza i galerija. Djelomično odstupanje od zahtjeva za postavljanjem izolacije iznad naznačene temperature, moguće je jedino kod dimovoda kotlova i zagrijanih cjevovoda postavljenih u nepristupačne prostore, ako se može dozvoliti pojačano zagrijavanje okolnog ambijenta.

Dok visoke radne temperature cjevovoda uzrokuju dodatne zahtjeve kod njihovog projektiranja i gradnje, a mogu predstavljati i poteškoće u pogonu, niske temperature okolnog ambijenta opasne su za neke cjevovode baš onda, kada nisu u upotrebi. Takav slučaj je prvenstveno kod cjevovoda pitke i slatke vode, a nešto manje kod cjevovoda morske vode. Za slatku vodu opasne temperature su u području ledišta a za morsku nešto niže.

Najjednostavnija zaštita cjevovoda od niskih temperatura je njihovo potpuno ispražnjenje. Ako to nije moguće, onda tekućinu treba držati u stalnoj cirkulaciji i to tako, da jednim dijelom svoga toka prolazi kroz uređaj za grijanje ili kroz grijane prostorije. Ovdje ona prima toplinu a gubi je zatim u dijelu cjevovoda, koji prolazi kroz hladne dijelove broda. Isti efekt postiže se kod vođenja cjevovoda samo kroz grijane prostorije, odnosno njegovim adekvatnim izoliranjem. Zbog navedenih opasnosti klasifikacijska društva u svojim pravilima propisuju posebne zahtjeve za način polaganja cjevovoda, na primjer, u blizini rashladnih prostorija na brodu.

3. KALJUŽNI I DRENAŽNI SUSTAV

Osnovna namjena kaljužnog cjevovoda je crpljenje i izbacivanje vode sakupljene u kaljužu strojarnice, kotlovnice, skladišta, u koferdamima i u ostalim najnižim mjestima trupa broda. Ova voda može potjecati uslijed propuštanja spojeva na oplati, propuštanja sa paluba, propuštanja spojeva raznih cjevovoda i kao posljedica gašenja požara na brodu. U slučaju prodora vode u brod zbog oštećenja oplata, kaljužnim cjevovodom se mogu izbaciti određene količine vode i na taj način se može održavati plovnost broda. Tada se koristi i za održavanje plovnosti broda.

Ako prvenstveno treba služiti za izbacivanje prodrlih voda, kao što je slučaj na ratnim brodovima, nazivamo ga drenažni cjevovod.

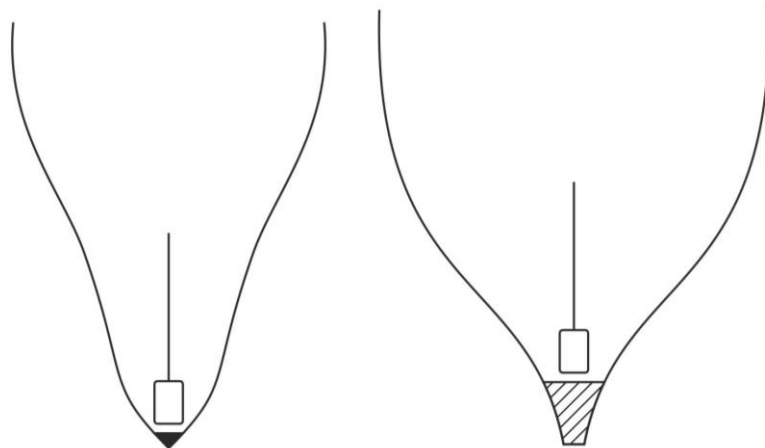
Naglasimo da sva klasifikacijska društva u svijetu, u svojim pravilima za gradnju brodova posebnu pažnju posvećuju kaljužnom cjevovodu, koji je kod teretnih i putničkih brodova ujedno i drenažni cjevovod. U nastavku će biti prikazane samo neke važnije odredbe iz HRB-a i većih klasifikacijskih društva.

Voda u kaljuži je redovito onečišćena sa raznim uljima i raznim otpadnim materijalima, naročito u strojarnicama i kotlovnicama. Međutim, IMO-MARPOL konvencija o zaštiti mora od zagađivanja više ne dozvoljava izbacivanje onečišćene vode iz broda u more. Svi brodovi moraju imati ugrađene uređaje za pročišćavanje vode iz kaljuže prije njezinog izbacivanja u more, dakle na tlačnom dijelu kaljužnog sustava.

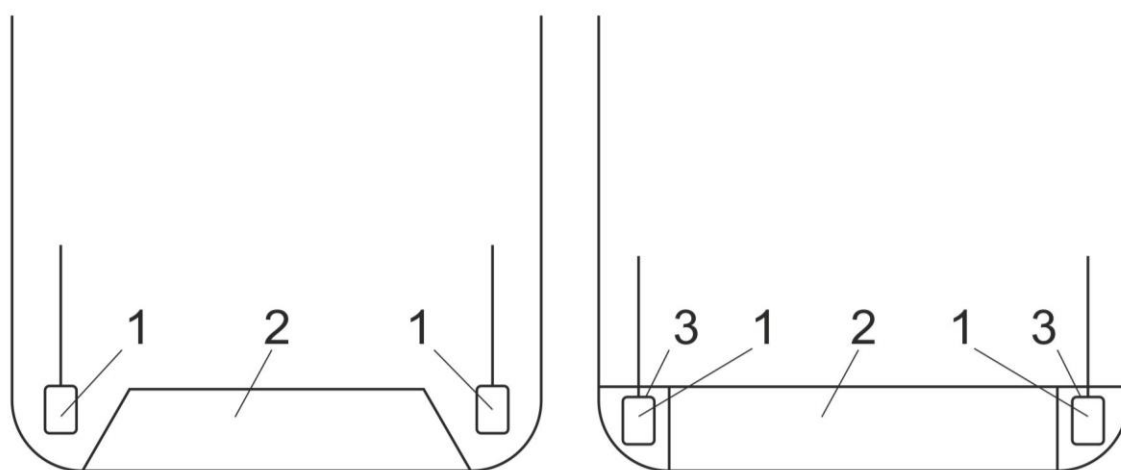
Kaljužni i drenažni cjevovod sastavljen je od:

- usisnih cijevi za svaki brodski prostor omeđen nepropusnim pregradama,
- ventilskih stanica gdje se sastaju usisne cijevi,
- pumpi,
- tlačnih cijevi za izbacivanje vode izvan broda.

Kaljužni cjevovod počinje sa usisnim košarama. Njihov smještaj u brodu mora omogućiti, da se kroz njih sigurno može crpiti nakupljena voda u kaljuži. U tu svrhu dovoljan je po jedan usis u uskim prostorima pramca i krme (Slika 3-1). U širokim dijelovima broda, gdje kod bočnog nagiba jedan usis ne može usisati svu vodu, postavlja se po jedna usisna košara (1) sa svake strane dvodna (2) (Slika 3-2). Ako je dvodno (2) ravno, na podesnim mjestima treba predvidjeti bunare (3) uz desni i lijevi bok, gdje se slijeva kaljužna voda. Brod je obično zatežan, pa usise kaljuže treba postaviti na krmeni dio svakog prostora.

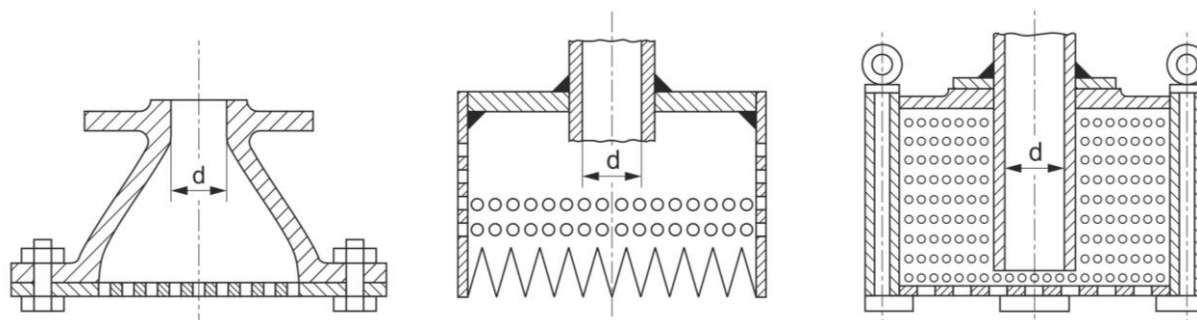


Slika 3-1 Usisne košare kaljužnog cjevovoda na pramcu i krmi



Slika 3-2 Usisi cjevovoda u dvodnu

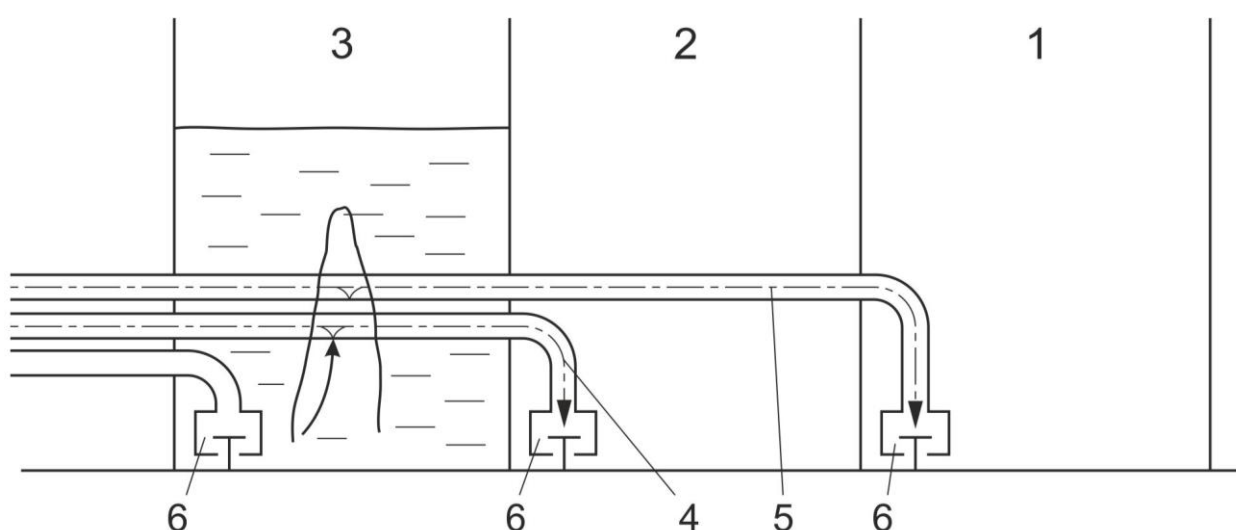
Na dnu broda sakupljaju se osim tekućina i razne druge sitnije i krupnije nečistoće. Krupnije nečistoće, kao što su krpe, pamučnjak itd, mogu začepiti usis, pa se radi toga svaki usis iz kaljuže mora zaštititi mrežama ili sitima. Neke izvedbe takvih usisnih košara prikazane su na Slici 3-3. Izvedba košare na usisu mora omogućiti njezino lagano skidanje radi čišćenja blata i nečistoća nakupljenih u njoj i oko nje.



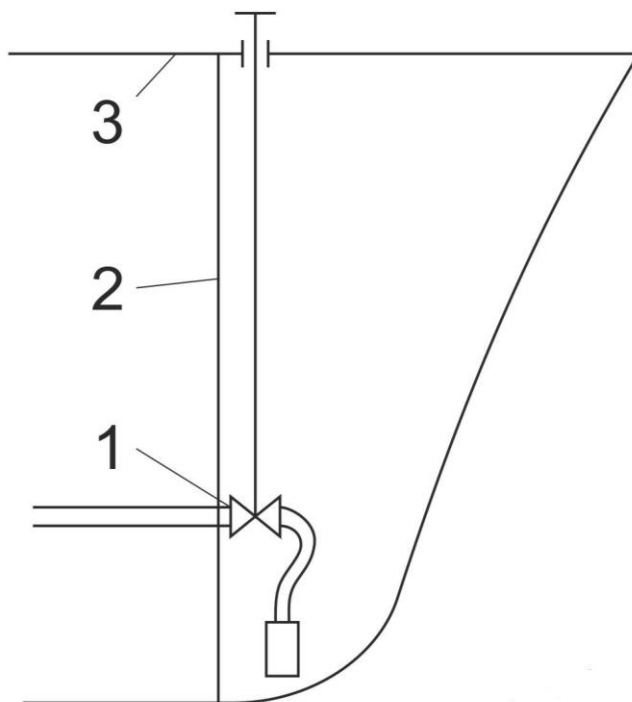
Slika 3-3 Izvedbe usisnih košara

Usisne cijevi po širini broda trebaju biti smještene tako, da ne dođe do njihovog oštećenja kod eventualnog oštećenja boka broda. Smatra se da je ovaj zahtjev zadovoljen, ako je usisna cijev od boka broda udaljena za jednu petinu širine broda. Ukoliko nije moguće udovoljiti tom zahtjevu, usisne cijevi moraju imati ugrađene nepovratne ventila, koji sprečavaju prodiranje vode kroz oštećenu cijev iz naplavljenog u neki drugi prostor (Slika 3-4). Na primjer, ako dođe do prodora vode u prostor (3) i istovremenog oštećenja cijevi (4) i (5), tada bi voda poplavila i prostore (1) i (2) kroz oštećene cijevi (4) i (5), da na njihovim usisima nema nepovratnih ventila (6).

Ako je pramčani pik-tank spojen na kaljužni cjevovod, na sudarnoj pregradi (2) mora biti postavljen zaporni ventil (1) sa strane pik-tank, a njime se upravlja iznad pregradne palube (3) (Slika 3-5). Kroz kolizijsku pregradu dopušten je samo jedan takav prolaz, ako pik-tank nije uzdužno podijeljen nepropusnom pregradom na 2 prostora. U ovom drugom slučaju dopuštena su dva prolaza kroz pregradu i to za svaki tank po jedan.



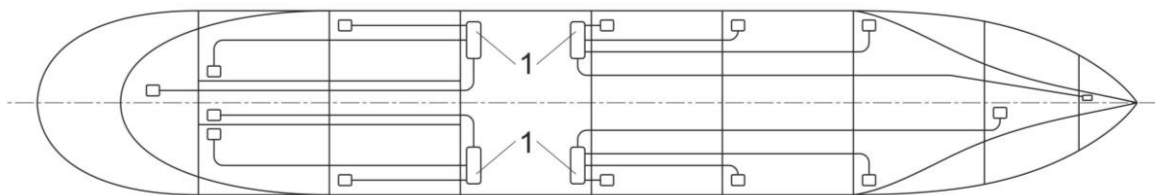
Slika 3-4 Smještaj cijevi po širini broda



Slika 3-5 Smještaj zapornog ventila na kaljužni cjevovod sa strane pik-tanka

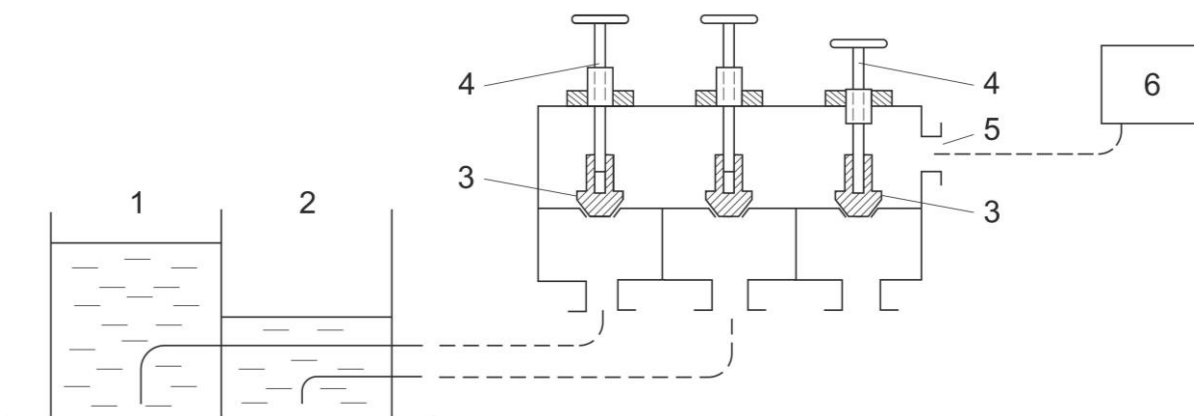
Unutar broda kaljužni cjevovod se polaže iznad dvodna. U skladištima mora biti zaštićen od eventualnog oštećenja izazvanog s komadnim teretom. Prilikom ljučenja broda događa se da usisna košara izroni iz vode u kaljuži i u cijev uđe zrak. Zbog toga cijevi treba voditi tako, da se izbjegne stvaranje zračnih džepova, koji mogu uzrokovati smetnje u radu kaljužnog sustava.

Usisne cijevi kaljuže moraju imati neki zaporni organ za priključenje ili isključenje na kaljužnu pumpe. Kod trgovačkih brodova ovi zaporni organi postavljaju se u strojarnicu grupirani u ventilske stanice (1) za pramčani i krmeni dio, te za svaku stranu broda (Slika 3-6). Ventilske stanice moraju biti smještene tako, da su pod normalnim okolnostima lako pristupačne. Na taj način je omogućeno stručnije upravljanje kaljužnim cjevovodom cijelog broda sa jednom centralnog mjesta, a teret u skladištima ne ometa pristupačnost. Na ratnim brodovima takve ventilske stanice mogu se rasporediti na više mjesta uzduž uzduž broda, jer postoji veći broj stručnog osoblja.



Slika 3-6 Ventilske stanice za pramčani i krmeni dio, te lijevu i desnu stranu broda

Ako postoji samo jedan cjevovod drenaže, mora biti predviđena mogućnost upravljanja sa ventilskim stanicama svih drenažnih pumpi i sa mjesta iznad pregradne palube. Ventilne stanice drenaže treba izvesti tako, da kroz njih vode iz više poplavljenog prostora (1) ne može prijeći u drugi poplavljeni prostor (2) (Slika 3-7). To se postiže slobodnim postavljanjem pladnjeva (3) na vretena (4) ventila. Kada je vreteno potpuno uvijeno, pladanj je pritisnut na sjedište i ne podiže se uslijed usisnog djelovanja pumpe (6) priključene na priključak (5). Ako se vreteno (4) odviše, usisno djelovanje pumpe može podizati pladanj (3) i voda prolazi kroz priključak (5) u pumpu (6). Kod prestanka usisnog djelovanja pumpe pladanj (3) ventila će se zatvoriti uslijed vlastite težine i djelovanja stupca vode iznad njega. Za slučaj da je u prostoru (1) nivo vode viši, veći tlak ovog nivoa držat će zatvorenim pladanj ventila spojenog sa prostorom (2) i za vrijeme rada pumpe, pa će pumpa crpiti vodu samo iz (1), dok se ne izjednače nivoi u (1) i (2). Daljnje sisanje vode bit će jednoliko iz oba prostora. Isto vrijedi i za slučaj da u prostoru (2) uopće nema vode, a njemu odgovarajući pladanj ventila nije vretenom pritisnut na sjedište.

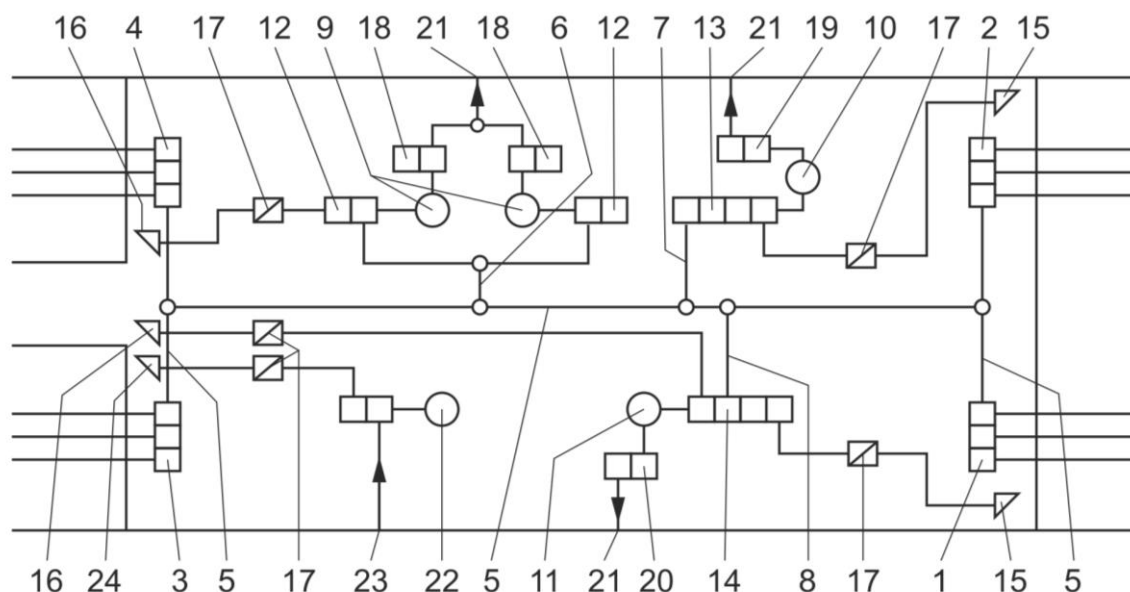


Slika 3-7 Smještaj ventilskih stanica drenaže

Za slučaj nužde iz kaljuže strojarnice vodu mora crpiti jedna od cirkulacijskih pumpi za rashlađivanje kondenzatora, odnosno za rashlađivanje glavnog motora. Takav usis mora imati naročito dobro izvedenu usisnu košaru, jer bi nečistoće iz kaljuže mogle začepiti sužene prolazne površine u rashladnim prostorima (npr. cijevi kondenzatora). Nadalje, kaljuža strojarnice i kotlovnice je zajednička, ako međusobno nisu odvojene nepropusnom pregradom.

Na Slici 3-8 prikazana je shema kaljužnog cjevovoda u strojarnici. Ventilne stanice (1) i (2) na pramčanom, te (3) i (4) na krmenom dijelu broda, međusobno su spojene na cijevi (5). Na cijev (5) priključene su usisne cijevi (6), (7) i (8) privještenih glavnih kaljužnih pumpi (9) (iako su dvije, računaju se kao jedna jer imaju zajednički pogon), pumpe balasta (10) u ulozi pomoćne drenaže, te pumpe za opću službu (11). Svaka od tih pumpi ima svoju usisnu ventilsku stanicu (12), (13) odnosno (14), od kojih je po jedan ventil spojen na drenažni cjevovod (5), a drugi ventili spojeni su sa drugim sustavima. Svaka od tih pumpi ima mogućnost crpljenja iz kaljuže strojarnice kroz usise (15) i (16). Ispred pumpi nalazi se filter (17) za zadržavanje nečistoća. Svaka pumpa ima tlačnu ventilnu stanicu (18), (19) odnosno (20) sa izljevima (21) u more. Tlačne ventilne stanice imaju, osim ventila za izljev u more, još i druge ventile potrebne drugim

cijevnim sustavima. Glavna rashladna pumpa (22) siše iz mora (23), te iz kaljuže strojarnice kroz usisnu košaru (24).



Slika 3-8 Shema kaljužnog cjevovoda u strojarnici

Cjevovod kaljuže se danas izrađuje od čeličnih cijevi pocinčanih postupkom vrućeg cinčanja, radi zaštite od korozije. Ranije su se upotrebljavale cijevi od lijevanog željeza i od olova, zbog njihove veće otpornosti na koroziju. Cijevi od lijevanog željeza zaštićivane su premazivanjem asfaltom. Ako su cijevi od olova, njihova upotreba je zabranjena u prostorima, gdje bi olovo moglo omekšati uslijed zagrijavanja. Takvima se smatraju prostori ugljenarki, tankova tekućeg goriva, kotlovnica i strojarnica.

Pravila klasifikacijskih društava naročito detaljno propisuju veličinu unutarnjeg promjera cijevi kaljužnog cjevovoda. Promjer se određuje ovisno o dimenzijama prostora iz kojega treba crpiti vodu, što je u izvjesnom smislu mjera njegovog volumena. Nema velikih razlika u zahtjevima pojedinim klasifikacijskih društava za određivanje promjera, ali se ipak mogu uočiti.

Hrvatski registar brodova, Det Norske Veritas, Germanischer Lloyd propisuju, da se unutarnji promjer određuje prema izrazima (identičan zahtjev je u SOLAS 74, pravilo 18, glava II-1):

- glavni kaljužni cjevovod:

$$D = 1,68\sqrt{L \cdot (B + H)} + 25 \quad (\text{mm}) \quad (1)$$

-za usisne ogranke iz pojedinih prostora:

$$d = 2,15\sqrt{l \cdot (B + H)} + 25 \quad (\text{mm}) \quad (2)$$

Lloyd's Register of Shipping zahtijeva određivanje unutarnjih promjera prema izrazima:

- glavni kaljužni cjevovod:

$$d_m = 1,68\sqrt{L \cdot (B + D)} + 25 \quad (\text{mm}) \quad (3)$$

- za usisne ogranke iz pojedinih prostora:

$$d_b = 2,15\sqrt{C \cdot (B + D)} + 25 \quad (\text{mm}) \quad (4)$$

Bureau Veritas i American Bureau of Shipping propisuje unutarnje promjere:

- za glavni kaljužni cjevovod:

$$d_1 = 1,68\sqrt{L \cdot (B + D)} + 25 \quad (\text{mm}) \quad (5)$$

- za usisne ogranke iz pojedinih prostora:

$$d_2 = 2,16\sqrt{L_1 \cdot (B + D)} + 25 \quad (\text{mm}) \quad (6)$$

Prikazani su zahtjevi ovih kvalifikacijskih društava, koje najviše susrećemo u našim brodogradilištima. U gornjim izrazima pojedini simboli znače:

L - duljina broda između okomica u (m)

B - širina broda u (m)

H, D – visina broda do pregradne palube u (m) i

l, L_1, C – duljina prostora između vodonepropusnih pregrada u (m).

Uzevši u obzir način izvođenja kaljužnog cjevovoda unutar broda zaključujemo : promjeri d , d_b i d_2 odnose se na promjer usisnih cijevi od usisnih košara do ventilne stanice, a promjere D , d_m ili d_1 moraju imati cijevi na tlačnoj strani cjevovoda od pumpe do izljeva van broda i na usisnoj strani od ventilne stanice do pumpe. No, ovdje može biti i drugih kombinacija.

Unutarnji promjeri cijevi određeni pomoću izraza (1) i (2) moraju zadovoljiti i uvjet minimuma, a taj je da niti jedna cijev kaljužnog cjevovoda ne smije taj promjer imati manji od 50 mm. Kod brodova duljine 60 metara i veće, usisna cijev kaljuže tunela vratilnog voda ne smije imati unutarnji promjer manji od 65 mm.

Klasifikacijska društva nadalje propisuju broj i kapacitet kaljužnih pumpi za obaveznu ugradnju u brod. Zahtjevi su im uglavnom slični, ali ipak postoje manje ili veće razlike u njima.

Hrvatski registar brodova postavlja sljedeći zahtjev:

- na svakom brodu moraju biti ugrađene najmanje 2 kaljužne pumpe sa mehaničkim pogonom,
- dodatno za putničke brodove obavezni minimalni broj pumpi je veći i ovisi o kriteriju „mjerilo službe“ prema sljedećem:

Za mjerilo službe:	<30	>= 30
Broj privješanih pumpi :	1	1
Broj samostalnih pumpi :	2	3

- kapacitet svake od propisanih pumpi mora biti toliki, da proračunska brzina u glavnom kaljužnom cjevovodu unutarnjeg promjera prema izrazu (1) ne bude manja od 2 m/s.

Zahtjevi Lloyd Registra su sljedeći:

- na svakom brodu (osim na putničkom) moraju biti ugrađene najmanje 2 pumpe sa mehaničkim pogonom,
- na putničkim brodovima moraju biti ugrađene najmanje 3 pumpe, a ako brod ima mjerilo službe ≥ 30 propisane su najmanje 4 pumpe,
- kapacitet svake od propisanih pumpi mora biti toliki, da brzina u glavnom kaljužnom cjevovodu ne bude manja od 2.033 m/s. Uz ovaj uvjet Lloyd's Register propisuje i formulu za određivanje kapaciteta jedne pumpe:

$$Q = 5,75 \cdot 10^{-3} \cdot d_m^2 \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (7)$$

Gdje je: d_m - unutarnji promjer glavnog kaljužnog cjevovoda u mm.

Det Norske Veritas i American Bureau of Shipping imaju slične zahtjeve:

- svaki brod mora imati ugrađene najmanje 2 kaljužne pumpe sa mehaničkim pogonom,
- kapacitet svake od propisanih pumpi mora biti toliki, da brzina u glavnom kaljužnom cjevovodu ne bude manja od 2.033 m/s. Uz navedeni uvjet Det Norske Veritas propisuje i tablicu kapaciteta pumpi. Izvod iz te tablice, primjera radi jest:

50 mm	15 m ³ /h
75 mm	33 m ³ /h
100 mm	58 m ³ /h
125 mm	90 m ³ /h
150 mm	130 m ³ /h
200 mm	230 m ³ /h

Der Norske Veritas daje i formulu za izračunavanje kapaciteta jedne pumpe:

$$Q = 5,75 \cdot 10^{-3} \cdot d^2 \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (8)$$

gdje je: d –unutarnji promjer glavnog kaljužnog cjevovoda u (mm).

Germanischer Lloyd propisuje u pravilima:

- teretni brodovi moraju imati ugrađene najmanje 2 kaljužne pumpe sa mehaničkim pogonom,
- putnički brodovi moraju imati ugrađene najmanje 3 pumpe, a ako brod ima mjerilo službe ≥ 30 , minimalni broj pumpi mora biti 4,
- kapacitet svake od pripisanih pumpi određen je formulom:

$$Q = 0,575 \cdot d_H^2 \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (9)$$

gdje je d_H - unutarnji promjer glavnog kaljužnog cjevovoda u (cm)

Bureau Veritas u svojim pravilima propisuje:

- svi brodovi sa vlastitim pogonom (osim putnički) moraju imati ugrađene najmanje 2 kaljužne pumpe sa mehaničkim pogonom,
- putnički brodovi moraju imati ugrađene najmanje 3 pumpe, a kod brodova sa mjerilom službe ≥ 30 minimalni broj pumpi mora biti 4
- kapacitet svake od propisanih pumpi određen je formulom:

$$Q = 0,345 \cdot d_1^2 \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (10)$$

gdje d_1 ima istu vrijednost kao kod prethodne formule. Ovako izračunati kapacitet odgovara brzini strujanja 1,22 m/s.

Dakle, kod navedenih klasifikacijskih društava zajedničko u njihovim zahtjevima jest:

- a- da moraju biti ugrađene najmanje 2 pumpe sa mehaničkim pogonom na bilo kojem dijelu broda, i
- b- da je kapacitet propisanih pumpi određen brzinom strujanja vode u glavnom kaljužnom cjevovodu sa najmanje cca. 2 m/s.

Kod većine navedenih klasifikacijskih društava propisana je ugradnja najmanje 3 pumpe na putničke brodove, a ako brod ima mjerilo službe ≥ 30 , tada minimalan broj pumpi iznosi 4.

Klasifikacijska društva dozvoljavaju i korištenje ejektora i ručnih pumpi za pražnjenje kaljuže, ali ne na svim brodovima, što ovisi o njihovoj veličini (odnosno duljini). Na brodu se mogu koristiti i pumpe manjeg kapaciteta od propisanih, ali uz zadovoljenje uvjeta da zbroj njihovih kapaciteta ne bude manji od zbroja kapaciteta propisanih pumpi. U pravilima klasifikacijskih društava postoji još i niz drugih preporuka i zahtjeva, koji moraju biti zadovoljeni. To upućuje na neophodnost, da se ispravan projekt kaljužnog cjevovoda može napraviti jedino uz pomoć pravila onog klasifikacijskog društva, čiju svjedodžbu o klasi, odnosno o sigurnosti mora brod posjedovati.

Kod određivanja minimalnog broja kaljužnih pumpi za putničke brodove klasifikacijska društva kao važan kriterij koriste mjerilo službe. Prema pravilima Hrvatskog registra brodova mjerilo službe C_5 određuje se pomoću formule:

$$C_5 = 72 \frac{M + 2P_1}{V + P_1 - P} \quad (11)$$

gdje je:

M – volumen prostora strojnog uređaja (strojarnica, kotlovnica), dodavši mu i volumen stalnih tankova goriva (ili ugljenarki) ako se nalazi iznad dvodna, ispred ili za prostora strojnog uređaja, a ispod granične linije urona μ (m^3),

P – Cijeli volumen nastambi ispod granične linije urona μ (m^3),

V – cijeli volumen broda ispod granične linije urona μ (m^3),

$$P_1 = 0,056 \cdot L \cdot N_p$$

(gdje je N_p - broj putnika za koji je brod namijenjen).

Ako je vrijednost $0,056 \cdot L \cdot N_p$ veća od zbroja $P+p$, za P_1 će se uzeti ovaj zbroj ili $0,037 \cdot L \cdot N_p$, prema tome što je veće. Ovdje je p (m^3) – ukupni volumen stalnih nastambi iznad granične linije urona, izračunat bez prostorijski namijenjenih za smještaj i potrebe posade.

Mjerilo službe se mora odrediti po formuli za C_5 ako je P_1 veće od P , a u ostalim slučajevima po formuli za C_6 .

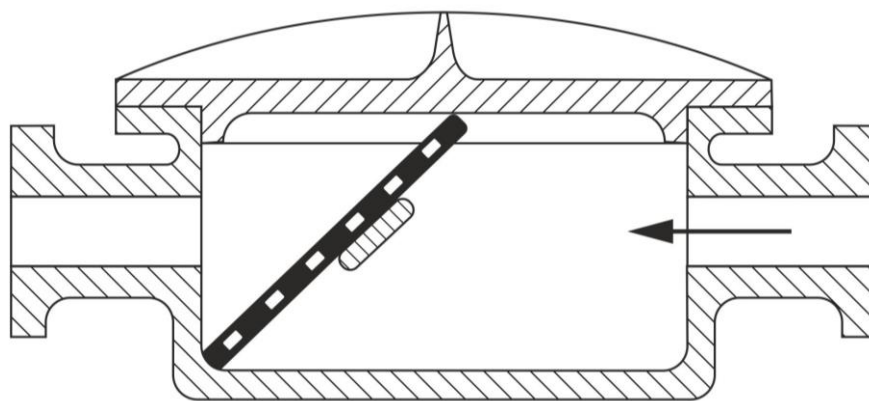
Do sada izloženo iz pravila klasifikacijskih društava odnosi se na pomorske brodove. Navedeni kriteriji za određivanje promjera i broja pumpi za kaljužni cjevovod razlikuju se kod gradnje unutrašnje plovidbe (riječnih brodova), a nalazimo ih u odnosnim pravilima, npr. Hrvatskog registra brodova i Germanischer Lloyd. Napomenimo još samo, da sva klasifikacijska društva na svijetu ne posjeduju svoja pravila za gradnju brodova unutrašnje plovidbe. Prema mogućnostima rasporeda prostorijski na brodu, pumpe za pražnjenje kaljuže treba razmjestiti u različite nepropusne prostore, tako da pri naplavlivanju jednog prostora iz njega može crpiti pumpa smještena u drugi nenaplavljeni prostor.

Pumpa za rashlađivanje kondenzatora osposobljena i za pražnjenje kaljuže iz strojarnice u nuždi, ne ubraja se u propisani broj pumpi.

Na putničkim brodovima (gdje je minimalni broj pumpi 3) kao rezervne pumpe kaljuže odnosno drenaže, mogu se upotrebljavati balastna ili pumpa za opću službu. Kod brodova sa propisanim minimalnim brojem 4 pumpe, osim navedenih, koristi se još jedna posebna rezervna pumpa kaljuže ili pumpa za sanitarne potrebe. Svaka od tih pumpi mora imati kapacitet propisan za pumpu kaljuže, te preko odgovarajućih cijevi i zapornih organa mora biti spojena sa kaljužnim cjevovodom.

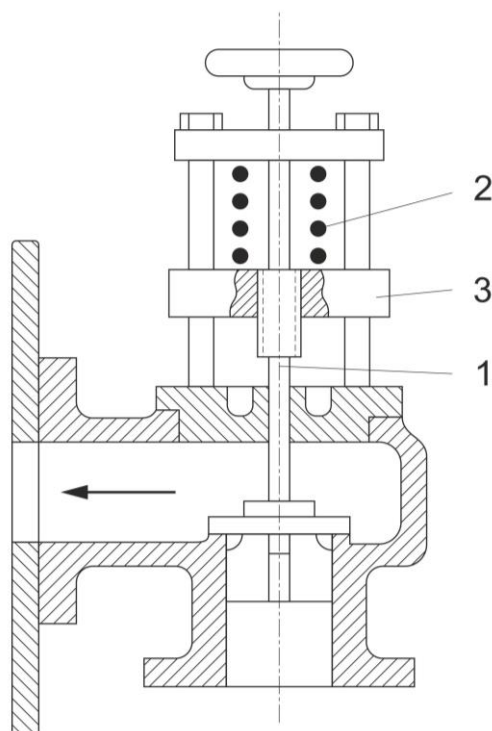
Svaka pumpa, koja se koristi kao drenažna, mora imati poseban usis iz prostora gdje je smještena. Promjer te usisne cijevi mora biti jednak promjeru između usisne ventilne stanice i pumpe. Za sprečavanje ulaženja nečistoća u pumpu, u ovaj usisni cjevovod ugrađuje se lonac za zadržavanje blata (Slika 3-9), koji se mora povremeno čistiti.

Kaljužne pumpe moraju biti samosisne, pa se najčešće koriste stapne pumpe, klipne pumpe ili centrifugalne pumpe koje imaju prigradenu vakuum pumpu. Ako usisna košara izađe iz vode u kaljuži uslijed valjanja broda donekle pomažu nepovratni ventili u košari, da ne dođe do smanjenja podtlaka u usisnom cjevovodu kaljuže. Radi što većeg smanjenja usisne visine, kaljužne pumpe se ugrađuju na najniža moguća mjesta unutar trupa broda.



Slika 3-9 Lonac za zadržavanje blata

Tlačna strana kaljužnog cjevovoda završava sa kutnim zapornim ventilom posebne izvedbe (Slika 3-10) smještenim na oplatu broda. Kod početka rada kaljužne pumpe može doći do oštećenja tlačnih cijevi, ako se zaboravi otvoriti taj ventil. Da do toga ne dođe, vreteno ventila (1) postavi se u ležište (3) koje je pod prednaponom opruge (2). Kada nastupi nedozvoljeno povećanje tlaka ispod pladnja zatvorenog ventila, opruga (2) će popustiti, dozvoliti istjecanje vode i time će se smanjiti tlak u cjevovodu.



Slika 3-10 Kutni zaporni ventil

Na ratnim brodovima vjerojatnost prodora vode je daleko veća, zbog veće mogućnosti oštećenja oplata za vrijeme borbe. Radi toga kod njih je osim male drenaže potrebna i velika drenaža.

Mala drenaža uglavnom ima sličan raspored kao i na trgovačkim brodovima, jer joj je osnovni zadatak izbacivanje vode iz kaljuže. Usisni ventili u pojedinim prostorima spojeni su na centralne usisne ventilske stanice sa kojima rukuje stručno osoblje broda. Broj pumpi male drenaže određuje se prema potrebi. Njihov razmještaj je u više međusobno neovisnih odjeljenja, da bi postojala veća mogućnost ispumpavanja, iako je neka od pumpi u poplavljenom prostoru. Kapacitet ovih pumpi je relativno malen.

Velika drenaža nastala je u osnovi produživanjem usisne cijevi pumpe za rashlađivanje kondenzatora uzduž cijelog broda. Zadatak joj je izbacivanje iz broda velike količine vode, koja je prodrla u brod uslijed oštećenja oplave, odnosno za odstranjivanje namjerno naplavljene vode radi sprečavanja opasnosti od požara.

U izvedbi cjevovoda velike drenaže postoje 3 sustava:

a – polaganje jedne ili dvije cijevi velikog promjera (reda veličine 0,5m) uzduž cijelog broda. Dvije cijevi su međusobno spojene i na njih su spojene dvije glavne rashladne pumpe u strojarnici, te obično jedna pumpa velikog kapaciteta na pramcu broda. Najveći nedostatak ovog sustava jest, da polaganje cijevi velikog promjera uzduž broda slabi nepropusne pregrade. Ovaj sustav se naziva centralni sustav.

b – polaganje sustava cjevovoda u nekoliko prostora međusobno odvojenih nepropusnim pregradama, ili tzv. grupni sustav. Kod ovog sustava je djelomično izbjegnuto slabljenje nepropusnih pregrada. Svaka grupa ima svoju pumpu, koja može biti manjeg kapaciteta od pumpi centralnog sustava. Njegov je nedostatak, da ne postoji veza između susjednih grupa, pa time nije omogućeno crpljenje vode iz prostorija jedne grupe pomoću pumpe druge grupe.

c – kod trećeg ili tzv. pojedinačnog sustava svaki prostor između dvije nepropusne pregrade ima svoju posebnu drenažu sa pumpom. Ovdje su pumpe još manjeg kapaciteta, a cjevovod drenaže uopće ne prolazi kroz nepropusne pregrade. Izbacivanje vode iz susjednog prostora omogućeno je ugradnjom zasuna na nepropusnu pregradu.

Korištenje rashladnih pumpi kondenzatora za potrebe drenaže kod centralnog sustava zahtjeva preinaku njihovih cjevovoda, što je teško izvedivo zbog veličine promjera cijevi. Radi toga se često i u strojarnici ugrađuju posebne pumpe za crpljenje velikih količina vode iz kaljuže.

4. PROTUPOŽARNI SUSTAV

Na brodovima relativno često nastaju požari i uzrokuju velike štete na teretu i konstrukciji broda, a nisu rijetki slučajevi da bude uništen i cijeli brod. Pojava požara na brodu moguća je u vrijeme njegove plovidbe ili boravka u luci. Za gašenje požara u vrijeme boravka broda u luci većinom se koriste lučki protupožarni uređaji sa kojima je obično vrlo dobro opremljena. Brod mora biti opremljen protupožarnim uređajima tako, da se pomoću njih može savladati požar kada se brod nalazi na pučini. Treba naglasiti, da je naročito velika opasnost od pojave požara na specijalnim brodovima za prijevoz tekućih i plinovitih zapaljivih tereta, gdje su daleko veće štete, a i ljudske žrtve. Na ratnim brodovima posebne mjere za sprečavanje pojave požara provode se u skladištima streljiva, jer je u slučaju požara u tim prostorijama neminovan gubitak broda i posade uslijed eksplozije streljiva.

Zbog velikih opasnosti i posljedica za putnike, posadu, teret i sam brod, međunarodna konvencija o zaštiti ljudskog života na moru iz 1974. god. (SOLAS 74) je za trgovačke brodove (putničke, teretne i specijalne) detaljno propisala potrebne uređaje za otkrivanje, sprečavanje i gašenje požara na brodu. Međunarodna konvencija o zaštiti ljudskog života na moru (SOLAS 74) je dodatak 1 završnog akta Međunarodne konvencije o zaštiti ljudskog života na moru održane od 21. listopada do 1. studenog 1974. god. u Londonu.

Glava II-2 Međunarodne konvencije pod nazivom „Konstrukcija – protupožarna zaštita, otkrivanje požara i gašenje požara“ u šest dijelova (Dio A do F) propisuje detalje konstrukcije i opremljenosti trupa za protupožarnu zaštitu broda. Na brodu mjere zaštite protiv požara počinju već kod projektiranja trupa. Međunarodna konvencija u tom smislu postavlja posebne zahtjeve za pregrađivanje broda po duljini sa vertikalnim protupožarnim pregradama, koje moraju biti izrađene od materijala otpornih na požar. Sa protupožarnim pregradama također obavezno moraju biti odvojene stambene prostorije za putnike i posadu od ostalih prostorija.

Brod mora biti opremljen tako, da je osigurana što efikasnija mogućnost ranog otkrivanja požara pomoću za tu svrhu posebno ugrađenih uređaja, naročito za teško pristupačne prostorije. Centralna kontrola tih uređaja obično je predviđena na komandnom mostu, a u vezi sa njima su uređaji za automatsko davanje požarne uzbune. Propisani su zatim obavezni obilasci članova posade naročito kod putničkih brodova, kao i osiguranje mogućnosti za ručno davanje požarne uzbune iz stambenih i domaćinskih prostorija.

Za početak procesa izgaranja moraju biti ispunjena tri osnovna uvjeta:

- Prisutnost zapaljivog materijala
- Prisutnost kisika iz okolnog zraka
- Postizanje neke minimalne temperature, kod koje počinje burno izgaranje uz pojavu plamena.

Osnovni principi za gašenje požara bilo kojim sredstvom, baziraju se na sprečavanju ili otklanjanju mogućnosti ispunjenja barem jednog od navedena tri osnovna uvjeta. Tome udovoljavaju voda, ugljični dioksid, Clayton plin, ispušni plinovi iz kotla ili dizelskog motora, para, pjena i druga prijenosna sredstva. Voda je svakako veoma efikasna, ali ima i poznate

nedostatke kod gašenja požara goriva i električnih instalacija. U nastavku ćemo se detaljnije upoznati sa uređajima za gašenje i sprečavanje požara pomoću vode.

Za potrebe gašenja požara pomoću vode, na brodu ugrađene protupožarne pumpe koje moraju imati samostalni pogonski motor. Za tu službu mogu se upotrebljavati i sanitarne, balastne, drenažne, te pumpe za opću službu, ali uz uvjet da se bilo koja od njih ne upotrebljava i za prepumpavanje goriva, ulja ili drugih zapaljivih tekućina. Bilo koja od navedenih pumpi namijenjena i za protupožarnu službu mora imati poseban priključak za usis iz mora, a na tlačnoj strani također poseban priključak na protupožarni cjevovod.

Putnički brodovi sa 4000 BRT i više moraju imati ugrađene najmanje 3 protupožarne pumpe. Putnički brodovi sa manje od 4000 BRT i teretni brodovi sa 1000 BRT i više moraju imati ugrađene najmanje 2 protupožarne pumpe.

U strojarnicama i kotlovnicama na svim putničkim, te na teretnim brodovima sa 1000 BRT i više mora biti ugrađen jedan od sljedećih uređaja :

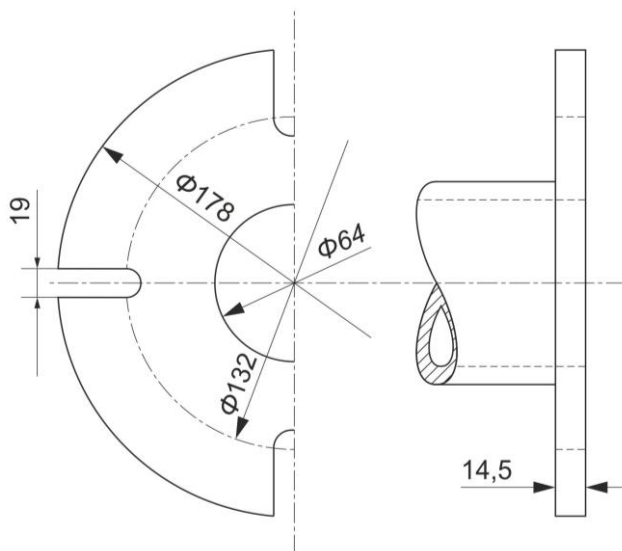
- a.- za gašenje požara prskanjem vode pod tlakom,
- b.- ta gašenje požara inertnim plinom, ili
- c.- stalni uređaj za gašenje požara pjenom.

Ukupni kapacitet protupožarnih pumpi na putničkim brodovima mora biti najmanje $\frac{2}{3}$ kapaciteta drenažnih (kaljužnih) pumpi. Kod teretnih brodova ukupni kapacitet protupožarnih pumpi mora biti najmanje $\frac{4}{3}$ kapaciteta jedne od dvije propisane drenažne pumpe, ali ne više od $180 \text{ m}^3/\text{h}$. Kapacitet svake od ugrađenih protupožarnih pumpi mora biti najmanje 80 % od srednje vrijednosti kapaciteta za jednu pumpu, koja se dobije dijeljenjem propisanog ukupnog kapaciteta sa propisanim brojem pumpi.

Raspored pumpi i protupožarnog cjevovoda mora uvijek omogućavati efikasno gašenje požara bez obzira, gdje se požar pojavio. Sa brojem i rasporedom hidranata mora biti osigurano, da je na svakom pristupačnom mjestu broda omogućeno gašenje požara sa najmanje dva mlaza vode iz dva različita hidranta. Mlazovi vode postižu se pomoću mlaznica promjera 12, 16 ili 19 mm montiranih na savitljive cijevi promjera 50 do 75 mm. Savitljive protupožarne cijevi moraju biti smještene u neposrednoj blizini svakog hidranta i uvijek lako pristupačne.

U konstruktivnoj izvedbi hidranta mora biti predviđen ventil neposredno ispred priključka protupožarne savitljivu cijevi. Time je omogućeno priključivanje na, odnosno rastavljanje savitljive cijevi hidranta i u slučaju kada je cjevovod pod tlakom protupožarne pumpe. Izvedba priključka na hidrantu mora omogućiti priključivanje i rastavljanje savitljive cijevi u što je moguće kraćem vremenu.

Za dimenzije priključaka protupožarnih savitljivih cijevi na hidrantima, još uvijek ne postoji međunarodni dogovor. Radi toga je Međunarodna konvencija SOLAS 74 propisala da svaki brod sa 1000 BRT i više mora imati ugrađenu priključnicu prema Slici 4-1 projektiranu za radni tlak $1,03 \text{ MPa}$, s time da mora postojati mogućnost njezine upotrebe na oba boka. Pomoću ove priključnice brod može u svoj protupožarni cjevovod dobiti vodu sa kopna ili sa drugog broda za potrebe gašenja požara.



Slika 4-1 Priključnica

Kod upotrebe bilo koja dva susjedna hidranta, mora biti zadovoljen uvjet da na svim hidrantima bude osiguran minimalni tlak od:

- a- 314 kPa – kod putničkih brodova sa 4000 BRT i većih;
- b- 275 kPa - kod putničkih brodova sa 1000 do 4000 BRT i teretnih brodova sa 6000 BRT i većih;
- c- 255 kPa - kod teretnih sa 1000 do 6000 BRT

Za putničke i teretne brodove manje od 1000 BRT ovaj tlak određuje ovlaštena organizacija vlade za kontrolu provedbe SOLAS konvencije na brodu. Kod propisanih tlakova mlaznice promjera 12 mm daju mlaz dugačak oko 20 m. Kod većih promjera mlaznica veća je i duljina mlaza. Iz navedenih uvjeta, veličine broda i rasprostranjenosti protupožarnog cjevovoda određuje se potreban tlak, koji mora dati protupožarna pumpa, prema izrazu:

$$p = H \cdot \rho \cdot g = (h + h_0 + h_m) \cdot \rho \cdot g \quad (\text{Pa}) \quad (12)$$

gdje je: h - visina iznad vodene linije najvišeg ugrađenog hidranta u (m),

h_0 - otpor u cjevovodu i ugrađenoj armaturi u (m),

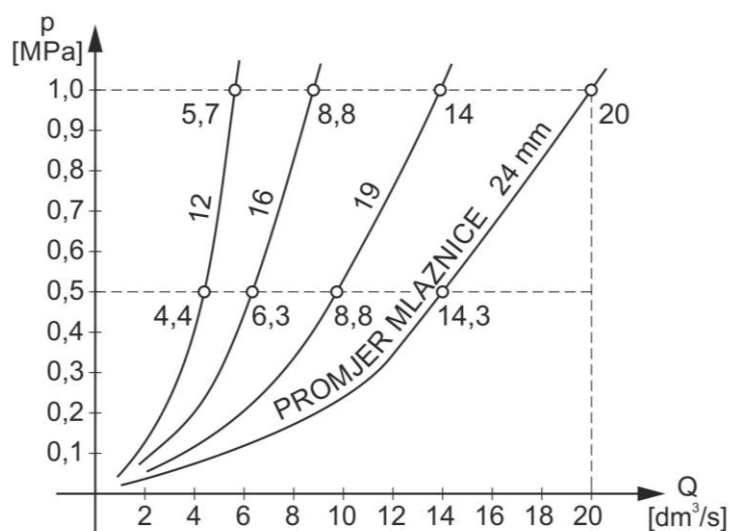
h_m - propisani minimalni tlakovi na hidrantima u metrima,

ρ - gustoća vode u kg/m^3 ,

g - gravitacijska konstanta u m/s^2 .

Kada protupožarna pumpa radi, povećanje tlaka u protupožarnom cjevovodu uslijed zatvaranja privoda vode mlaznicama može uzrokovati oštećenje. Zbog toga svaka pumpa, gdje takva opasnost postoji, a koristi se za protupožarnu službu, mora imati na tlačnoj strani ugrađen sigurnosni ventil, koji se otvara kod povećanja tlaka u cjevovodu iznad dozvoljenog.

Količina vode koja izlazi iz svake mlaznice ovisi o promjeru mlaznice i tlaka vode u cjevovodu. Na Slici 4-2 grafički je prikazan količina Q izbačene vode kao funkcija visine tlaka p kod mlaznica raznih promjera. Promjer glavnog protupožarnog cjevovoda mora zadovoljiti nesmetan prolaz vode, koju istovremeno dobavljaju dvije protupožarne pumpe, odnosno kod teretnih brodova maksimalno $140 \text{ m}^3/\text{h}$. Promjer ogranaka dobije se iz brzine strujanja i količine vode prema potrebnom broju mlazova i promjerima mlaznica.



Slika 4-2 Količina izbačene vode kao funkcija tlaka

Navedeni zahtjevi i uvjeti propisani u Međunarodnoj konvenciji SOLAS 74 uglavnom su primijenjeni i u pravilima klasifikacijskih društava sa većim ili manjim odstupanjima. Upoznati ćemo se samo sa većim odstupanjima kod klasifikacijskih društava, koja češće susrećemo prilikom gradnje brodova u našim brodogradilištima.

Lloyd registar propisuje unutarnji promjer glavnog protupožarnog cjevovoda sljedećom formulom:

$$d_1 = \frac{L_1}{1,2} + 25 \quad (\text{mm}) \quad (13)$$

gdje je:

L_1 – duljina broda u metrima,

uz ispunjenje uvjeta, da taj promjer ne može ni u kojem slučaju biti manji od 50 mm, niti veći od 127 mm kod teretnih, odnosno 178 mm kod putničkih brodova.

Germanischer Lloyd zahtjeva da se unutarnji promjer glavnog protupožarnog cjevovoda odredi prema izrazu:

$$d_F = 0,8 \cdot d_H \quad (\text{mm}) \quad (14)$$

gdje je:

d_H - unutarnji promjer glavnog kaljužnog cjevovoda određen prema formuli (1),

uz ispunjenje uvjeta da d_F ne može biti manji od 50 mm niti veći od 130 mm kod teretnih, odnosno 175 mm kod putničkih brodova.

Det Norske Veritas određuje da ukupan kapacitet protupožarnih pumpi ne treba biti veći od 300 m³/h osim kod tankera. Ujedno niti jedna protupožarna pumpa ne može imati kapacitet manji od 50 m³/h.

Ratni brodovi nisu obavezni udovoljavati zahtjevima Međunarodne konvencije o zaštiti ljudskog života na moru, a također ni zahtjevima iz pravila klasifikacijskih društava. No, kod njih je zbog uvijek prisutnog eksploziva daleko veća opasnost od posljedica uzrokovanih požarom, nego kod trgovačkih brodova. Nadalje, ratni brodovi i u najtežim uvjetima u brodu, moraju imati mogućnost brzog uspostavljanja stanja koje osigurava daljnje aktivno učestvovanje u borbi, jer njihovo onesposobljenje za plovidbu i borbu ima daleko veće posljedice u ratnim uvjetima, nego što je to slučaj sa trgovačkim brodom. Zbog toga se na ratnim brodovima posvećuje daleko veća pažnja što boljoj opremljenosti broda za borbu protiv požara, a za tu svrhu svaka ratna mornarica ima vlastite interne propise. Najvažniji osnovni zahtjev kod većih ratnih brodova je, da protupožarni cjevovod mora biti neprekidno pod tlakom kako bi u svakom momentu bio spreman za upotrebu.

Protupožarni cjevovod proteže se po cijelom brodu, kako po duljini tako i po visini. Za njegovo izvođenje razlikujemo linijski i kružni sustav. Linijski je sustav jeftiniji i lakši, ali nije najpogodniji za održavanje stalnog tlaka u njemu. Većinom se izvodi na teretnim brodovima. Kružni sustav se izvodi na putničkim i ratnim brodovima i veoma je pogodan za održavanje stalnog tlaka u njemu. Stalni tlak u cjevovodu postiže se radom jedne protupožarne pumpe ili njegovim spajanjem na hidrofor morske vode.

Dijelovi i oprema protupožarnog cjevovoda smješteni su i na otvorenoj palubi. Kod njih se moraju predvidjeti mjere za sprječavanje smrzavanja vode, jer smrzavanje može uzrokovati oštećenja dijelova cjevovoda ili armature, a time i nespremnost protupožarnog cjevovoda za gašenje požara. U tu svrhu se ispred ugroženih dijelova, gdje postoji mogućnost smrzavanja, postavljaju ventili za njihovo isključenje od punjenja vodom. Nakon zatvaranja ovih ventila, preostalu vodu u ugroženom dijelu cjevovoda treba ispustiti kroz posebne ventile za pražnjenje. Ukoliko se pojavi potreba za upotrebljavanjem isključenih dijelova protupožarnog cjevovoda, navedene ventile treba otvoriti i tako pustiti vodu do hidranta. Druga mogućnost zaštite od smrzavanja je stavljanje cjevovoda samo pod tlak zraka, što se prakticira kod sustava za škropljenje. U tom slučaju, nakon otvaranja ventila na mjestu potrošnje najprije izađe zrak, a zatim naiđe voda.

Postoji opasnost da se požar u strojarnici ili kotlovnici proširi u hodnik i ostale prostorije prilikom otvaranja vrata radi napuštanja posade iz prostora ugroženih požarom. Za sprečavanje te mogućnosti na putničkim brodovima se ispred i iza vrata formira vodena zavjesa. U tu svrhu se sa jedne ili obje strane, a iznad vrata, postavi perforirana cijev spojena posredstvom ventila na protupožarni cjevovod. Otvaranjem tog ventila voda počinje izlaziti u tankim mlazevima (promjer otvora na cijevi je cca. 2,5 mm) međusobno udaljenim 30 do 50 mm i time je

onemogućeno prodiranje plamena. Upravljanje samim ventilom mora biti predviđeno sa jedne i druge strane vrata.

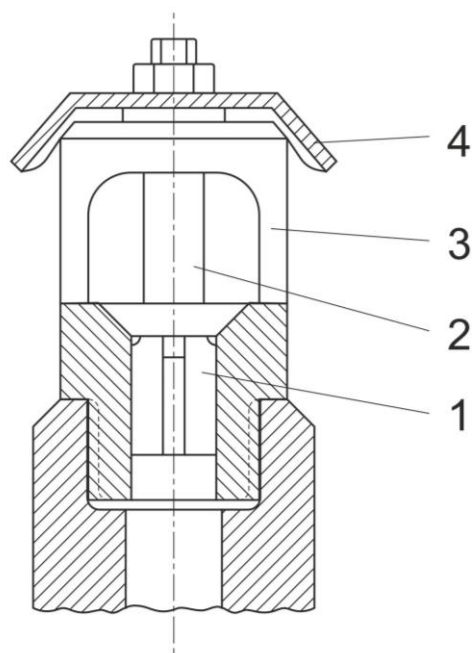
Osim za potrebe gašenja požara, protupožarni cjevovod je vrlo pogodan i za druge svrhe. Npr, posada ga redovito upotrebljava za pranje palube, veoma je pogodan za pranje sidrenog lanca i sidra prilikom dizanja sidra sa morskog dna, a koristi se također kao jedina mogućnost za punjenje pik tankova sa balastnom vodom.

Na putničkim i ratnim brodovima, te na tankerima, veliku primjenu kao protupožarni sustav imaju uređaji za škropljenje vodom, a i Međunarodna konvencija SOLAS 74 predviđa ih kao jedan od alternativnih načina za sprječavanje i gašenje požara na brodu. Takav uređaj sastoji se od cjevovoda morske vode priključenom na protupožarni cjevovod ili na hidrofor morske vode, te od mjesta za škropljenje. Mjesta za škropljenje razmjesti se na primjer u brodskim blagovaonicama, kabinama i hodnicima putničkih brodova i to na cca 10 do 20 m² površine po jedan mlaznik kapaciteta oko 0,4 dm³/s.

Mlaznik se u izvedbi prema Slici 4-3 priključi na dovodnu cijev vode i time je njegov ventil (1) izložen tlaku iz cjevovoda. Ventil (1) je posredstvom uložka (2) oslonjen na stremen (3) i pod normalnim okolnostima tlak u cjevovodu ga ne može otvoriti. Uložak (2) izrađen je od neke lako topive legure antimona, olova, kositra i kadmija ili može biti staklena posudica u kojoj se nalazi neka lako hlapiva ne goriva tekućina. Ako u prostoru poraste temperatura, npr. Za 50 stupnjeva C, iznad one koja se očekuje kao najviša, lako topiva legura se smekša ili rastali, odnosno pare lako hlapive tekućine svojim tlakom razbiju staklenu posudicu. Tlak u cjevovodu otvara ventil (1), voda počinje izlaziti, udara o ružu (4) površ ventila mlaznika i raspršuje se u sitne kapljice. Kapljice padaju na pod, okolne stijene i predmete, te započinu svoje djelovanje- hlađenje odnosno sprječavanje požara. Što je površina raspršenih kapljica veća, dakle što su kapljice sitnije, isparavanje vode će biti intenzivnije. Svojim isparavanjem voda oduzima okolini velike količine topline i tako je hladi, a zatim stvorena para istiskuje zrak i time smanjuje količinu kisika na mjestu požara.

Na tankerima se sa uređajima za škropljenje i mlaznicama slične izvedbe sprečava preveliko zagrijavanje palube od djelovanja sunčevih zraka, a time se značajno smanjuje isparavanje tereta u tankovima. Smanjivanjem isparavanja ujedno se smanjuje opasnost od zapaljenja i pojave požara.

Na ratnim brodovima, ugrađeni uređaj za škropljenje ima zadatak, da isparavanjem raspršene vode snizi temperaturu povećanu iz bilo kojeg razloga u municijskoj komori. Ovdje ugrađeni uređaj za škropljenje djeluje na sličan način kako je prethodno opisano za prostorija na putničkim brodovima. Snižavanje temperature u skladištima streljiva nema važniju ulogu u gašenju požara, već je preventivnog karaktera, da kao posljedica povećanja temperature ne dođe do eksplozije uskladištenog streljiva.

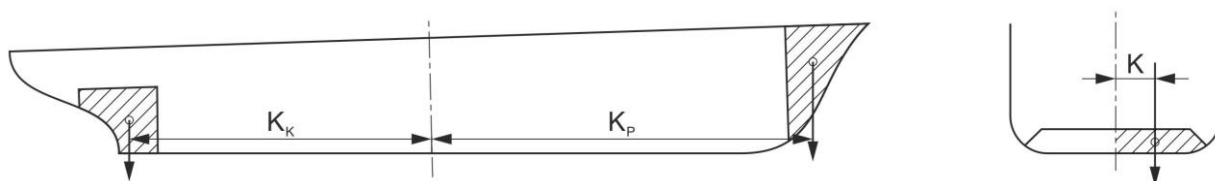


Slika 4-3 Mlaznik

5. BALASTNI SUSTAV

Zadatak balastnog cjevovoda je da se punjenjem i pražnjenjem balastnih tankova uravnoteži brod, koji može biti zatežan, pretežan ili nagnut na jedan od bokova. Kod trgovačkih brodova premještanje balasta je potrebno zbog promjene položaja tereta prilikom ukrcavanja i iskrcavanja, kao i zbog potroška goriva i vode. Naročitu važnost balastni uređaj ima na brodovima za prijevoz željeznica. Ovdje se kod ukrcavanja odnosno iskrcavanja vagona teret na brodu promijeni za dvadesetak do trideset tona u vrlo kratkom vremenu (npr za manje od jedne minute). Pri tome nivo tračnica na brodu treba dovesti u nivo tračnica na obali. Kod ratnih brodova, za slučaj prodora vode na jednom kraju, premještanjem balasta brod se dovodi u ravnotežno stanje, kada njegova artiljerija može ispravno i uspješno djelovati.

Ulogu balastnih tankova imaju tankovi dvodna za bočno uravnoteženje, a pramčani i krmeni pik tankovi za trimovanje. Krakovi (K) težina balasta u dvodnu, mnogo su manji od krakova (K_p i K_k) pik tankova (vidi sliku 5-1). Zato je brod mnogo osjetljiviji na količine balasta u pik tankovima nego u tankovima dvodna.



Slika 5-1 Balastiranje broda

Kao balast većinom se upotrebljava morska voda. Za potrebe balastiranja može se koristiti i tekuće gorivo, ali na brodovima sa pogonom na tekuća goriva.

Balastni tankovi u dvodnu ne smiju se puniti do vrha, već samo do cca $\frac{3}{4}$ visine, da ne bi došlo do oštećenja unutarnjeg dna pri eventualnom nasukavanju broda. Nadalje, prilikom punjenja mogla bi pumpa tlačiti vodu u već napunjeni tank, što može uzrokovati oštećenje dvodna. Ta mogućnost je spriječena tako, da se tankovi ne pune pomoću pumpe, već se naplavljuju tlakom stupca vode koji je u ventilu za naplavljivanje, a približno odgovara gazu broda. Naplavljivanje tankova u dvodnu jednostavno se može postići, čak i da se po potrebi potpuno napune, jer su dovoljno duboko ispod površine vode. Pik tankovi se naplavljuju do linije gaza broda, a dalje se pune pomoću protupožarnog cjevovoda pomoću kojega se potrebna voda dolijeva sa palube.

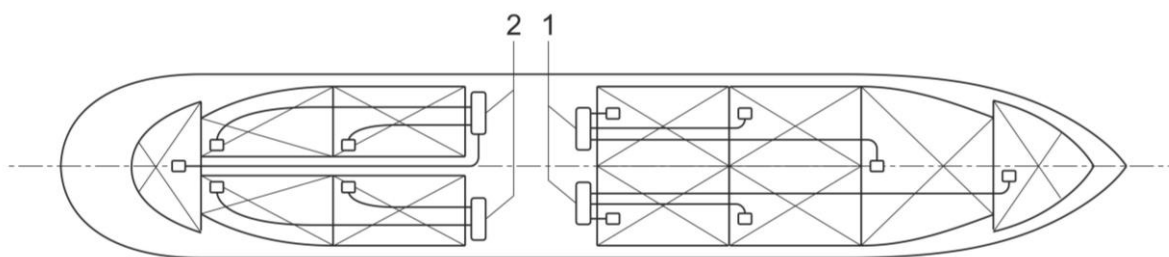
Kod naplavljivanja nailazeća voda istiskuje zrak iz balastnih tankova. Za nesmetano izlaženje zraka, odušnici balastnih tankova moraju imati slobodan presjek jednak najmanje sumi presjeka svih cijevi za pritjecanje balasta u tankove.

Prema rasporedu u brodu balastni cjevovod je veoma sličan kaljužnom (drenažnom) (vidi sliku 5-2). U strojarnici su smještene ventilske stanice balasta za pramčani (1) i za krmeni (2) dio broda i to posebno za desno odnosno za lijevu stranu. Od svakog ventila u ventilskoj stanici vodi

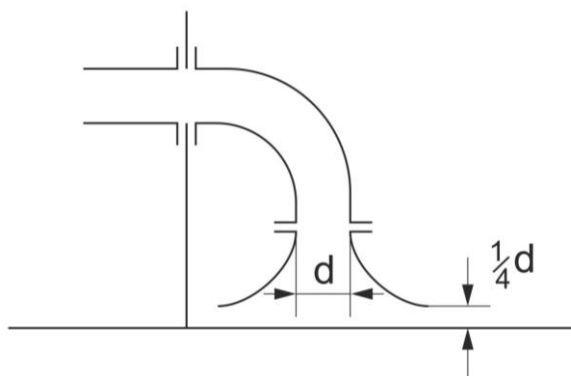
cijev u jedan balastni tank, gdje je jedan ili više usisa. Cijevi se polažu u balastne tankove ispod unutarnjeg dna, a najčešće su to pocinčane čelične cijevi.

Usisi se postavljaju u krmeni dio tankova na udaljenosti od dna za $\frac{1}{4}$ promjera usisne cijevi. Kako se radi o čistoj vodi, na usisima balasta nisu potrebne zaštitne usisne košare kao kod kaljužnog cjevovoda. Prilikom pražnjenja tanka može doći do stvaranja ponora u vodi oko usisa, uslijed čega bi pumpa mogla povući zrak, a to može uzrokovati poremećaj njezinog rada. Stoga je uobičajeno, da se na samom početku usisa postave zvonasti nastavci prošireni prema dnu. Time je smanjena brzina strujanja vode na opsegu nastavka i spriječeno stvaranje ponora (Slika 5-3).

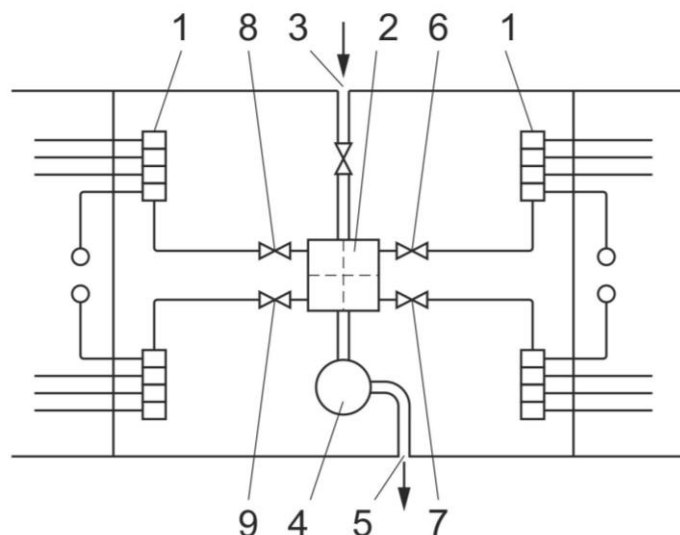
Ventilske stanice balasta izvede se u normalnoj izvedbi, tj. sa pladnjem uronjenim na vreteno ventila. Smještene su na lako pristupačnim mjestima u strojarnici, odakle se upravlja sa poslovima na uravnoteženju po širini i po duljini (trimovanje) broda. Od ventilskih stanica balasta (1) cijevi vode na centralni sanduk balasta (2) (slika 5-4). Centralni sanduk balasta (2) spojen je sa ventilskim stanicama (1), sa usisom iz mora (3) i sa balastnom pumpom (4), koja vodu iz balastnih tankova izbacuje izvan broda kroz izljev (5).



Slika 5-2 Balastni cjevovod u brodu

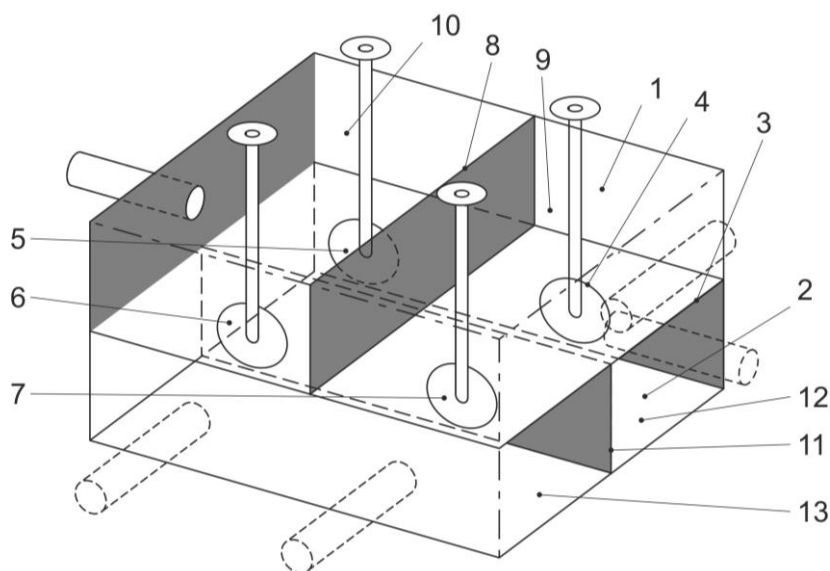


Slika 5-3 Zvonasti nastavak cjevovoda

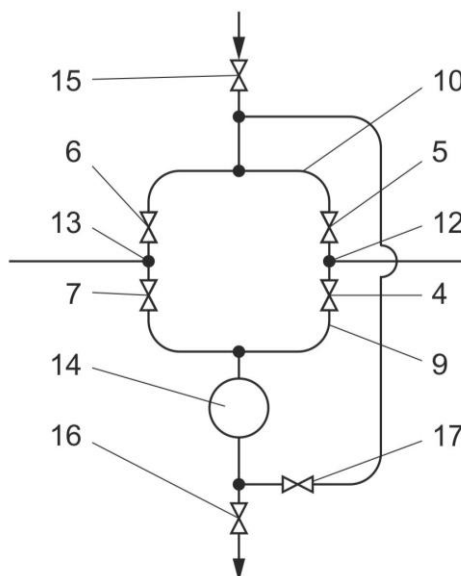


Slika 5-4 Ventilska stanica balasta

Centralni sanduk balasta (Slika 5-5) sastoji se od gornjeg (1) i donjeg (2) dijela, koji su međusobno odijeljeni sa pregradom (3). Na toj pregradi nalaze se otvori ventila (4), (5), (6) i (7). Gornji dio (1) je sa pregradom (8) podijeljen na dvije klijetke (9) i (10). Klijetka (9) spojena je sa usisom pumpe balasta, a klijetka (10) sa ventilom za izravno plavljenje balastnih tankova iz mora. Donji dio (2) također je razdijeljen sa pregradom (11) na dvije klijetke (12) i (13). Klijetka (12) spojena je sa pramčanim, a klijetka (13) sa krmenim ventilnim stanicama balasta.



Slika 5-5 Centralni sanduk balasta



Slika 5-6 Shematski prikaz sanduka

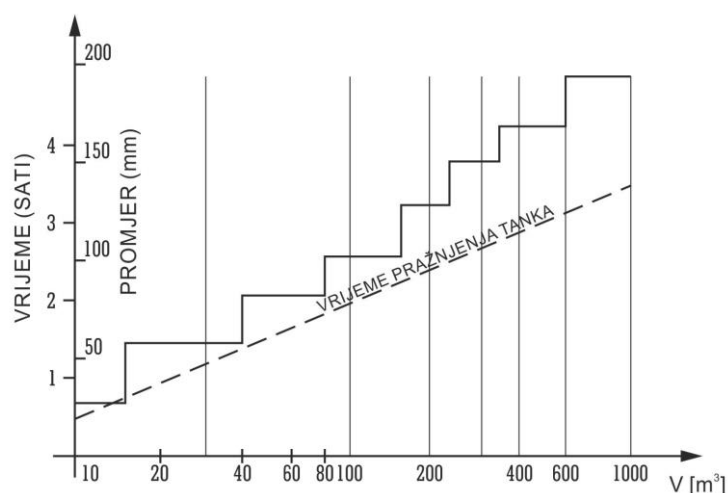
Sanduk je shematski prikazan na slici 5-6, gdje brojevi označuju iste njegove dijelove. Sa opisanom izvedbom centralnog sanduka balasta moguće je postići slijedeće kombinacije:

- a.- otvaranjem ventila (5) i (7), a zatvaranjem ventila (4) i (6) – može se plaviti bilo koji pramčani tank i istovremeno crpsti iz bilo kojeg krmenog balastnog tanka sa pumpom (14);
- b.- otvaranjem ventila (4) i (6), a zatvaranjem ventila (5) i (7) – može se plaviti bilo koji tank na krmi i istovremeno crpsti iz bilo kojeg tanka na pramcu sa pumpom (14);
- c.- zatvaranjem ventila (15) za ulaz morske vode i otvaranjem ventila (5) i (6) – mogu se izjednačiti visine nivoa vode u svim balastnim tankovima ili samo u pojedinim, prema potrebi;
- d.- zatvaranjem ventila (15) i (16), te otvaranjem ventila (17) – omogućeno je prebacivanje balasta pomoću pumpe (14), i to:

- iz pramčanih u krmene tankove, ako su zatvoreni ventili (5) i (7), a otvoreni (4) i (6),
- iz krmelih u pramčane tankove, ako su zatvoreni ventili (4) i (6), a otvoreni (5) i (7).

Ako se centralni sanduk balasta zakrene za 90° u horizontalnoj ravnini, umjesto u smjeru pramac-krma, balast se može prebacivati u smjeru desna-lijeva strana broda. Nešto slično može se postići i sa cjevovodom prikazanim na Slici 5-4. Ovdje ventili (6), (7), (8) i (9) sa pripadnim ventilnim stanicama (1) omogućuju istovremeno naplavlivanje desnih krmelih i pražnjenje lijevih pramčanih tankova.

Promjer d balastnog cjevovoda određuje se iz uvjeta, da se balastna voda može iscrpsti iz tanka u određenom vremenu. Kod brzine strujanja od 2 m/s i punjenja tanka vodom do $\frac{3}{4}$ sadržaja, tanka volumena 15 m³ mora se isprazniti za oko $\frac{3}{4}$ sata, tank volumena 225 m³ za oko 2 $\frac{1}{2}$ sata, a tank volumena 870 m³ za oko 3 $\frac{1}{2}$ sata. Na Slici 5-7 prikazan je dijagram ovisnosti promjera d balastnog cjevovoda o volumenu V tanka. Crtkanom linijom prikazano je približno vrijeme potrebno da se isprazni tank napunjen do $\frac{3}{4}$ visine.



Slika 5-7 Ovisnost promjera balastnog cjevovoda o volumenu tanka

Hrvatski registar brodova zahtijeva u svojim pravilima, da u brod bude ugrađena najmanje jedna balastna pumpa. Sa svojim kapacitetom pumpa mora postići da brzine strujanja kroz balastni cjevovod bude najmanje 2 m/s. Unutarnji promjer ogranka balastnog cjevovoda za pojedini tank određen je formulom: $d_B = 18 \cdot \sqrt[3]{V}$ (gdje je: V-volumen balastnog tanka u m³).

Ostala poznata klasifikacijska društva nemaju posebnih zahtjeva za određivanje promjera balastnog cjevovoda.

Ako se koriste i za potrebe drenaže, balastne pumpe moraju imati kapacitet koji odgovara potrebama te službe. Radi jednostavnosti često se ugrađuju kaljužne i balastne pumpe istog tipa. Kapacitet balastnih pumpi na specijalnim brodovima određuje se prema vremenu potrebnom pumpi za pražnjenje balastne vode iz tankova. Po potrebi u brod se može ugraditi i veći broj balastnih pumpi.

Tankovi za balast nalaze se u brodu niže od pumpi. Stoga balastne pumpe moraju biti samosisne da bi mogle crpsti vodu iz tankova. Na parobrodima sa pogonskim stapnim parnim strojem u tu svrhu se upotrebljavaju stapne pumpe, a na parobrodima na pogon parnim turbinama i na motornim brodovima centrifugalne pumpe pogonjene elektromotorom. Centrifugalne pumpe moraju imati priključen uređaj sa stvaranje vakuuma, tzv. samosisni dio.

Na ratnim brodovima balastni uređaj ima naročitu važnost, jer se kod djelovanja brodske artiljerije poteškoće javljaju već kod nagiba broda od 5°, a kod nagiba od 15° teška artiljerija se više ne može upotrebljavati. Posada pomoću balastnog uređaja ponovno uravnotežuje brod iz nagnutog položaja i to mu je ovdje najvažniji zadatak.

Voda može ući u brod zbog njegovog oštećenja ili ako se naplave skladišta streljiva radi sprječavanja opasnosti od požara. Skladišta streljiva su obično u sredini broda, pa njihovo naplavlivanje utiče jedino na trim. Oštećenja su najčešća na bokovima broda, što uzrokuje njegovo bočno nagibanje.

6. MATERIJALI, VRSTE I PROIZVODNJA CIJEVI

Upotreba pojedinih materijala za izradu cijevi ovisi o radnim tlakovima, radnim temperaturama i o namjeni pojedinog cjevovoda na brodu. Kod cjevovoda za transportiranje tekućina sa povećanom količinom otopljenog zraka, odnosno sa otopljenim drugim agresivnim plinovima ili kiselinama, treba voditi računa i o mogućoj pojačanoj koroziji.

Lijevano željezo (sivi lijev) se kao materijal za cjevovode često upotrebljava na kopnu. Na brodovima se koristi u manjoj mjeri, jer zbog svoje krhkosti ne može podnositi sve one mnogobrojne deformacije, kojima su brod i neki ugrađeni cjevovodi podvrgnuti tokom plovidbe. Osim toga, zbog osjetno slabijih mehaničkih svojstava i tehnologije izrade, stijenke cijevi od lijevanog željeza moraju biti deblje nego kod cijevi od čelika, pa je cjevovod od lijevanog željeza znatno teži.

Ako cjevovod od lijevanog željeza nema potpuno ravnu liniju polaganja ili je potrebno grananje, moraju se upotrebljavati fazonski komadi od lijevanog željeza različitih standardiziranih oblika. Razlog tome je u činjenici, da je jednom izrađenu (odlivenu) cijev nemoguće naknadno zakriviti, što je uobičajeni postupak kod svih ostalih materijala za izradu cijevi. Na kraju izrada cijevi, upotreba cijevi iz lijevanog željeza ograničena je u odnosu na radnu temperaturu transportiranog medija.

Na starijim brodovima cijevi od lijevanog željeza korištene su za drenažne cjevovode. Danas se taj materijal koristi za izradu spirala za grijanje tankova goriva i na tankerima za izradu cjevovoda tereta. Klasifikacijska društva dozvoljavaju upotrebu lijevanog željeza za pojedine cjevovode, ali samo u slučajevima, gdje su prednosti lijevanog željeza izrazite u odnosu na čelik (povećana otpornost na koroziju i dugotrajnost upotrebe). Lijevano željezo je otpornije na koroziju od ugljičnog čelika, pa je i trajnost cijevi znatno duža. No, s vremenom iz strukture lijevanog željeza korodiraju čestice željeza, pa preostaje samo porozna struktura neistrošenog grafita neznatne čvrstoće.

Za izradu brodskih cjevovoda najčešće se upotrebljava čelik, jer je njegova čvrstoća razmjerno velika, pa je ukupna težina takvog cjevovoda relativno mala. Na prednosti upotrebe čelika za brodske cjevovode upućuju i njegova druga mehanička i tehnološka svojstva. Cijevi izravno spojene na vanjsku oplatu broda, kao i svi glavni parovodi moraju biti izrađeni od čelika. Ako je radna temperatura transportiranog medija veća od 450 °C obavezna je upotreba legiranog čelika (ovdje nisu uključeni ispušni cjevovodi motora s unutarnjim izgaranjem i dimovodi kotlova). Kod pomoćnih parovoda cijevi moraju biti od čelika, ako je radna temperatura zasićene pare veća od 250° C.

Cijevi od čelika izrađuju se u bešavnoj i šavnoj izvedbi. Uzdužni spoj na stijenci kod cijevi sa šavom može biti sa preklomom i zavaren autogenim postupkom. Stično zavarene šavne cijevi mogu biti sa ravnim i spiralnim uzdužnim zavarom. Danas se šavne cijevi uglavnom izrađuju stično zavarene električnim postupkom zavarivanja.

Bešavne cijevi su kvalitetnije te se koriste za više tlakove i temperature. No bešavne cijevi su i skuplje, pa se upotrebljavaju svagdje gdje cijevi sa šavom ne daju dovoljnu sigurnost. Glavni

parovodi se isključivo izrađuju od bešavnih cijevi u promjerima od 25 do 600 mm za sve radne tlakove i temperature.

Hrvatski registar brodova u svojim pravilima dozvoljava upotrebu cijevi sa šavom izvedenim električnim postupkom zavarivanja za cjevovode sa radnim tlakom do cca 0,5 MPa uz uvjet, da su takve cijevi izrađene kod priznatog proizvođača. Naime, najveći nedostatak cijevi sa šavom još uvijek jest, da materijal na mjestu zavarivanja nije 100 % homogen po duljini šava. Zbog toga nije osigurana nepropusnost naročito u slučajevima, kada u takvu cijev treba oblikovati postupkom savijanja. Tehnika zavarivanja je toliko napredovala da omogućava kvalitetno izvođenje uzdužnog stičnog šava na cijevima, ali postupci kontrole takvog šava u tehnološkom postupku kontinuirane proizvodnje još uvijek, kod većine proizvođača, ne osiguravaju detekciju i odbacivanje svih cijevi sa greškama u šavu.

Cijevi se u proizvodnji izrađuju sa većim ili manjim odstupanjima od propisanih promjera i debljina stijenka. Veličina tih odstupanja od nazivnih mjera propisana je u nacionalnim standardima za cijev, gdje su također propisani i ostali uvjeti za isporuku za svaki pojedini asortiman. Odstupanja od nazivnih promjera i debljina stijenki mnogo su manja kod cijevi sa stičnim elektrozavarenim šavom nego kod bešavnih cijevi, dakle šavne cijevi su preciznije. To je njihova prednost naročito u onim slučajevima, gdje su za izvedbu konstrukcije značajna što manja dimenzijska odstupanja kod cijevi (npr. u kotlogradnji, izradi izmjenjivača topline itd.).

Pored čeličnih, na brodovima se vrlo često upotrebljavaju cijevi od bakra i bakrenih legura (Al-bronca, Cu-Sn, Cu-Ni), zbog njihove velike otpornosti na koroziju. No čvrstoća bakra se dosta naglo smanjuje sa povećanjem temperature, pa je upotreba cijevi od bakra za parovode svježje zasićene pare dozvoljena do radnog tlaka cca. 2,5 MPa i radne temperature do 250 °C. Za transportiranje pregrijane pare upotreba cijevi od bakra nije dozvoljena.

Bakrene cijevi za radni tlak veći od 0,5 MPa moraju biti bešavne. Kratke cijevi velikih promjera, kao što su na primjer cijevi sa rashladnom vodom između pumpe, koje često imaju dvodimenzionalna zakrivljenja, izvedu se od preklapno autogeno zavarenih bakrenih limova. Jedino se od bakra, kao vrlo kovkog materijala, mogu izvesti takvi oblici sa kratkim zakrivljenjima.

Od bakrenih cijevi izrađuju se cjevovodi pomoćnog parovoda zasićene pare, cjevovodi ispušne pare, te cjevovodi za ulje. Kod pomoćnih parovoda i cjevovoda ispušne pare važna je otpornost bakra na koroziju, jer je unutrašnjost tih cijevi često vlažna zbog povremenog rada pomoćnih strojeva. Kada bi te cijevi bile od čelika, vrlo brzo bi korodirale. Bakrene cijevi bi bile dobre i za cjevovod drenaže, ali bi u tom slučaju zbog uvijek prisutne vlage u kaljuži, korodirala čelična oplata broda u blizini bakrenih cijevi, a to je nepovoljno.

Bakar ima svojstvo da uslijed zagrijavanja i hlađenja postaje tvrd i krhak, što je slučaj kod pomoćnih parovoda. U istom smislu na bakar djeluju i uvijek prisutne vibracije cjevovoda. Zbog toga treba prilikom periodičnih glavnih popravaka broda sve bakrene cijevi demontirati i omekšati (zagrijati i naglo hladiti u vodi – isti postupak kao kod kaljenja čelika, ali sa suprotnim efektom).

Mjed se često upotrebljava za cjevovod govornih cijevi, jer mjedene cijevi u tvrdoj izvedbi najbolje provoda zvučne valove. To su obično cijevi tankih stijenki, pa ih na izloženim mjestima treba zaštititi od vanjskih mehaničkih povreda.

U posljednje vrijeme se na tankerima upotrebljavaju cijevi od aluminijskih legura za izradu spirala za grijanje tereta u tankovima. Razlog tome je njihova mala težina i povoljniji koeficijent prijelaza topline (kod aluminijskih legura je za cca 2 puta povoljniji nego kod čelika). No, aluminij ima vrlo malu otpornost na galvansku koroziju. Zbog toga u ležištima takvih aluminijskih cijevi pažljivim izoliranjem treba izbjeći bilo kakav metalni kontakt, koji bi omogućio pojavu toka galvanskih struja.

Olovo je vrlo otporno na obje vrste korozivnih djelovanja prisutne na brodovima. Zbog toga su se olovne cijevi ranije dosta upotrebljavale za cjevovode drenaže. No, olovo je vrlo mekano, pa se olovne cijevi lako ulupe i stisnu (deformiraju), a osim toga ima i nisko talište (327 °C). Zbog toga olovne cijevi treba zaštititi na svim onim mjestima (npr. u skladištima), gdje mogu biti oštećene, te se ne smiju polagati u prostore gdje je temperatura povišena ili bi mogla porasti u kratkom vremenu. Zbog niskog tališta olovne cijevi se ne smiju koristiti za cjevovod drenaže koji prolazi kroz kotlovnice.

Shodno tome, olovne cijevi se danas na brodovima upotrebljavaju na malo mjesta. Ugrađuju se kao kratke cijevi u sanitarni cjevovod neposredno ispred i iza umivaonika i sličnih sanitarnih uređaja, gdje cijev obično treba oblikovati na samom mjestu montaže, a za to je olovna cijev najpodesnija, obzirom da se može savijati rukom i bez predgrijavanja. Zatim se ugrađuju u izljeve klozeta, ili se čelične cijevi oblažu olovom, jer olovo zbog svoje otpornosti prema organskim kiselinama u takvim izljevima praktički traje neograničeno, a čelik bi relativno brzo propao (korodirao).

Na brodovima sve širu primjenu dobivaju cijevi izrađene od plastičnih masa, kao što su polivinilklorid, polietilen, polipropilen i poliamidi. Cijevi iz plastičnih masa zbog posjedovanja niza svojstava veoma su pogodne za primjenu na brodovima. To su: vrlo lagana obrada i oblikovanje u željenu formu, nemaju mirisa, mala im je masa, ne pucaju kod smrzavanja, dobar su izolator, lako se spajaju lemljenjem i posjeduju veliku otpornost protiv korozije. No, cijevi iz plastičnih masa su osjetljive na udarce, imaju veliki toplinski koeficijent rastezanja, a također nisu pogodne za radne temperature medija iznad 60 °C. S obzirom na opisana svojstva za očekivati je, da će cijevi iz plastičnih masa na brodovima prvenstveno zamijeniti olovne cijevi.

Treba još spomenuti sve češće slučajeve oblaganja čeličnih cijevi iznutra sa slojem plastike. Na taj način se uz korištenje visokih mehaničkih svojstava čelika koristi velika antikorozivna otpornost plastičnih masa. Takve cijevi se mogu upotrebljavati i za vrlo agresivne medije.

Veliku budućnost upotrebe na brodovima imaju cijevi od stakloplastike izrađene na osnovi poliestera i epoxy smola, zbog niza pozitivnih i vrlo dobrih svojstava stakloplastike kao materijala.

Na današnjim brodovima, posebno na ratnim, primjenjuje se i elastično temeljenje pojedinih strojeva, uređaja i mehanizama. Klasičan način pričvršćenja cjevovoda na elastično temeljene strojeve i uređaje nije izvodljiv, jer se u tom slučaju bitno smanjuje ili čak poništava efekt elastičnog temeljenja. Ovdje se moraju koristiti fleksibilni spojevi, koji mogu biti izrađeni od

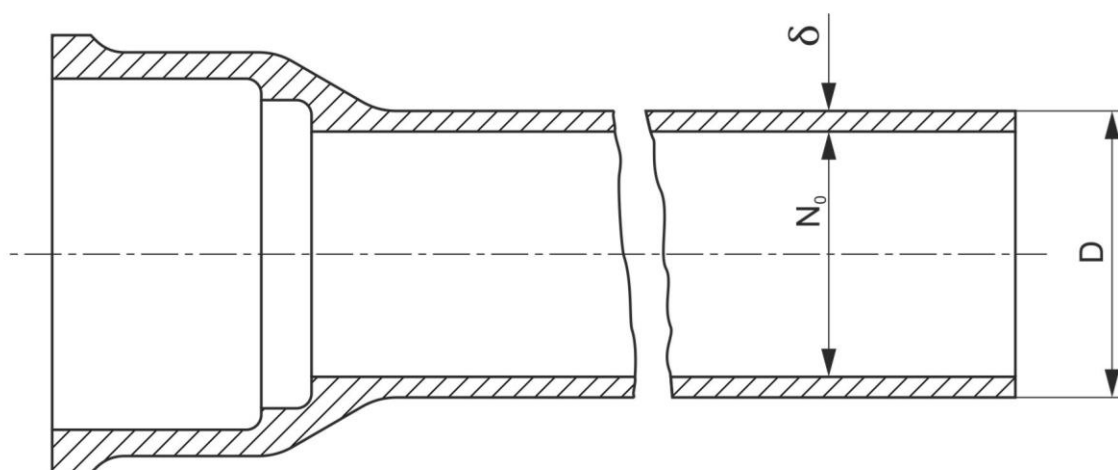
platnenih cijevi obloženih gumom, gumenih cijevi sa metalnim ojačanjem, platnenih cijevi obloženih gumom i sa metalnim ojačanjem, kao i od metalnih fleksibilnih cijevi. Općenito se može reći, da su fleksibilne cijevi sposobne za prijenos svih vrsti medija koje susrećemo na brodovima, za sve temperature i radne tlakove, uključujući i vrlo visoke. Mogućnost upotrebe svake pojedine vrste fleksibilnih cijevi ovisi o materijalu i konstruktivnoj izvedbi. Svaki proizvođač fleksibilnih cijevi obavezno daje podatke o ograničenjima u odnosu na radnu temperaturu, tlak i vrste medija. Kod primjene projektant se mora pridržavati navedenih podataka.

Klasifikacijska društva dozvoljavaju upotrebu fleksibilnih cijevi za spajanje cjevovoda sa strojevima i uređajima, ali uz uvjet, da fleksibilni spojevi budu po mogućnosti što kraći i postavljeni na vidljivim i lako dostupnim mjestima unutar broda.

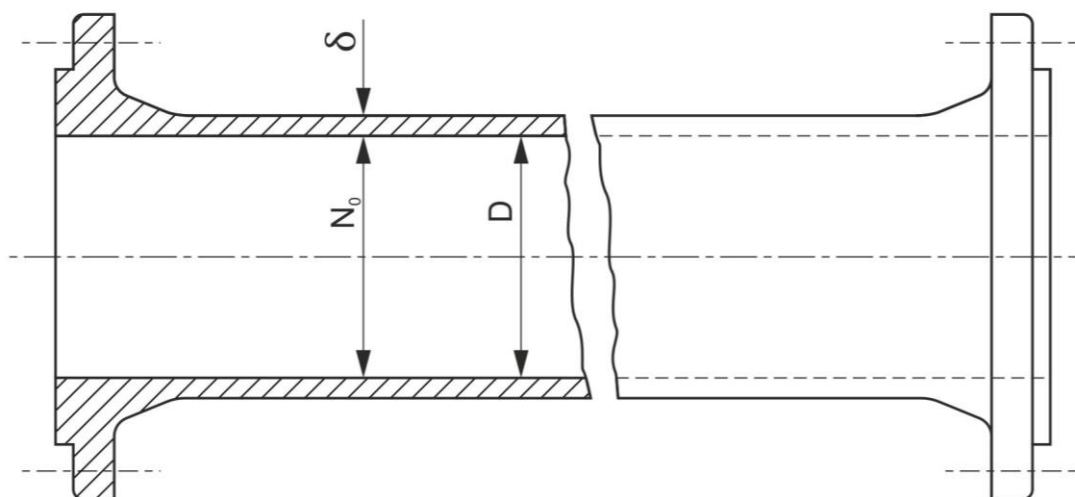
Nakon upoznavanja raznih materijala, koji se koriste za izradu brodskih cjevovoda, neophodno je upoznati se i sa standardiziranim dimenzijama cijevi kakve se mogu nabaviti kod proizvođača ili na tržištu. Bilo bi potpuno neekonomično da se cijevi i armatura proizvode u svim onim dimenzijama, koje rezultiraju iz proračuna cjevovoda. Radi toga se za standardizirane serije dimenzija cijevi koriste standardni brojevi prema prijedlogu ISO. Nizovi standardnih brojeva, prihvaćeni u svim državama u svijetu, svrstani su u 4 osnovna reda : R5, R10, R20 i R40, te u izuzetni red R80. Standardni brojevi u osnovnim i u izuzetnom redu su zaokružene vrijednosti članova odnosnog geometrijskog reda, koji sadrži cijele potencije od $\sqrt[5]{10}$, $\sqrt[10]{10}$, $\sqrt[20]{10}$, $\sqrt[40]{10}$, odnosno $\sqrt[80]{10}$. Unutarnji promjeri u nacionalnim standardnim brojevima iz osnovnog reda R40 i izuzetnog reda R80.

Cijevi iz lijevanog željeza proizvode se u dva oblika:

- a.- sa kolčakom prema Slici 6-1 i
- b.- sa priрубnicama prema Slici 6-2.



Slika 6-1 Cijev sa kolčakom



Slika 6-2 Cijev sa prirubnicama

Promjeri i debljine stijenki ravnog cilindričnog dijela cijevi prikazani su u tablici 5-2. Stvarne mjere na izrađenim cijevima nisu potpuno istovjetne sa prikazanim u tablici 5-2. Za cijev od lijevanog željeza odstupanja od mjera prikazanih u tablici 5-2 propisana su u standardima u granicama dozvoljenih odstupanja po preporuci ISO (na primjer u DIN 28600). Do nazivnog promjera 150 mm cijevi se proizvode sa duljinom 2-3 metra, a iznad tog nazivnog promjera sa duljinama 3-4 metra. Na brodovima se upotrebljavaju cijevi sa prirubnicama prema Slici 6-2.

Čelične cijevi izrađuju se u velikom asortimanu. Od svih mogućnosti, koje susrećemo na tržištu gotovih čeličnih cijevi, za izradu brodskih cjevovoda najviše se upotrebljavaju slijedeće:

- Toplo valjane ili vučene plinske crne i vodovodne pocinčane, srednje teške i teške cijevi sa navojem, dimenzija prema DIN 2440 i 2441,
- 2- Toplo valjane ili vučene konstrukcijske bešavne i šavne cijevi, dimenzija prema DIN 2448 i 2458
- 3- Toplo valjane ili vučene kotlovne bešavne cijevi, , dimenzija prema DIN 2448
- 4- Hladno vučene ili valjane precizne cijevi bez šava, dimenzija prema DIN 2391
- 5- Hladno vučene ili valjane precizne cijevi sa šavom , dimenzija prema DIN 2393.

Dimenzije konstrukcijskih bešavnih i šavnih cijevi, te kotlovnih bešavnih cijevi standardizirane su u DIN 2448 i 2458.

Cijevi od plastičnih masa proizvode se u 4 različite izvedbe, što ovisi o dozvoljenoj visini radnog tlaka. Za sve cijevi izrađene od plastičnih masa zajedničko je, da im je radna temperatura ograničena do vrijednosti 60° C. Izrađuju se od plastičnih masa velike i male specifične težine, pa su ovisno o upotrijebljenoj kvaliteti za isti radni tlak različitih debljina stijenki. Svaka izvedba se može primjenjivati do određenog maksimalnog radnog tlaka, i to :

a.- laka izvedba do 0,25 MPa,

- b.- srednje-laka izvedba do 0,4 MPa,
- c.- srednja izvedba do 0,6 MPa i
- d.- teška izvedba do 1 MPa.

Za cijevi od stakloplastike za sada ne postoje podaci o njihovoj proizvodnji. To je i normalno, s obzirom da se tek treba razraditi proizvodnja takvih cijevi u svijetu.

Kod fleksibilnih cijevi razlikuju se dvije bitno različite izvedbe prema strukturi poprečnog presjeka stijenke cijevi. Prva izvedba ima gumu kao osnovu poprečnog presjeka stijenke, ojačanu sa jednim ili više slojeva oplatki (čarapica) izrađenih od platna (tkanine) ili od metalnih žica, ukomponiranih između slojeva gume. Na unutarnjem i vanjskom promjeru gotovih cijevi ova ojačanja ne smiju provirivati izvan površine gume. Druga izvedba su metalne spiralno valovite cijevi redovito izvane ojačane sa jednim ili više slojeva opletke izrađenih od metalnih žica.

Cijevi u prvoj izvedbi, nazivamo ih gumene sa ojačanjima, izrađuju se sa sljedećim parametrima:

- 1.- za ulje i gorivo (uključujući i benzin) radnog tlaka do 0,5 MPa i radne temperature od -40°C do $+80^{\circ}\text{C}$ sa $d_u=25$ do 75 mm,
- 2.- za tekućine i plinove radnog tlaka do 1 MPa i radne temperature od -30 do $+50^{\circ}\text{C}$ sa $d_u=16$ do 352 mm,
- 3.- za razne vrste tekućina uključivo i kemijski agresivne (kiseline i lužine koncentracije do 20 %) radnog tlaka do 2,5 MPa i radne temperature od -30 do $+100^{\circ}\text{C}$ sa $d_u=9$ do 15 mm,
- 4.- za vodu, zrak, gorivo i ulje radnog tlaka do 10 MPa i radne temperature od -50 do $+100^{\circ}\text{C}$ sa $d_u=4$ do 50 mm,
- 5.- za tekućine, gorivo i komprimirani zrak radnog tlaka do 30 MPa i radne temperature od -50 do $+100^{\circ}\text{C}$ sa $d_u=4$ do 38 mm, i
- 6.- za zasićenu paru radnog tlaka do 0,8 MPa sa $d_u=12$ do 50 mm.

Primjena gumenih cijevi sa ojačanjima je vrlo široka u odnosu na vrste radnih medija zahvaljujući činjenici, da danas to omogućuje tehnologije proizvodnje gume. Svaki proizvođač uvijek daje podatke za koje vrste uređaja, te kod kojeg se najvećeg radnog tlaka i radne temperature može koristiti pojedina gumena cijev.

Druga izvedba, nazovimo ih fleksibilne metalne cijevi, izrađuju se za sve vrste kemijski neagresivnih tekućina do radnog tlaka 6,4 MPa i radne temperature 150°C sa $d_u=20, 25, 32, 40$ i 50 mm. Njihova primjena je najčešća u sustavima cjevovoda hidraulike.

Sva klasifikacijska društva propisuju da jedan dio brodskih cjevovoda mora biti izrađen od cijevi kvalitativno preuzetih kod proizvođača. Te cijevi moraju udovoljavati zahtjevima propisanim u pravilima klasifikacijskih društava. Cijevi namijenjene za brodske cjevovode svrstane iznad te granice moraju:

- a.- potpuno udovoljavati zahtjevima pravila klasifikacijskog društva,
- b.- biti preuzeta od eksperta klasifikacijskog društva kod proizvođača,

c.- posebno označene i

d.- za njih klasifikacijsko društvo izdaje uvjerenje.

Hrvatski registar brodova zahtijeva da svi cjevovodi sa radnim tlakom većim od 0,69 MPa, bez obzira na vrstu medija, odnosno sa radnom temperaturom:

- pare i plinova većom od 250° C

- vode većom od 150° C

- ulja za podmazivanje većom od 90° C

- tekućeg goriva većom od 55° C

moraju biti izrađene od cijevi koje udovoljavaju zahtjevima pravila i posjeduju uvjerenje Hrvatskog registra brodova.

U pravilima klasifikacijskih društava propisana je za cijevi izrađene od čelika:

a.- kemijski sastav materijala,

b.- mehanička svojstva (granica razvlačenja, čvrstoća, izduženje δ mjereno na proporcionalnoj epruveti $l_0 = 5,65 \cdot \sqrt{A_c}$, za pojedine slučajeve granica razvlačenja kod povišenih temperatura, te za pojedine slučajeve žilavosti materijala),

c.- Tehnološka svojstva (spljoštavanje, proširivanje, prirubljivanje, razvlačenje prstena),

d.- visina obavezne tlačne probe svake cijevi pojedinačno radi ispitivanja na nepropusnost,

e.- dozvoljena odstupanja promjera i debljine stijenke od nazivnih veličina, i

f.- ispitivanje jednom od metoda bez razaranja sa šavom.

Ispitivanja se provode za skupinu cijevi istih nazivnih dimenzija, iz iste šarže i grupe toplinske obrade. Vrlo precizno je određena i veličina skupine sa brojem cijevi u skupini. Nacionalni standardi (DIN) se ne razlikuju mnogo od opisanih zahtjeva klasifikacijskih društava- oni su još detaljniji i precizniji.

Za cijevi izrađene od ostalih materijala, čija je upotreba moguća na brodovima, pravila klasifikacijskog društva također određuju osnovna kemijska, mehanička i tehnološka svojstva materijala.

U postupku preuzimanja cijevi kod proizvođača ekspert klasifikacijskog društva provjerava putem postupaka ispitivanja i pregleda cijevi, da li su zadovoljeni svi zahtjevi pravila. U slučaju pozitivnih rezultata, na svaku cijev se utiskuje posebna oznaka klasifikacijskog društva i društvo izdaje uvjerenje za preuzete cijevi. U uvjerenju se obavezno naznačuje oznaka otisnuta na cijevi radi identifikacije, jer se jedino takve cijevi u brodogradilištima smiju upotrijebiti za izradu brodskih cjevovoda svrstanih iznad ranije spomenute granice, što opet provjerava ekspert klasifikacijskog društva, koji nadzire gradnju broda.

Kod gradnje ratnih brodova i izrade cjevovoda za iste opisani postupak preuzimanja cijevi kod proizvođača nije obavezan i ovisi o stavu pojedine ratne mornarice. Naime, ratni brod kod gradnje ne podliježe nadzoru klasifikacijskog društva, već taj nadzor vrši ratna mornarica sa

svojim kontrolnim organima, pa tako i sav materijal, uključujući i cijevi, upotrijebljen za gradnju ratnog broda može imati samo tvorničke ateste, može biti preuzet od kontrolnih organa ratne mornarice po posebnim tehničkim uvjetima ili može imati uvjerenje klasifikacijskog društva.

7. SIMBOLIKA I OZNAČAVANJE CIJEVI I ARMATURA

Svako brodogradilište ima svoju ustaljenu tehnologiju izrade cjevovoda na brodu. Kod toga treba strogo razlikovati tehnologiju izrade cjevovoda na novogradnji, od tehnologije za eventualne dopune postojećih cjevovoda kada je brod na popravku, remontu ili obnovi klase. Tehnologiji izrade cjevovoda u radionici svako brodogradilište podredilo je i izradu tehničke dokumentacije. Razmotriti ćemo nešto detaljnije način izrade nacrtu, odnosno shema pojedinih cjevovoda.

U projektnim biroima brodogradilišta uobičajeno je da se za izvedbu cjevovoda izrađuju nacrti, odnosno sheme, ovisno i usvojenoj tehnologiji izrade cjevovoda u radionici, i to:

- a.- nacrti cjevovoda sa kotiranjem točnog oblika svake cijevi i točnim prikazivanjem u mjerilu polaganja cjevovoda unutar trupa broda,
- b.- nacrti cjevovoda bez kotiranja točnog oblika svake cijevi, ali sa točnim prikazivanjem u mjerilu polaganja cjevovoda unutar trupa broda i
- c.- sheme cjevovoda su shematskim prikazivanjem principa spajanja, ugrađene armature i opreme, te sa približnim prikazivanjem načina polaganja cjevovoda unutar trupa broda.
- d. – prostorni prikazi i sheme korištenjem prikladnih računalnih programa (npr. Tribon).

Izrada nacrtu cjevovoda sa kotiranjem točnog oblika svake cijevi omogućuje prikazivanje više sustava cjevovoda na jednom nacrtu. Primjenom raznih boja sustavi cjevovoda se mogu međusobno veoma uočljivo razlikovati. Zahtijeva veliki utrošak vremena za izradu nacrtu u projektnom birou. Omogućuje izradu pojedinih dijelova cjevovoda u radionici bez uzimanja mjera na samom brodu. Na brodu je uglavnom samo završni dio montaže cjevovoda, opreme i armature. Za opisani način rada mora biti ispunjen preduvjet, da je izrada trupa broda i njegovih elemenata veoma precizna, jer svako odstupanje od nacrtu trupa automatski povlači izmjene i na nacrtima cjevovoda. Sadašnji način gradnje trgovačkih brodova u brodogradilištima u osnovi je individualan, pa su realna i moguća odstupanja od nacrtu kod gradnje trupa broda. Zbog toga izloženi način izrade nacrtu cjevovoda nije podoban i svrsishodan. Dakle, nacrti cjevovoda sa kotiranjem točnog oblika svake cijevi upotrebljivi su kod serijske gradnje manjih brodova, gdje se lakše može osigurati točnost i preciznost izrade trupa i njegovih elemenata. Konstatirajmo na kraju da se na tako izrađenim nacrtima u mjerilu prikazuje i armatura, oprema i uređaji.

Izrada nacrtu cjevovoda bez kotiranja točnog oblika svake cijevi, ali sa točnim prikazivanjem u mjerilu polaganja svakog cjevovoda, također omogućuje prikazivanje više sustava cjevovoda na jednom nacrtu. Primjenom boja sustavi cjevovoda se mogu međusobno uočljivo razlikovati. Za izradu ovih nacrtu u projektnom birou je osjetno manji potreban utrošak vremena. U ovom slučaju izrada pojedinim dijelova cjevovoda izvodi se tako, da se prethodno izradi model dijela trupa (uglavnom strojarnice i kotlovnice), ili se formira šablona na samom brodu. Na modelu se detaljno, ali u mjerilu, utvrđuju oblik i mjere pojedinih dijelova cjevovoda. Obzirom da se u pravilu u ovom slučaju predviđa konačno oblikovanje cjevovoda uz pomoć modela dijela trupa broda, izrada kojega zahtijeva dodatne troškove, ovaj način izrade cjevovoda pogodan je kod uzastopne gradnje više jednakih brodova. Realno prisutne netočnosti kod gradnje trupa broda od

manjeg su značaja na izmjene u izradi cjevovoda. Na ovako izrađenim nacrtima cjevovoda mora se u mjerilu prikazati i armatura, oprema i uređaji.

U oba opisana slučaja, velike su uštede u utrošenom vremenu kod izrade dijelova cjevovoda u radionici, obzirom da radnici trebaju ići zanemarivo malo ili uopće ne moraju ići na brod u toj fazi. To je i velika prednost opisanih načina izrade cjevovoda.

Izrada shema cjevovoda sa shematskim prikazivanjem principa spajanja, ugrađene armature i opreme, zahtijeva najmanji utrošak vremena u projektnom birou brodogradilišta. Kod ovog načina izrade dokumentacije u pravilu za svaki sustav cjevovoda potrebno je izraditi posebnu shemu, iako i ovdje postoji mogućnost primjene raznih boja. Radnici u radionici mogu pristupiti izradi cjevovoda prema shemi, ako su prethodno na brodu pomoću šablone snimili točan oblik i duljinske mjere dijelova cjevovoda. Druga mogućnost izrade cjevovoda prema shemi je već naprijed opisana izrada i upotreba modela dijelova trupa broda. Kod izrade shema cjevovoda evidentna je ušteda vremena u projektnom birou, ali zato uzrokuju potrebu osjetno većeg utroška vremena u fazi izrade cjevovoda u radionici.

Za jednoznačno tumačenje i razumijevanje nacrtane sheme cjevovoda nužna je upotreba unaprijed dogovorenih oznaka za cjevovod, armaturu i opremu, koje nazivamo zajedničkim imenom simbolika. Literatura i standardi preporučuju izgleda svake pojedine oznake za upotrebu na shemama, za koje obično na svakoj shemi daje i tumačenje. Sustav oznaka brodogradilišta ipak nije u potpunosti istovjetan sa oznakama preporučenim u standardima.

Spomenuta je mogućnost upotrebe raznih boja na nacrtima i shemama brodskih cjevovoda. Ako je na jednom nacrtu ili shemi prikazano više sustava cjevovoda, neophodna je upotreba boja, da bi se pojedini vodovi mogli međusobno brzo i uočljivo razlikovati. Upotreba koja je moguća i preporučljiva i na onim nacrtima odnosno shemama, gdje je prikazan samo jedan sustav cjevovoda. Na takvom nacrtu odnosno shemi postojat će samo jedna boja.

Kod primjene boja na nacrtima postoje mogućnosti korištenja jedne nijanse boje za različite medije, što ovisi samo o projektnom uredu, autoru nacрта ili sheme. Radi izbjegavanja takvih slučajeva, nacionalni standardi propisuju osnovne boje za određene vrste medija. Tako su u DIN standardima (DIN 2403) propisane za pojedine vrste medija nijanse boja, koje se moraju koristiti kod stacionarnih postrojenja.

Nijanse boja propisane za stacionarna postrojenja nisu pogodne za primjenu u brodogradnji prvenstveno zbog toga, što se ne podudaraju sa dugogodišnjom tradicijom korištenja pojedinih nijansi boja za cjevovode na brodovima. Radi toga su kod nas izrađeni posebni standardi brodogradnje, gdje je propisan i način upotrebe boja za pojedine vrste medija odnosno za sustave cjevovoda, a obavezan je za primjenu kod trgovačkih brodova. Paralelno postoje i standardi Ratne mornarice, koji u jednom dijelu također propisuju nijanse boja za obaveznu primjenu na ratnim brodovima.

Za trgovačke brodove u standardu SB 4123, a za ratne brodove u standardima RM201, RM207, RM208, propisane su nijanse boja za pojedine vrste medija, odnosno za sustave cjevovoda, koje treba primjenjivati na nacrtima i shemama brodskih cjevovoda. Boje propisane za upotrebu na nacrtima i shemama uglavnom su istovjetne sa bojama propisanim za označavanje cjevovoda i armature na brodovima. Treba još spomenuti, da upotreba boja na nacrtima i shemama pored

izrazitih prednosti ima i veliki nedostatak. On je posljedica činjenice da prijenos nijansi boja nije moguć kod ustaljenog postupka kopiranja nacrtu u projektnim biroima brodogradilišta. Zbog toga se nakon kopiranja u projektnom birou mora na svaku pojedinu kopiju ucrtati boje na odgovarajuće cjevovode, što može biti pozamašan posao naročito u koliko se nacrt umnožava u veći broj kopija.

Izvedeni i montirani cjevovod na brodovima (trgovačkim i ratnim) spremni za eksploataciju, također moraju biti vidljivo označeni bojama prema vrstama medija odnosno sustavima. U protivnom prilikom rukovanja sa njime za vrijeme pogona može doći do pogrešaka, koje mogu biti veoma kobne za normalno funkcioniranje pogona, kao i za život i egzistenciju broda, putnika i posade. Označavanje bojama cijevi i armature, kao sastavnih dijelova pojedinih cjevovoda veoma je važno i za slučajeve remonta odnosno obnove klase, kada se neminovno demontiraju dijelovi i čitav cjevovod. Kod ponovne montaže, na taj način je na minimum svedena mogućnost zamjene ili pogrešne montaže armature, cijevi ili opreme pojedinog cjevovoda, a ujedno se postižu velike uštede u vremenu potrebnom za ponovnu montažu.

Standardi brodogradnje i standardi ratne mornarice nisu potpuno identični u propisivanju nijansi boja za pojedine medije, pa su zbog toga navedeni najosnovniji podaci iz oba standarda. Za primjenu kod trgovačkih brodova u standardima SB4920 i SB4921 propisano je 9 nijansi osnovnih boja i 2 nijanse dopunskih sigurnosnih boja za označavanje cjevovoda i armature. Osnovne boje su:

Za morsku vodu	Zelena
Za slatku vodu	Ultramarin
Za paru	Siva
Za gorivo	Smeđa
Za ulje	Narančasta
Za zrak	Nebesko plava
Za plinove	Oker
Za kiseline i lužine	Ljubičasta
Za razne tekućine	Crna

Dopunske sigurnosne boje su:

Za gašenje požara	Crvena
Za opasnost	Žuta sa crnim prugama

Za primjenu kod ratnih brodova u standardu RM20 propisano je 9 nijansi osnovnih boja za označavanje cjevovoda i armature, i to:

Za morsku vodu	Zelena
Za slatku vodu	Žuta
Za kaljužu i otpadne vode	Narančasta
Za ulje	Smeđa
Za gorivo	Crna
Za protupožarne sustave	Crvena
Za zrak	Plava
Za razne plinove	Ljubičasta
Za vodenu paru	Siva

Cijevi cjevovoda montiranih na brodu moraju biti označene u neposrednoj blizini svakog prirubničkog spoja, pregradnog ili palubnog prolaza, kao i na svakih 1 ili 2 metra po duljini cijevi. Oznaka se sastoji od osnovne boje propisane za dotičnu vrstu medija i dopunske boje za pobliže označavanje sustava cjevovoda (tj. namjenu cjevovoda za određenu službu). Dopunska boja nanosi se tako da duljinu osnovne boje dijeli na tri približno jednaka polja. Preostalu (veću) duljinu cijevi treba obojiti sa nijansom boje prostora gdje je montirana, radi njezine zaštita od korozije.

Kod trgovačkih brodova umjesto nanašanja boje, označavanje cijevi može se izvesti i pomoću obojenih plastičnih traka, kod kojih se tada umjesto dopunske boje koristi ispisani naziv službe. Sva armatura mora biti obojena sa propisanom osnovnom bojom prema vrsti medija odnosno sustava. Od navedenog dozvoljena su odstupanja samo u pojedinim iznimnim slučajevima.

8. METODOLOGIJA PRORAČUNA CJEVOVODA

U osnovi, svaki sustav cjevovoda služi za prijenos nekog medija od izvora do potrošnog mjesta, u najopćenitijem smislu riječi, u procesima energetskog broorskog sustava i raznih drugih djelatnosti ili namjena. Prema tome, cjevovod prvenstveno treba projektirati tako da se kroz njega može transportirati određena količina medija u jedinici vremena sa nekom brzinom strujanja. Kod transportiranja medija kroz ravne cijevi, razna koljena i zakrivljenja, armaturu i opremu ugrađenu u cjevovod pojavljuju se otpori, koje treba savladati pomoću nekog uređaja za transportiranje medija kroz cjevovod – u većini slučajeva to je neka pumpa. Osnova za analitičko rješavanje navedenih pitanja nalazi se u nauci o gibanju tekućina i plinova kroz cijevi – mehanici fluida. Kao rezultat ovih proračuna dobiva se proračunski iznos promjera cijevi i vrijednosti otpora koje treba savladati, da bi određena količina fluida prolazila kroz cijev sa željenom brzinom. Podatak o veličini otpora potreban je za definiranje visine radnog tlaka i za određivanje karakteristika pumpi za transportiranje potrebne količine medija. Sa određivanjem unutarnjeg promjera cijevi dobiven je prvi podatak za dimenzioniranje i izbor cijevi, opreme i armature za dotični cjevovod. Ovaj dio proračuna nazivamo hidraulički proračun cjevovoda.

Nakon analitičkog određivanja unutarnjeg promjera slijedi izbor materijala i konačnih dimenzija cijevi. Za ovaj dio proračuna osnovni parametri su radni tlak, radna temperatura i vrsta medija kojeg treba transportirati kroz cjevovod. Ovdje se koriste saznanja iz tehnologije materijala, te metode i postupci proračuna iz nauke o čvrstoći. Rezultat ovog dijela analitičkog rješavanja je konačni izbor vrste materijala, debljina stijenke cijevi, dimenzioniranje svih vrsta spojeva na cjevovodu, te dimenzioniranje opreme i armature. Sa poznatim unutarnjim promjerom i debljinom stijenke omogućen je konačan izbor cijevi iz standardiziranih proizvodnih programa.

Do sada dobiveni rezultati analitičkih proračuna omogućuju izradu projekta cjevovoda. No rad na projektiranju još nije gotov. Jedan dio cijevi se mora ovjesiti ili osloniti na brodsku konstrukciju, da ne bi uslijed vlastite težine i težine medija u njima dobile nedozvoljeno velike progibe u smjeru okomitom na os cijevi.

Nadalje, cijevi za transportiranje medija sa povišenom temperaturom biti će zagrijane u odnosu na konstrukciju broda, pa će se i njihova duljina promijeniti u odnosu na početnu montažnu duljinu kod temperature okoline. Kod veće duljine cijevi i zagrijavanja stijenke cijevi, tj. veće razlike temperature stijenke cijevi i konstrukcije broorskog trupa, bit će veća i toplinska produljenja i promjene naprezanja u materijalu cijevi uslijed pojave toplinskih produljenja. Nakon toga će projektant vjerojatno morati poduzeti i određene dodatne zahvate za doradivanje ranije izrađenog projekta cjevovoda. Ovaj dio proračuna možemo nazvati proračun elastičnosti cjevovoda.

I na kraju, treba smanjiti gubitke uslijed prolaza topline kroz stijenke cijevi od zagrijanog medija na okolni zrak ili od okolnog zraka na pothlađeni medij kod cjevovoda gdje postoje takve mogućnosti, primjenom odgovarajućih zaštitnih mjera postavljanjem izolacijskog materijala. Za analitički račun ovdje se koriste znanja iz nauke o toplini radi dimenzioniranja potrebne debljine izolacijskog sloja i određivanja vrste materijala za izradu izolacijske obloge na cijevima. Ovaj dio proračuna možemo imenovati proračun toplinske izolacije cjevovoda.

Iz izloženog je vidljivo, da se projektant brodskih cjevovoda mora poslužiti nizom proračuna radi određivanja svih parametara potrebnih za izradu projekta bilo kojeg sustava cjevovoda. Kod toga se mora pridržavati određenog redoslijeda, koji omogućuje postupno određivanje parametara. No treba naglasiti, da se redom nabrojeni proračuni, koje projektant treba koristiti kod projektiranja cjevovoda, međusobno isprepleću i da međusobno imaju prekrivanja. Dakle, nije moguće strogo povući granicu između njih i kazati na primjer, da rezultati proračuna toplinske izolacije nemaju a ma baš nikakvog utjecaja na proračun elastičnosti cjevovoda ili obrnuto. Zbog toga, na kraju projektiranja jednog sustava cjevovoda, treba međusobno usuglasiti sve rezultate dobivene analitičkim računima uzevši kod toga u obzir i elemente ekonomičnosti izrade cjevovoda.

8.1 Hidraulički proračun cjevovoda

Prilikom detaljnijeg razmatranja sustava cjevovoda bitnih za sigurnost broda (kaljužno-drenažni, protupožarni) upoznali smo se već sa izrazima za određivanje unutarnjih promjera nekih njihovih dijelova. Ovi izrazi su propisani u pravilima klasifikacijskih društava, a imaju osnovu u konvenciji SOLAS.

Tako su sva klasifikacijska društva u svijetu propisala formule za izračunavanje unutarnjeg promjera glavnog kaljužnog cjevovoda i njegovih ogranaka. Prema navedenim formulama unutarnji promjer glavnog kaljužnog cjevovoda određen je duljinom, širinom i visinom broskog trupa (umjesto duljine broskog trupa). Ovako oblikovane formule su iskustvenog karaktera – dakle forma im je empirijska, i one nemaju osnovu u teoretskom razmatranju strujanja tekućine kroz cjevovod. No kod projektiranja, unutarnji promjer glavnog kaljužnog cjevovoda i njegovih ogranaka mora biti određen pomoću propisanih izraza iz pravila onog klasifikacijskog društva čiju klasu brod mora imati.

Za protupožarni te za balastni cjevovod, neka klasifikacijska, npr. Lloyd's Register i Germanischer Lloyd za protupožarni, a Hrvatski registar brodova za balastni, propisuju formule za određivanje njihovih unutarnjih promjera. I za ove izraze stoji konstatacija da su empirijskog karaktera i bazirani na dugogodišnjem iskustvu. Njihova forma ne proističe iz korištenja dostignuća hidromehanike kod teoretskog razmatranja zakona strujanja tekućine kroz cijevi. Ipak, kod projektiranja tih cjevovoda, njihovi unutarnji promjeri moraju biti određeni pomoću tih izraza, ako klasa broda upućuje na tu obavezu.

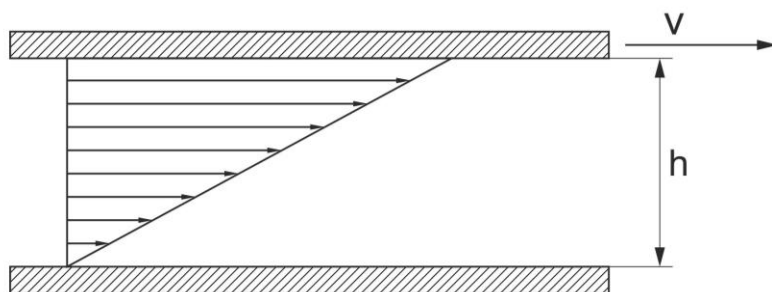
Dakle, za navedene cjevovode unutarnji promjer se određuje uz pomoć formula propisanih u pravilima klasifikacijskih društava. Kod njih još predstoji izračunavanje visine otpora strujanju tekućine kroz ravne dijelove i zakrivljenja cijevi, te ugrađenu armaturu i opremu. No na brodu postoji još čitav niz sustava cjevovoda za transportiranje tekućine i plinova, čije se dimenzioniranje može provesti jedino uz pomoć izraza, koji su rezultat teoretskog i eksperimentalnog proučavanja zakona strujanja tekućina kroz cijevi.

8.1.1 Viskoznost

Prije detaljnijeg razmatranja postupka hidrauličkog proračuna cijevi potrebno je podsjetiti se na neke osnove iz hidromehanike, korisne za bolje razumijevanje materije koja će biti izložena u nastavku. Prvenstveno treba osvježiti poznavanje pojma dinamičkog, a zatim i kinematskog viskoznosti tekućine.

Ako se uz pomoć vanjske sile djelić mase tekućine dovede u stanje gibanja, te dalje produži sa djelovanjem te vanjske sile, gibanje tekućine će se postepeno proširiti na čitavu masu tekućine. Ako se pak prekine sa djelovanjem vanjske sile, gibanje tekućine će se postepeno usporavati i na kraju potpuno prestati. Ovo svojstvo realne tekućine može se objasniti pojavom unutarnjeg trenja u tekućini, nazvanog viskoznošću. Kod krutih tvari analogna pojava je naprezanje na smik.

Zamislimo dvije paralelno ploče između kojih se nalazi sloj tekućine visine h (Slika 8-1). Donja ploča je nepokretna, a gornja se giba sa brzinom v . Pokusom se možemo uvjeriti, da će čestica tekućine, koje priliježu neposredno uz ploče, poprimiti brzine ploče uslijed sile trenja između tekućine i ploče. Za slučaj prikazan na Slici 8-1 slijedi, da će čestice tekućine, koje priliježu uz gornju ploču imati brzinu jednaku brzini v gibanja te ploče. Čitava količina tekućine može se zamišljeno podijeliti po visini h na paralelne slojeve. Eksperimentalno je dokazano, da se brzina gibanja tekućine povećava po linearnom zakonu od nule do brzine v gornje ploče i stanju gibanja, ovisno o udaljenosti od nepokretne ploče. Na taj način su u susjednim slojevima tekućine, kod njezinog gibanja, prisutne promjene brzina koje se mogu objasniti postojanjem sile trenja sa smjerom djelovanja suprotnim od smjera gibanja tekućine.



Slika 8-1 Gibanje ravne ploče na viskoznom fluidu

Za relativno pomicanje ploče u odnosu na drugu potrebna je neka sila. Ova će biti to veća, što su veće površine ploča, brzina pomicanja gornje ploče i viskoznosti tekućine, te što je manji razmak između ploča. Ako se sa S označi površina ploča, Δh razmak između susjednih slojeva tekućine, te uzimajući u obzir da je po Newtonovu zakonu sila smika proporcionalna gradijentu brzine, slijedi:

$$F = \eta \cdot S \cdot \frac{\Delta v}{\Delta h} \quad (N) \quad (15)$$

Brzina se u struji tekućine mijenja kontinuirano, pa se diferencije u (15) mogu zamijeniti diferencijalima, dakle slijedi:

$$S = \eta \cdot F \cdot \frac{dv}{dh} \quad (N) \quad (16)$$

gdje je: η - koeficijent dinamičke viskoznosti tekućine.

Koeficijent η , koji ovdje ima ulogu mjerila viskoznosti, imenovan je dinamički ili apsolutni viskoznost tekućine. Koeficijent dinamičke viskoznosti tekućine η jednak je sili trenja prilagođenoj na jedinicu površina dvaju susjednih slojeva tekućine, koji klize jedan na drugome, ako se na jedinicu duljine, mjereno na okomici površine klizanja, brzina gibanja tekućine promijeni za jedinicu.

Uvrštavanjem u (16) $S = 1 \text{ m}^2$, $\Delta v = 1 \text{ m/s}$, $\Delta h = 1 \text{ m}$, te za $F = 1 \text{ N}$, dobivamo:

$$1 \text{ N} = \eta \cdot \frac{1 \text{ m}^2 \cdot 1 \text{ m}}{1 \text{ s} \cdot 1 \text{ m}} = \eta \cdot \frac{1 \text{ m}^2}{1 \text{ s}} \quad (17)$$

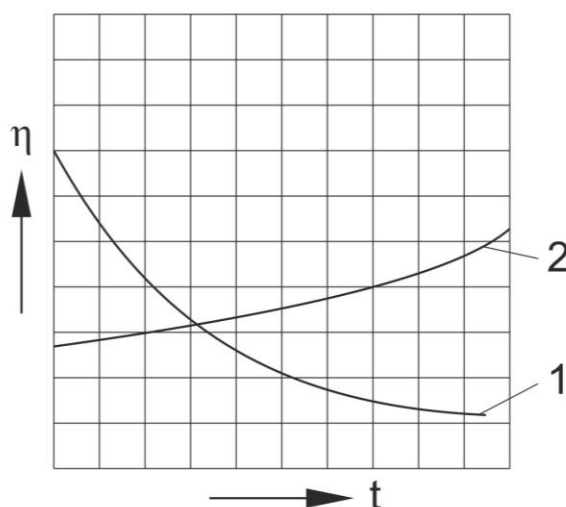
i odavde slijedi dimenzija koeficijenti dinamičke viskoznosti: $[\eta] = \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = \text{Pa} \cdot \text{s}$.

Ovisnost viskoznosti o temperaturi bitno je različita za tekućine i plinove. Dok se sa povećanjem temperature viskoznosti kod tekućina smanjuje, kod plinova se povećava. Slika 8-2 prikazuje ovisnost viskoznosti o temperaturi za tekućine (1) i plinove (2).

Makswell je uveo pojam kinematičke viskoznosti tekućine, a dobiva se dijeljenjem dinamičkog viskoznosti sa gustoćom: $\nu = \frac{\eta}{\rho}$.

Dimenzija kinematičke viskoznosti bit će:

$$[\nu] = \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (18)$$



Slika 8-2 Ovisnost viskoznosti o temperaturi

Kinematička viskoznost ovisi, a dinamički ne ovisi o gustoći tekućine. Koeficijent η , kao mjerilo apsolutnog viskoznosti, pokazuje veličinu unutarnjeg trenja interesantnu npr. kod proračunavanja ležaja. Koeficijent ν se pak pojavljuje u jednadžbama za određivanje otpora u cijevima.

U većini tehničkih proračuna za tekućine se može usvojiti da im kinematička viskoznost ovisi samo o temperaturi t , kod čega se ta ovisnost može izraziti pomoću izraza:

$$\nu = \frac{C}{(\alpha + t)^n} \quad (19)$$

gdje za svaku vrstu tekućine konstante C , α i n imaju određene vrijednosti. Na primjer, za vodu navedeni izraz ima oblik:

$$\nu = \frac{5,985}{(43,25 + t)^{1,542}} \cdot 10^{-7} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (20)$$

Za izračunavanje kinematičke viskoznosti vode također se može upotrijebiti i jednadžba Poisseuillea (za interval $273 \text{ K} < t < 373 \text{ K}$):

$$\nu = \frac{1,78}{1 + 0,0337 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2} \cdot 10^{-6} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (21)$$

Kinematička viskoznost vode kod 293 K jednaka je: $\nu = 1,0038 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Kod ulja za podmazivanje je karakteristično, da im krivulja promjene viskoznosti u ovisnosti o temperaturi može imati različite nagibe, tj. da im se viskoznost mijenja brže ili sporije sa promjenom temperature unutar istog temperaturnog intervala.

Podaci o kinematičkoj viskoznosti raznih tekućina nalaze se u obliku tablica ili dijagrama u literaturi. Za brodske cjevovode kod tekućina su posebno interesantni podaci za slatku i morsku vodu, ulja za podmazivanje, te za sirova zemna ulja prema njihovom porijeklu. Na primjer, kinematička viskoznost sirove nafte iznosi $\nu \cong 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ kod 21° C . Iz analize podataka o kinematičkoj viskoznosti morske vode može se zaključiti, da joj se viskoznost smanjuje sa povećavanjem temperature, ali se značajno povećava sa povećanjem saliniteta.

Za određivanje apsolutne ili dinamičke viskoznosti potrebno je poznavanje gustoće tekućine ρ . Stoga se u istim tablicama i dijagramima istovremeno nalaze i podaci o gustoći. Konstatirajmo još da se gustoća tekućina smanjuje sa povećanjem temperature – dakle ovisna je o promjeni temperature tekućine.

Kod plinova kinematička viskoznost ovisi i o temperaturi i o tlaku. Međutim, za tehničke proračune kod malih tlakova se može zanemariti ovisnost viskoznosti plinova o tlaku. Podaci o dinamičkoj i kinematičkoj viskoznosti plinovitih medija također se mogu naći u literaturi u obliku dijagrama ili tablica. Za brodske cjevovode od plinovitih tvari posebno su interesantni podaci za pregrijanu i zasićenu paru, te za komprimirani zrak.

Primjerice, dinamička viskoznost zasićene pare veoma ovisi o tlaku i njegova vrijednost je unutar granica od $12,8$ do $44,2 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Dakle, kod povećanja tlaka od $0,1 \text{ Pa}$ do kritičnog, dinamička viskoznost se povećava $3,5$ puta. Kod pregrijane pare na temperaturu 450° C promjena dinamičke viskoznosti je mnogo manja i kreće se unutar vrijednosti od $25,5$ do

$31,4 \cdot 10^{-6}$ Pa·s Prema tome, vrijednost dinamičkog identiteta kod najviših tlakova je samo 1,2 puta veća od iste kod najnižih tlakova.

Gustoća plinovitih tvari se mnogo više mijenja sa promjenom tlaka i temperature, nego kod tekućina. Na primjer, za zrak se vrijednost kinematičke viskoznosti kod bilo kojeg tlaka može odrediti pomoću izraza:

$$\nu = \frac{\nu_{p_0}}{p} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (22)$$

gdje je : ν_{p_0} - viskoznost zraka kod tlaka $p_0 = 0,1$ MPa.

Sa povećanjem relativne vlažnosti, viskoznost zraka se mijenja vrlo malo.

Radi jednostavnosti postupka viskoznost tekućina se u svijetu ustvrđivala pomoću konvencionalnih jedinica temeljenih na uspoređivanju vremena istjecanja ispitivane tekućine sa vremenom istjecanja vode iz posude određenog volumena. Uobičajene konvencionalne jedinice za viskoznost su :

- a.- stupnjevi Englera (°E) kod +20 °C,
- b.- sekundi Redwood Standard ("RS) ili Nr1 kod 70 °F (21 °C) i
- c.- sekundi Saybolt univerzalni ("SU) kod 100 °F (+38 °C),
- d.- centiStokesi (cSt) koji su ekvivalentni mm²/s,

pa vrlo često u literaturi ili u različitim tehničkim podacima za pojedine vrste tekućine postoje podaci u navedenim konvencionalnim jedinicama. Vrijednosti za dinamičku ili kinematičku viskoznost mogu se iz konvencionalnih jedinica dobiti pomoću tablica ili dijagrama. Na primjer, u tablici 7.1-1 dat je usporedbeni pregled vrijednosti kinematičke viskoznosti i konvencionalnih jedinica.

Dinamička viskoznost se može računati iz °E pomoću izraza:

$$10^6 \cdot \eta = \gamma \cdot (0,746 \cdot [^{\circ}E] - \frac{0,643}{[^{\circ}E]}) \quad (23)$$

za viskoznost veći od 7 °E približno vrijede i ovi pojednostavljeni odnosi:

$$7,6 (^{\circ}E) = (\text{m}^2/\text{s}) 10^6 \quad (24)$$

$$^{\circ}\text{RS} = 29,2 (^{\circ}E) \quad (25)$$

$$^{\circ}\text{SU} = 34,5 (^{\circ}E) \quad (26)$$

koji ipak ne daju potpuno točne vrijednosti, ali mogu vrlo dobro poslužiti za brzu orijentaciju. Za točnije preračunavanje vrijednosti viskoznosti potrebno je svakako poslužiti se usporednim tablicama ili dijagramima.

8.1.2 Laminarno strujanje

Nadalje je potrebno podsjetiti se na ranije stečeno poznavanje osnova iz zakona strujanja tekućina kroz cijevi, što je predmet razmatranja hidrodinamike.

Istraživanje gibanja tekućine kroz cijevi pokazuju, da jedna te ista tekućina, koja prolazi kroz jednu te istu cijev, ovisno o brzini strujanja može imati dva potpuno različita režima gibanja – laminarno i turbulentno.

Laminarni režim strujanja tekućine naziva se takvo gibanje, kod kojega se čestice tekućine gibaju bez vrtloženja po međusobno i sa osi cijevi paralelnim trajektorijama. Kod turbulentnog režima strujanja ova pravilnost trajektorija gibanja čestica tekućine mijenja se po skoro čitavom poprečnom presjeku cijevi u nesređeno vrtložno gibanje.

Ovu zakonitost je prvi uz pomoć pokusa ustvrdio engleski učenjak Osborne Reynolds (1883. god.). Reynolds je dokazao, da se kod srednje brzine strujanja v_0 , m/s, režim gibanja tekućine kroz glatke cijevi promjera d , m, određuje pomoću veličina:

$$Re = \frac{v_0 \cdot d}{\nu} = \frac{v_0 \cdot d \cdot \rho}{\eta} \quad (27)$$

Ova veličina je uvijek bezdimenzijska i u čast Reynoldsa prozvana je Reynoldsovim brojem.

U mnogobrojnim pokusima je potvrđeno da se prijelaz od laminarnog režima u turbulentni za jednu te istu cijev i jednu te istu tekućinu, događa kod neke potpuno određene vrijednosti Reynoldsovog broja. Vrijednost Reynoldsovog broja, kod koje laminarni režim prelazi u turbulentni, naziva se kritičnom, a odgovarajuća brzina tom Re , kritična brzina:

$$v_{okr} = Re_{kr} \cdot \frac{\nu}{d} \quad (28)$$

Prema tome, laminarno strujanje u cijevi bit će kod $Re < Re_{kr}$, a turbulentno kod $Re > Re_{kr}$.

Pokusi prof. Schillera u Göttingenskom laboratoriju pokazali su, da je kod glatkih cijevi za vodu kritična vrijednost Re broja: $Re_{kr} = 2300$.

Pokusi provedeni u laboratoriju Naučno-istraživačkog instituta industrije nafte pokazali su da kod raznih cjevovoda nafte i cijevi iz običnog trgovačkog kvaliteta uvijek postoji laminarni režim, ako je $Re < 2300$, a turbulentni režim, ako je $Re > 2600$.

Za slučaj strujanja vode srednjom brzinom od 2 m/s laminarno strujanje bi nastupilo kod temperature +20 °C u svim cijevima, koje imaju promjer manji od d , izračunatog iz izraza (23) za Re broj:

$$d = \frac{\nu \cdot Re_{kr}}{v_0} = \frac{1 \cdot 10^{-6} \cdot 2300}{2} = 0,00115 \text{ m} = 1,15 \text{ mm} \quad (29)$$

Na brodovima ne dolaze u obzir ovako male cijevi za transport tekućina. Najmanje promjere cijevi susrećemo kod cjevovoda za dovod goriva od pumpe goriva do sapnice kod Diesel motora, a promjer tih cijevi obično nije manji od 3 mm. Prema tome, u brodskim cjevovodima uglavnom nastupa turbulentni način strujanja. Laminarni režim strujanja treba očekivati u slučajevima, kada se primjeni vrlo mala brzina v_0 , što opet zahtijeva veće promjere cjevovoda za transportiranje određene količine medija, odnosno kod onih vrsta medija, koji imaju veće vrijednosti kinematičke viskoznosti (npr. razne vrste ulja).

Kod razmatranja laminarnog režima strujanja tekućine u okrugloj cijevi dozvolit ćemo, radi pojednostavljenja izvoda, da je os cijevi horizontalna, a strujanje tekućine u smjeru pozitivne osi apscise. Izdvojimo iz čitave mase tekućine volumen abcd (sl. 7.1-3), koji je bočno ograničen površinom cilindra polumjera a , suosnog sa cijevi, te sa ravnim površinama međusobno udaljenim za l i okomitim na os cijevi. Preostalu masu tekućine može se zanemariti, a njezino djelovanje na izdvojeni volumen abcd zamijeniti sa silama priloženim na površini cilindra. Kod uspostavljenog gibanja (stacionarnog strujanja) tekućine na izdvojeni volumen djeluju sljedeće sile:

1.- okomite sile tlaka na osnovice cilindra, uzrokovane djelovanjem tekućine, koja se nalazi lijevo od presjeka 1-1 i desno od presjeka 2-2, a jednake su:

$$\pi \cdot a^2 \cdot p_1 \quad (30)$$

i

$$\pi \cdot a^2 \cdot p_2 \quad (31)$$

2.- okomite sile tlaka na bočnu površinu cilindra,

3.- tangencijalne sile unutarnjeg trenja τ , jednake $2 \cdot \pi \cdot a \cdot l \cdot \tau$ i usmjerene suprotno od smjera gibanja i

4.- težina promatranog dijela tekućine.

Kod jednolikog (stacionarnog gibanja) tekućine u cijevi, sile koje uzrokuju gibanje moraju biti jednake silama otpora. Projiciranjem svih sila na os cijevi, dobivamo:

$$\pi \cdot a^2 (p_1 - p_2) = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot l \cdot \tau \quad (32)$$

i odavde:

$$\tau = \frac{p_1 - p_2}{l} \cdot \frac{a}{2} \quad (33)$$

Kako je

$$\tau = -\eta \cdot \frac{dv}{da} \quad (34)$$

to je

$$dv = -\frac{p_1 - p_2}{2\eta l} \cdot a \cdot da \quad (35)$$

Integriranjem ove jednadžbe dobivamo:,

$$v = \frac{p_1 - p_2}{4\eta l} (c - a^2) \quad (36)$$

Proizvoljna konstanta c određuje se iz rubnog uvjeta da je brzina čestica tekućine na stijenci jednaka nuli. Ako označimo polumjer cijevi sa r , uvrštavanjem rubnog uvjeta u (36), slijedi:

$$c = r^2, \quad (37)$$

pa izraz (36) dobiva konačni oblik:

$$v = \frac{p_1 - p_2}{4\eta l} (r^2 - a^2) \quad (38)$$

Uvrštavanjem u ovu jednadžbu $a = 0$ slijedi brzina u sredini cijevi ili tako zvana osna brzina:

$$v_{\max} = \frac{p_1 - p_2}{4\eta l} \cdot r^2, \quad (39)$$

pa se nakon toga brzina u bilo kojoj točki poprečnog presjeka cijevi može izraziti pomoću osne brzine:

$$v_i = v_{\max} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \quad (40)$$

Jednadžba (40) označuje parabolički zakon rasporeda brzina u poprečnom presjeku cijevi i nosi naziv parabolički zakon Stokesa.

Ako u svakoj točki poprečnog presjeka cijevi priložimo odgovarajući vektor brzine i zatim sve završetke vektora spojimo sa površinom, za okruglu cijev dobivamo rotacijski paraboloid. Na sl. 7.1-4 prikazan je raspored brzina u okrugloj cijevi kod laminarnog režima strujanja tekućine.

Volumenski protok tekućine $\dot{V}$, količinu tekućine koja protječe u jedinici vremena kroz poprečni presjek cijevi, moguće je odrediti na sljedeći način.

Volumenski protok $d\dot{V}$ koja prolazi kroz elementarni prstenasti presjek sa polumjerom a , i debljinom da u radijalnom smjeru, jednaka je umnošku brzine i površine tog elementarnog prstenastog presjeka:

$$d\dot{V} = v_i \cdot 2\pi a \cdot da \quad (41)$$

a odavde slijedi:

$$\dot{V} = \int_0^r v_i \cdot 2\pi a \cdot da \quad (42)$$

Uvrštavanjem vrijednosti brzine v_i prema izrazu (40), dobivamo:

$$\dot{V} = 2\pi v_{\max} \cdot \int_0^r \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \cdot a \cdot da \quad (43)$$

i odavde konačno:

$$\dot{V} = \pi \cdot r^2 \cdot \frac{v_{\max}}{2} \quad (44)$$

Volumenski protok može se također izračunati i pomoću srednje brzine u cijevi, prema:

$$\dot{V} = \pi \cdot r^2 \cdot v_0 \quad (45)$$

pa izjednačavanjem desnih strana izraza (44) i (45) slijedi zaključak:

$$v_o = \frac{v_{\max}}{2} \quad (46)$$

tj. srednja brzina protjecanja tekućine u okrugloj cijevi jednaka je polovini osne (maksimalne) brzine.

Uvrštavanjem u jednadžbu (46) vrijednosti za $v_{\max}$ prema izrazu (39), dobiva se formula za određivanje srednje brzine:

$$v_o = \frac{1}{8\eta} \cdot \frac{p_1 - p_2}{l} \cdot r^2 \quad (47)$$

odnosno za volumenski protok:

$$\dot{V} = \pi \cdot r^2 \cdot v_o = \frac{\pi \cdot r^4}{8\eta} \cdot \frac{p_1 - p_2}{l} \quad (48)$$

Ova jednadžba pokazuje, da je volumenski protok proporcionalan četvrtoj potenciji polumjera cijevi i linearno proporcionalan padu tlaka na jedinicu duljine cijevi.

Pomoću izraza (47) za određivanje srednje brzine može se odrediti pad tlaka u okrugloj cijevi:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{8\eta l v_o}{r^2} = \frac{32 \cdot \eta \cdot l \cdot v_o}{d^2} \quad (49)$$

tj. pad tlaka je linearno proporcionalan duljini cijevi, koeficijentu dinamičkog (apsolutnog) viskoznosti i srednjoj brzini, a obrnuto proporcionalan kvadratu promjera cijevi.

Ako se u formuli (49) koeficijent dinamičke viskoznosti η izrazi pomoću Re broja iz izraza (27), slijedi:

$$\Delta p = \frac{32 l v_o}{d^2} \cdot \frac{v_o d \rho}{\text{Re}} = \frac{64}{\text{Re}} \cdot \frac{l}{d} \cdot \rho \cdot \frac{v_o^2}{2} \quad (50)$$

i nakon uvrštavanja:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (51)$$

Konačno se dobiva formula za određivanje pada tlaka:

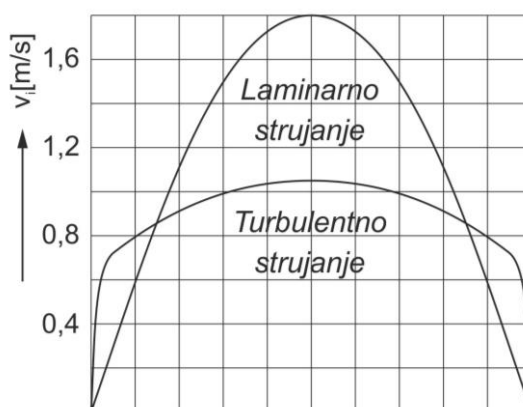
$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \rho \cdot \frac{v_o^2}{2} \quad (\text{Pa}) \quad (52)$$

gdje je: λ -faktor trenja (otpora).

8.1.3 Turbulentno strujanje

Pokusi prof. Prandtla su pokazali, da se kod turbulentnog režima gibanja tekućine, neposredno uz stijenku cijevi formira granični sloj u kojem se tekućina giba po zakonima laminarnog režima, istovremeno sa gibanjem tekućine u ostalom dijelu cijevi po zakonima turbulentnog režima.

Raspored brzina u poprečnom presjeku cijevi kod turbulentnog režima gibanja prikazan je na Slici 8-3. Iz slike je vidljivo, da su brzine gibanja tekućine jednake nuli na samoj površini stijenke cijevi. U neposrednoj blizini stijenke, brzine naglo postižu relativno velike vrijednosti, da bi se taj porast osjetno usporio sa daljnjim približavanjem osi cijevi. Na većem dijelu poprečnog presjeka cijevi brzine se skoro ne mijenjaju. Ovaj dio mase tekućine, koji se giba sa skoro izjednačenim brzinama, naziva se jezgra toka strujanja.



Slika 8-3 Raspored brzina fluida u poprečnom presjeku cijevi u ovisnosti o režimu strujanja

Na Slici 8-3 prikazan je, radi usporedbe, raspored osnih komponenta brzina kod laminarnog i turbulentnog režima uz ispunjenje uvjeta, da u oba slučaja protječe jednaka količina tekućine. Iz slike je vidljivo, da je profil krivulje rasporeda brzina kod turbulentnog režima položeniji od istog profila kod laminarnog režima gibanja. Nadalje kod jednake srednje brzine, manja će biti maksimalna brzina kod turbulentnog nego kod laminarnog režima gibanja. I na kraju, dok se kod laminarnog režima gibanja ukupni otpor uglavnom sastoji od otpora trenja, kod turbulentnog režima ukupni otpor se uglavnom sastoji od otpora vrtloženja.

Prema tome, bitno je različita fizikalna slika pojava kod laminarnog i turbulentnog režima gibanja tekućine kroz cijev. No, bez obzira na tu činjenicu, učenjaci koji su se posvetili istraživanjima gibanja tekućine u cijevi, smatrali su da je za određivanje otpora u cijevima pogodna ista formula za oba režima jednaka izrazu (52). Specifičnosti laminarnog i turbulentnog strujanja u toj formuli su zastupljene u vrijednosti faktora otpora λ .

8.1.4 Određivanje faktora otpora λ

Faktor otpora λ za laminarni odnosno turbulentni režim strujanja tekućina i plinova kroz ravne cijevi predmet je mnogobrojnih teoretsko-eksperimentalnih istraživanja u svijetu. U tim istraživanjima utvrđeno je, da vrijednost faktora otpora λ ne ovisi samo o režimu strujanja tekućine u cijevi, već i o stanju unutarnje površine, tj. o takozvanoj hrapavosti površine cijevi.

Razlikuju se dva oblika hrapavosti cijevi: geometrijska i hidraulička.

Pod geometrijskom hrapavosti podrazumijevaju se neravnine (izbočenja i udubljenja) nastale na unutarnjoj površini cijevi prilikom izrade, a također i za vrijeme eksploatacije uglavnom kao

rezultat korozije i erozije materijala cijevi. Ako se na dijelu duljine cijevi uzme suma visina svih izbočenja i podijeli sa brojem tih izbočenja, dobiva se neko srednje izbočenje e_0 imenovano kao apsolutna geometrijska hrapavost.

U brojnim istraživanjima utvrđeno je da na veličinu otpora strujanja tekućine u hrapavim cijevima odlučujući utjecaj nemaju apsolutne veličine izbočenja i udubljenja, već omjer apsolutne geometrijske hrapavosti e_0 i polumjera cijevi r . Ovaj omjer $\varepsilon = e_0 / r$, nazvan relativna geometrijska hrapavost, u svim se rezultatima istraživanja i upotrebljava kao karakteristična vrijednost za hrapavost stijenke cijevi.

Na osnovi rezultata istraživanja raznih autora, za upotrebu u proračunima preporučuju se sljedeće vrijednosti apsolutne geometrijske hrapavosti cijevi:

- 1.- za čiste bakrene i mjedene vučene cijevi - $e_0 = 0$,
- 2.- za nove čelične vučene, a također i za pocinčane cijevi - $e_0 = 0,1$ mm ,
- 3.- za čelične vučene cijevi nakon nekoliko godina eksploatacije (sa malim talogom i unutarnjom korozijom) - $e_0 = 0,2$ mm ,
- 4.- za nove cijevi od sivog lijeva - $e_0 = 0,3$ mm i
- 5.- za čelične cijevi, jako nagrižene, sa značajnom unutarnjom korozijom - $e_0 = 0,5$ mm .

Za svaku vrstu cijevi nadalje postoji i neka linearna veličina k_0 koja brojčano karakterizira hidrauličku hrapavost. Uvjetovana je s apsolutnom visinom neravnina na unutarnjoj površini cijevi, ali i sa njihovim međusobnim rasporedom.

Analogno kao kod geometrijske hrapavosti, i kod hidrauličke hrapavosti postoji pojam relativne hidrauličke hrapavosti kao omjer apsolutne hidrauličke hrapavosti i polumjera cijevi, tj. $\xi = k_0 / r$. Karakterističan parametar ξ za hidrauličku hrapavost dviju cijevi različitih promjera bit će jednak samo tada, ako će kod bilo kojeg Re broja obje cijevi imati jednake vrijednosti faktora otpora.

Kao hidraulički hrapave praktički treba smatrati sve cijevi koje susrećemo u tehnici. Iz pokusa je poznato, da kod malih Re brojeva hrapavost ne utječe na proces strujanja. Realno, kod malih Re brojeva laminarni granični sloj pokriva sve neravnine koje postoje na unutarnjoj površini pa je cijev stvarno hidraulički glatka. Na osnovi rezultata teoretsko-eksperimentalnih istraživanja smatra se , da su cijevi hidraulički glatke, ako je njihova relativna geometrijska hrapavost

$$\varepsilon = e_0 / r < 35,7 \cdot \text{Re}^{-0,875} \quad (53)$$

Sa povećanjem Re broja smanjuje se debljina graničnog laminarnog sloja, uslijed čega se najprije najviša a zatim i ostala izbočenja pojavljuju izvan graničnog sloja i uzrokuju pojavu virova. I što je veći Re broj, pojavljuje se veći broj izbočenja izvan graničnog sloja. Drugim riječima, hidraulički glatka cijev kod manjih Re brojeva, kod neke određene vrijednosti Re broja postaje hidraulički hrapava. U tehnički glatkim cijevima, na primjer mjedenim vučenim, utjecaj hrapavosti postaje primjetan tek kod vrlo velikih Re brojeva.

Rezultati teoretsko-eksperimentalnih istraživanja Blasiusa i Nikuradze-a pokazuju, da su kod $Re < 10^5$ tehnički glatke cijevi također i hidraulički glatke. Kod $Re \geq 10^5$ tehnički glatke cijevi postaju hidraulički hrapave, jer granični sloj postaje toliko tanak, da izvan njega počinju izvirivati čak i male neravnine na stijenci cijevi i uzrokovati znatno veće otpore strujanju, nego u slučaju idealno glatke cijevi.

Kod turbulentnog režima strujanja tekućine kroz ravnu tehnički glatku cijev, vrijednost faktora otpora se može za proračune odrediti pomoću funkcije $\lambda = f(Re)$ sljedećeg oblika:

$$\lambda = b \cdot Re^c \quad (54)$$

koja daje zadovoljavajuće rezultate za Re brojeve u intervalu $2300 < Re < 10^5$. Obrada rezultata većine ispitivanja provedenih u posljednje vrijeme za režime strujanja sa $Re \geq 10^5$ daje funkciju $\lambda = f(Re)$ nešto složenijeg oblika:

$$\lambda = a + b \cdot Re^c \quad (55)$$

Kao rezultat mnogobrojnih temeljito provedenih pokusa sa različitim vrstama tekućina i plinova razni autori su preporučili niz formula za određivanje veličine faktora otpora λ . Većina tih formula daje vrlo dobre vrijednosti, ali za relativno usko ograničene intervale Re brojeva. U skladu sa analizom svih tih formula, koju je napravio Richter, slijedi zaključak: najbliže vrijednosti stvarnim za faktor otpora λ daje formula preporučena od Blasiusa za interval Re brojeva $2300 < Re < 10^5$, te formula preporučena od Nikuradzea za $Re \geq 10^5$.

Prema tome za ravne tehnički glatke cijevi vrijednosti faktora otpora λ treba određivati uz pomoć sljedećih formula:

1.- za laminarni režim strujanja kod $Re < 2300$ po formuli Stokesa, Hagen i Poiseuillea:

$$\lambda = 64 \cdot Re^{-1} \quad (56)$$

2.- za turbulentni režim strujanja kod $2300 < Re < 10^5$ po formuli Blasiusa:

$$\lambda = 0,3164 \cdot Re^{-0,25} \quad (57)$$

3.- za turbulentni režim strujanja kod $Re \geq 10^5$ po formuli Nikuradzea:

$$\lambda = 0,0032 + 0,221 \cdot Re^{-0,237} \quad (58)$$

U navedenim formulama Re broj se nalazi u nazivniku pa sa njegovim povećanjem postaje manja vrijednost faktora otpora.

Obzirom da je prema (23) veličina Re broja veća kod većih promjera cijevi, slijedi zaključak da će se vrijednosti faktora otpora λ smanjivati s povećanjem promjera cijevi.

Pomoću niza vrlo temeljito provedenih pokusa, Nikuradze je omogućio da se ustvrdi zakonitost turbulentnog strujanja u hrapavim cijevima. Nanoseći pijesak sa izmjerenom veličinom zrnaca na lakom premazanu unutarnju površinu bakrenih cijevi, Nikuradze je ostvario njihovu umjetnu hrapavost. Primjenom cijevi sa tri promjera (25, 50 i 100 mm) mijenjao je relativnu hrapavost ε u širokim granicama. Pokuse za određivanje koeficijenta otpora hrapavih cijevi provodio je za 6

vrijednosti relativne hrapavosti ε (0,0668; 0,0327; 0,0167; 0,008; 0,004 i 0,002) i kod Re brojeva od 600 do 10^6 .

Rezultati ovih pokusa prikazani su na dijagramu na Slici 8-4. Analizom krivulja na dijagramu može se lako zapaziti, da se čitav proces gibanja tekućine dijeli na tri područja sa različitim režimima strujanja, ovisno o veličini Re broja i stanju hrapavosti cijevi.

Oblast 1 je karakterizirano time da se otpor hrapavih cijevi podudara sa otporom glatkih cijevi. Razlog tome je da je debljina graničnog sloja veća od visine izbočenja hrapavosti. Uslijed toga izbočenja ne uzrokuju dodatni pad tlaka u odnosu na glatku cijev.

Ovo područje je ograničeno vrijednošću Re broja:

$$Re = 59,5 \cdot \varepsilon^{-1,143} \quad (59)$$

ili veličinom relativne hrapavosti:

$$\varepsilon = 35,7 \cdot Re^{-0,875} \quad (60)$$

čemu na Slici 8-4 odgovara linija A-A.

Oblast 1 se dijeli na tri područja.

Područje 1 kod $Re < 2300$ ili $\log Re < 3,36$ obuhvaća čitav raspon laminarnog strujanja tekućine. Ovdje se otpor hrapavih cijevi podudara s otporom glatkih cijevi i potpuno pokorava zakonu Hagen-Poiseuillea, a vrijednost faktora otpora iznosi:

$$\lambda = 64 \cdot Re^{-1} \quad (61)$$

Područje 2 je prijelazno od laminarnog na turbulentni režim strujanja tekućine, a nalazi se u granicama $2300 < Re < 3000$, čemu odgovara $3,36 < \log Re < 3,5$ na Slici 8-4. Vrijednost faktora otpora λ brzo raste sa povećanjem Re broja, ali ostaje jednaka za bilo koju veličinu relativne hrapavosti ε , što znači da nije ovisna o hrapavosti cijevi.

Područje 3 se proteže unutar granica $3000 < Re < 59,5 \cdot \varepsilon^{-1,143}$. Ovdje se prvi puta pojavljuje utjecaj hrapavosti cijevi na vrijednost faktora otpora. Ovaj utjecaj se očituje u tome da kod veće relativne hrapavosti ε faktor otpora λ raste sa povećanjem Re broja, dok se kod manje relativne hrapavosti ε smanjuje sa povećanjem Re broja.

Smanjenje faktora otpora λ hrapavih cijevi pokorava se zakonu Blasiusa za glatke cijevi prema (54):

$$\lambda = 0,3164 \cdot Re^{-0,25} \quad (62)$$

kod čega se područje 3 proteže dalje, ako je manja hrapavost cijevi. Na primjer prema slici 8-4, kod $\varepsilon = 0,0668$ područje 3 uopće ne postoji, a kod $\varepsilon = 0,002$ proteže se do vrijednosti $\log Re \approx 4,84$ ili $Re \approx 70.000$.

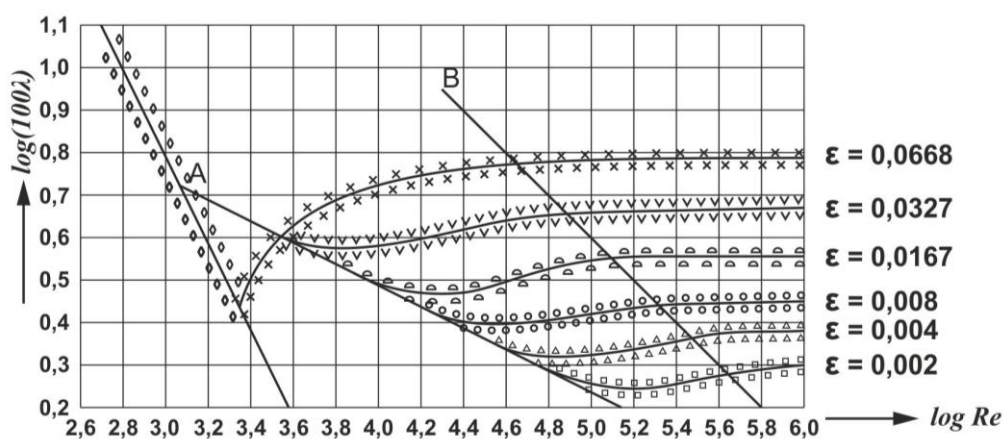
Oblast 2: vrijednosti faktora otpora λ za hrapave cijevi se kod $Re = 59,5 \cdot \varepsilon^{-1,143}$ počinje znatnije razlikovati u odnosu na glatke cijevi. U toj oblasti debljina graničnog sloja jednaka je srednjoj visini izbočenja hrapavosti cijevi, pa izbočenja koja proviruju iznad graničnog sloja uzrokuju dodatni pad tlaka u odnosu na glatku cijev. Radi toga se ova oblast smatra prijelaznom od zakona

gibanja tekućine u glatkim cijevima na kvadratični zakon gibanja. Faktor otpora postaje funkcija Re broja i relativne hrapavosti ε , tj. $\lambda = f(\text{Re}, \varepsilon)$. Granica ove oblasti približno je označena sa linijom B-B na slici 8-4.

Prijelazna oblast se nalazi unutar uskog raspona Re brojeva, pa se radi pojednostavljenja proračuna pord. Davidson preporučio, da se faktor otpora ovdje određuje pomoću funkcije $\lambda = f(\text{Re}, \varepsilon)$. To u ovoj oblasti daje približno 10% veće vrijednosti i proračun postaje sigurniji.

U Oblasti 3 je jako izražena turbulentnost strujanja tekućine, karakterizirana sa tako malom debljinom graničnog sloja, da sva izbočenja hrapavosti proviruju iznad graničnog sloja. Na slici 8-4 nalazi se desno od linije B-B. U toj oblasti krivulje faktora otpora prelaze u pravce paralelne sa osi apscisa. To znači da vrijednost faktora otpora više ne ovisi o Re broju pa prema tome ni o brzini strujanja, niti o viskoznosti tekućine. Faktor otpora je ovdje funkcija samo od relativne hrapavosti $\lambda = f(\varepsilon)$. U ovoj oblasti je otpor trenja gibanja proporcionalan drugoj potenciji brzine (područje kvadratičnog zakona gibanja), a početak joj je kod Re broja:

$$\text{Re} = \frac{665,4 - 764,8 \cdot \log \varepsilon}{\varepsilon} \quad (63)$$



Slika 8-4 Vrijednosti faktora λ u ovisnosti o Reynoldsovom broju

Na osnovi izložene analize pokusa Nikuradzea i teoretskih istraživanja drugih specijalista za hidrauliku, za određivanje vrijednosti faktora hrapavih cijevi može se usvojiti sljedeće:

- a.- za oblast 1, tj. kod $\text{Re} \leq 59,5 \cdot \varepsilon^{-1,143}$, otpor hrapavih cijevi jednak je otporu glatkih cijevi kod istog Re broja i ne ovisi o veličini relativne hrapavosti, i
- b.- za oblast 2 i 3, tj. kod $\text{Re} \gg 59,5 \cdot \varepsilon^{-1,143}$, faktor otpora ne ovisi o Re broju i određuje se po formuli Nikuradzea:

$$\lambda = \left(1,74 + 2 \log \frac{1}{\varepsilon}\right)^{-2} \quad (64)$$

Treba naglasiti, da Nikuradze nije ispitivao realne hrapave cijevi, već laboratorijske uzorke sa umjetno napravljenom hrapavosti. Raspored zrnaca pijeska kod umjetno napravljene hrapavosti treba smatrati ravnomjernim, pa u pokusima Nikuradzea nije razjašnjeno pitanje utjecaja gustoće

rasporeda izbočenja na vrijednost faktora otpora λ . Naime, u realnim cijevima gustoća rasporeda izbočenja na stijenci nije jednolika, pa je zato nazvana neravnomjernom hrapavosti. No, danas već raspoložemo i sa rezultatima ispitivanja otpora u cijevima industrijske proizvodnje sa njihovom stvarnom neravnomjernom hrapavosti. Ovi rezultati mogu poslužiti kao osnova za ocjenu praktične upotrebljivosti rezultata ispitivanja cijevi s umjetnom hrapavosti za određivanje vrijednosti faktora otpora.

Za usporedbe i analize rezultata ispitivanja otpora kod cijevi sa ravnomjernom i neravnomjernom hrapavosti slijedi, da je razlika oblik krivulja otpora u prijelaznoj oblasti dijagrama (Oblast 2) i da se potpuno ne poklapa položaj granične krivulje B-B. Krivulje otpora kod cijevi sa neravnomjernom hrapavosti postepeno prelaze u pravce karakteristične za oblast kvadratičnog zakona gibanja, dok kod cijevi sa ravnomjernom hrapavosti imaju konkavan oblik. Zbog toga je vrijednost faktora otpora izračunata u skladu sa preporukom prof. Davidsona kao $\lambda = f(\varepsilon)$, dakle po istoj formuli kao za oblast kvadratičnog zakona gibanja, kod cijevi sa ravnomjernom hrapavosti veća za cca 10 % od stvarno izmjerene. U ostale dvije oblasti formule preporučene za određivanje faktora otpora na osnovi rezultata ispitivanja na cijevima s ravnomjernom hrapavosti u potpunosti su točne i upotrebljive i za cijevi sa neravnomjernom hrapavosti.

U današnjim izvedbama cjevovoda sve više se koriste cijevi iz vinilplasta, polietilena i drugih plastičnih masa. Interesantno je ustvrditi, da li je moguća primjena raspoloživih formula za određivanje faktora otpora λ za glatke i hrapave plastične cijevi. Veliki broj ispitivanja provedenih sa plastičnim cijevima pokazuje da ove cijevi treba tretirati kao hidraulički glatke uz primjenu formule Blasiusa (57):

$$\lambda = 0,3164 \cdot Re^{-0,25} \quad (65)$$

za turbulentne režime strujanja kod vrijednosti Re broja $Re \geq 2300$. Vrijednosti faktora otpora λ izračunate po navedenoj formuli razlikuju se do 10% u odnosu na stvarno izmjerene.

8.1.5 Ukupni pad tlaka

Određivanjem faktora otpora trenja λ omogućeno se određivanje pada tlaka prilikom protjecanja tekućine kroz ravne cijevi. Kod brodskih cjevovoda to je manji dio ukupnog pada tlaka. Preostali, veći dio, posljedica je strujanja tekućine kroz razna koljena, zakrivljenja, proširenja, suženja, ventile, zasune, pipce i ostalu armaturu ugrađenu u brodski cjevovod, da bi isti mogao normalno zadovoljiti svim zamišljenim funkcijama.

Zajednička značajka za sve nabrojene sastavne dijelove je da prilikom strujanja tekućine kroz njih, gubitak tlaka nije samo posljedica otpora trenja, već i u velikoj mjeri prisutnog otpora vrtloženja, koje nastaje uslijed promjene pravca strujanja, odvajanja struje tekućine od stijenke cijevi, te naglih suženja i proširenja protočnog presjeka. Gubitak tlaka u svakom od nabrojenih sustavnih dijelova naziva se lokalni otpor u cjevovodu. Za proračun ukupnog pada tlaka u raznim lokalnim otporima koriste se faktori lokalnih otpora ζ , koji sadrže ukupni gubitak tlaka na dijelu duljine sastavnog dijela cjevovoda. Određivanje ovih gubitaka teoretskim putem kod sadašnjih dostignuća hidromehanike moguće je samo u rijetkim slučajevima, pa se stoga ta proračun pada tlaka u lokalnim otporima koriste rezultati eksperimenata.

U literaturi posvećenoj problematici strujanja tekućine kroz cjevovode nalazi se niz podataka za faktor lokalnog otpora ζ za različite oblike i izvedbe sastavnih dijelova cjevovoda. Potrebno je naglasiti da vrijednost faktora lokalnog otpora nije jednaka za geometrijski slične izvedbe. To znači, da je na primjer vrijednost faktora lokalnog otpora različita kod raznih nominalnih otvora armature iste vrste. Za razne izvedbe koljena veličina faktora lokalnog otpora dana je kao funkcija Re broja.

U skladu sa teoremom Borda veličina gubitka tlaka u bilo kojem lokalnom otporu određuje se pomoću izraza:

$$\Delta p_l = \zeta \cdot \frac{v_o^2}{2} \cdot \rho \quad (66)$$

Ako je na nekom dijelu duljine cjevovoda raspoređeno više različitih lokalnih otpora, ukupni gubitak u njima je suma pojedinačnih gubitaka, tj.

$$\Sigma \Delta p_l = \Sigma \zeta \cdot \frac{v_o^2}{2} \cdot \rho \quad (67)$$

Više različitih lokalnih otpora može biti ugrađeno u cjevovod na raznim međusobnim udaljenostima. Ovisno o njihovom međusobnom razmaku vrijednost faktora ζ može biti različita za svaki lokalni otpor. Smatra se da se može zanemariti međusobni utjecaj lokalnih otpora ako je njihova udaljenost:

$$x \geq 10 \cdot d \quad (68)$$

i da su tada pojedinačne vrijednosti faktora ζ neovisne. Međutim, kod manjih udaljenosti međusobni utjecaj lokalnih otpora je značajan i neophodno je uzeti ga u obzir. U tom slučaju se uvodi korekcijski faktor φ u aritmetičku sumu pojedinačnih faktora, koji se mogu zbog male međusobne udaljenosti tretirati kao kompleksan lokalni otpor. Faktor kompleksnog lokalnog otpora određuje se pomoću formule:

$$\zeta_k = \varphi \cdot \Sigma \zeta \quad (69)$$

Vrijednosti korekcijskog faktora φ za različite slučajeve sastavljanja pojedinačnih lokalnih otpora, nalaze se unutar granica 0,65 do 1,3.

Ukupni gubitak tlaka u lokalnim otporima sumiran sa gubitkom tlaka u ravnim dijelovima cjevovoda određenim pomoću izraza (52):

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \rho \cdot \frac{v_o^2}{2} \quad (70)$$

daje ukupni gubitak tlaka u proračunskom dijelu broskog cjevovoda.

A kao dodatni parametri utjecaja su kut koljena i omjer polumjera zakrivljenja prema promjeru cijevi.

Postupak određivanja ukupnog gubitka tlaka u cjevovodu može se pojednostaviti uvođenjem pojma ekvivalentne duljine. Naime, uvijek je moguće odabrati takvu duljinu ravne cijevi promjera d , na kojoj će pad tlaka uslijed trenja biti jednak padu tlaka u nekom lokalnom otporu. Izjednačavanjem desnih strana (35) i (43) slijedi:

$$\zeta = \lambda \cdot \frac{l_e}{d} \quad (71)$$

gdje je sa l_e označena duljina ravne cijevi u kojoj je hidraulički otpor strujanju tekućine ekvivalentan određenom lokalnom otporu. Stoga se ta duljina naziva ekvivalentna duljina, a određuje se iz izraza:

$$l_e = \zeta \cdot \frac{d}{\lambda} \quad (72)$$

Na proračunskom djelu cjevovoda bit će ugrađen veći broj raznih lokalnih otpora, od kojih će svakom pripadati odgovarajuća ekvivalentna duljina ravne cijevi. Za taj dio broskog cjevovoda ukupna ekvivalentna duljina ravnih cijevi određuje se pomoću izraza:

$$\Sigma l_e = \frac{d}{\lambda} \cdot \Sigma \zeta \quad (73)$$

kod koje su hidraulički gubici ekvivalentni sumi gubitaka svih lokalnih otpora. Analogno razmatranju o mogućnosti zamjene lokalnih otpora sa odgovarajućom sumom ekvivalentnih duljina ravnih cijevi, moguće je uvesti i pojam ekvivalentnog faktora lokalnog otpora, kao zamjenu za ravne dijelove cjevovoda.

Izložena razmatranje o zamjeni lokalnih otpora sa ravnim dijelovima cjevovoda ekvivalentnim po hidrauličkom otporu rezultat su pokušaja da se za proračun gubitka tlaka odjednom uključi veća duljina cjevovoda. Realno je da će na većoj duljini cjevovoda biti i veće promjene tlaka i temperature transportiranog medija. Zbog toga se, strogo teoretski uzevši, ovaj način proračuna ne bi smio primjenjivati kod plinova i vodene pare, kod kojih se s promjenom temperature i tlaka značajnije mijenja vrijednost gustoće. Međutim, usprkos očigledne nepravilnosti, metoda ekvivalentne duljine se uvelike koristi u praksi proračunavanja parovoda uz primjenu srednjih vrijednosti gustoće za relativno kratke cjevovode.

Gubitak tlaka u nekom cjevovodu određuje se pomoću sljedećih osnovnih metoda proračuna:

1.- metode ekvivalentnih duljina ravnog cjevovoda, pogodne kod onih sustava cjevovoda ili njihovih izdvojenih dijelova, gdje su prevladavajući ravni dijelovi sa relativno malobrojnim ukomponiranim lokalnim otporima. Kod ove metode se lokalni otpori zamjenjuju sa ekvivalentnom duljinom ravne cijevi pomoću izraza (72).

odnosno i nadalje sa tako zvanom izvedenom duljinom cjevovoda, kao sumom ravnog dijela cjevovoda i ekvivalentnih duljina.

2.- metode ekvivalentnih lokalnih otpora, pogodne kod onih sustava cjevovoda ili njihovih izdvojenih dijelova, gdje su prevladavajući razni lokalni otpori sa relativno malom ukupnom duljinom ravnih dijelova cjevovoda. Kod ove metode se otpori u ravnom dijelu cjevovoda zamjenjuju sa ekvivalentnim lokalnim otporima, uz korištenje ekvivalentnog faktora određenog prema izrazu:

$$\zeta = l \cdot \frac{\lambda}{d} \quad (74)$$

odnosno i nadalje sa tako zvanim izvedenim faktorom lokalnih otpora, kao sumom faktora ekvivalentnog i svih stvarno ugrađenih lokalnih otpora.

3.- opće metode, kod koje se odvojeno određuje gubitak tlaka u ravnim dijelovima cjevovoda zatim u lokalnim otporima i na kraju se sumiranjem izračunatih ustvrdi ukupni gubitak tlaka u cjevovodu. Kod ove metode se koriste transformirane formule za određivanje gubitka tlaka u koje je već uključena i jednadžba za transportiranu količinu. Uvođenjem novih izvedenih faktora konačno se dobiva izraz za određivanje ukupnog gubitka tlaka kao funkcije transportirane količine medija.

Svaka od navedenih metoda ima svojih prednosti i nedostataka. Projektant cjevovoda mora donijeti odluku u svakom pojedinom slučaju za primjenu jedne od navedenih metoda. Isto tako, radi unificiranosti korištenja jednom razrađene sheme proračuna, u brodogradilištu se može primjenjivati samo jedna od navedenih metoda.

8.1.5.1 Metode određivanja ukupnog pada tlaka

Za izvođenje hidrauličkog proračuna cjevovoda koriste se dvije polazne jednadžbe: za transportiranu količinu medija i za visinu gubitka tlaka.

Volumenski protok medija koji protječe kroz cjevovod određuje se pomoću izraza (45):

$$\dot{V} = \pi \cdot r^2 \cdot v_0 = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot v_0 \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (75)$$

gdje je : r , d - unutarnji polumjer odnosno promjer cijevi u (m),

v_0 - srednja brzina protjecanja medija (m/s)

Kod poznatog masenog protoka medija m (kg) za potrebe transportiranja kroz cjevovod, veza između mase i volumena uređena je izrazom:

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho \quad (\text{kg}) \quad (76)$$

gdje je: ρ - gustoća medija (kg/m^3).

Gustoća tekućina nije bitno ovisna o temperaturi i tlaku. Za plinove i paru određuje se iz poznate jednadžbe stanja za plinove, pomoću izraza:

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (77)$$

gdje je: p - tlak plina ili pare u proračunskom dijelu cjevovoda (N/m^2),

T - apsolutna temperatura u proračunskom dijelu cjevovoda (K),

R - plinska konstanta (J/kgK).

U koliko su transportirani volumen ili masa medija zadani kao količina na sat, u tom slučaju se u navedenim jednadžbama moraju provesti potrebna preračunavanja.

Gubitak tlaka u ravnoj cijevi određuje se pomoću izraza (52):

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \rho \cdot \frac{v_0^2}{2} \quad (\text{Pa}) \quad (78)$$

gdje je:

- λ - faktor otpora trenja u ravnoj cijevi,
- l - efektivna duljina ravne cijevi (m),
- d - unutarnji promjer ravne cijevi (m),
- v_0 - srednja brzina protjecanja medija (m/s),
- ρ - gustoća medija (kg/m^3).

Bilo koji cjevovod ne sastoji se samo od ravnih cijevi, već mora imati ugrađen manji ili veći broj lokalnih otpora. Kod metode ekvivalentne duljine ravnog cjevovoda za određivanje ukupnog gubitka tlaka u izrazu (78) treba pribrojiti gubitak tlaka u lokalnim otporima određen formulom (71):

$$\Delta p = (l + \Sigma l_e) \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{v_o^2}{2} \cdot \rho = (l + \frac{d}{\lambda} \cdot \Sigma \zeta) \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{v_o^2}{2} \cdot \rho \quad (\text{Pa}) \quad (79)$$

Formula (79) ima oblik binomne jednadžbe i s njom je teže manipulirati kod izvođenja proračuna, nego da ima oblik jednočlanog izraza. To se može postići uvođenjem pojma „izvedena duljina cjevovoda“, čiji je iznos jednak:

$$L = l + \Sigma l_e \quad (80)$$

pa formula (79) sada poprima oblik:

$$\Delta p = L \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{v_o^2}{2} \cdot \rho \quad (81)$$

Radi daljnjeg pojednostavljenja postupka za proračun gubitka tlaka u cjevovodu uveden je nadalje pojam specifičnog hidrauličkog otpora „i“ jednostavnom transformacijom izraza (81). Specifični hidraulički otpor je u stvari gubitak tlaka na jedinicu izvedene duljine proračunskog djela cjevovoda, dakle:

$$i = \frac{\Delta p}{L} = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{v_o^2}{2} \cdot \rho \quad (\text{Pa/m}) \quad (82)$$

pa kod metode ekvivalentne duljine ravnog cjevovoda izraz za određivanje ukupnog gubitka tlaka poprima konačni oblik:

$$\Delta p = i \cdot L \quad (\text{Pa}) \quad (83)$$

Kod metode ekvivalentnih lokalnih otpora za određivanje gubitka tlaka polazi se od izraza (66) za jedan lokalni otpor:

$$\Delta p_e = \zeta \cdot \frac{v_o^2}{2} \cdot \rho \quad (\text{Pa}) \quad (84)$$

te od izraza (67) za više lokalnih otpora.

Sumi gubitaka tlaka u lokalnim otporima potrebno je još pribrojiti i gubitak tlaka u ravnim dijelovima cjevovoda. To se može učiniti tako, da se za ravne dijelove cjevovoda uz pomoć izraza (78) koristi vrijednost ekvivalentnog lokalnog otpora, pa slijedi:

$$\Delta p = (\zeta_e + \Sigma \zeta) \cdot \frac{v_o^2}{2} \cdot \rho = \left(\frac{\lambda}{d} \cdot l + \Sigma \zeta \right) \cdot \frac{v_o^2}{2} \cdot \rho \quad (\text{Pa}) \quad (85)$$

Analogno postupku provedenom u prethodnoj metodi i ovdje se binomni oblik izraza za gubitak tlaka može transformirati u jednočlani uvođenjem pojma izvedenog faktora lokalnih otpora:

$$\zeta_{iz} = \zeta_e + \Sigma \zeta \quad (86)$$

pa će formula za određivanje ukupnog gubitka tlaka kod metode ekvivalentnih lokalnih otpora poprimiti konačni oblik:

$$\Delta p = \zeta_{iz} \cdot \rho \cdot \frac{v_o^2}{2} \quad (\text{Pa}) \quad (87)$$

Za metodu ekvivalentnih lokalnih otpora u literaturi se može naći i naziv metoda dinamičkih tlakova.

Potrebno je naglasiti, da za rješavanje zadataka u obje navedene metode prethodno moraju biti poznati sljedeći parametri za transportirani medij: temperatura, gustoća, koeficijent kinematičke viskoznosti ν , hrapavost cijevi e_0 , duljina ravnih dijelova cijevi l , oblici i broj lokalnih otpora u cjevovodu i smještaj cjevovoda u odnosu na uređaj za transportiranje medija kroz cjevovod.

U velikoj većini slučajeva projektiranje cjevovoda počinje od unaprijed poznatih vrijednosti za:

- a.- volumenski protok V ili maseni protok m
- b.- srednju brzinu strujanja kroz cijev v_0 , odnosno
- c.- unutarnji promjer cijevi d .

Tijek proračuna kod metode ekvivalentne duljine ravnog cjevovoda, uz pretpostavku da se polazi od poznatih vrijednosti V i v_0 , V i d ili v_0 i d , bio bi sljedeći:

1. uz pomoć izraza (75) za volumenski protok i po potrebi (76) određuju se odgovarajuće vrijednosti d , v_0 ili V ,
2. izračunava se bezdimenzijska značajka $Re = \frac{v_o \cdot d}{\nu}$,
3. utvrđuje stanje unutarnje površine cijevi, tj. da li se koriste tehnički glatke ili hrapave cijevi i utvrđuje veličina geometrijske hrapavosti e_0 ,
 - 3.1. kod tehnički glatkih cijevi utvrđuje se ispunjenje jednog od slijedećih uvjeta: $Re \leq 2300$; $Re < 10^5$ ili $Re \geq 10^5$, radi ispravnog izbora formule za izračunavanje faktora otpora trenja λ za ravne dijelove cjevovoda,
4. kod hrapavih cijevi utvrđuje se ispunjenje jednog od slijedećih uvjeta: $Re \leq 59,5 \cdot \varepsilon^{-1,143}$ ili $Re \geq 59,5 \cdot \varepsilon^{-1,143}$ radi ispravnog izbora formule za određivanje faktora otpora trenja λ za ravne dijelove cjevovoda,

5. izračuna se vrijednost specifičnog hidrauličnog otpora „ i “ pomoću formule (82),
6. određuje se suma faktora lokalnih otpora,
7. izračuna vrijednost sume ekvivalentnih duljina cijevi pomoću formule (73),
8. određuje se izvedena duljina cjevovoda $L = l + \Sigma l_e$, i
9. izračunava se ukupan gubitak tlaka u cjevovodu za svladavanje hidrauličkih otpora strujanju medija uz pomoću izraza (83).

Tijek proračuna kod metode ekvivalentnih lokalnih otpora analogan je i vrlo sličan opisanom redoslijedu za metodu ekvivalentne duljine ravnog cjevovoda.

U manjem broju slučajeva može se dogoditi da projektiranje cjevovoda treba započeti kombinacijom poznatih vrijednosti Δp i d , Δp i v_0 , odnosno Δp i V . Dakle sa unaprijed limitiranom visinom gubitka tlaka u cjevovodu. Ovdje se pojavljuje dvostruka međusobna ovisnost ostalih nepoznatih veličina, pa je njihovo određivanje nemoguće uz upotrebu po nekom logičkom redoslijedu samo navedenih formula. Zbog toga se ovdje treba poslužiti metodom postepenih približavanja, polazeći od pretpostavke da će vrijednosti faktora otpora biti $\lambda = 0,2 - 0,3$. Za početak se odabere proizvoljna vrijednost λ_i unutar navedenih granica. Izračunavanjem ostalih nepoznatih veličina omogućeno je određivanje kriterija Re i preko njega vrijednosti λ_{i+1} . Strogo teoretski vrijednost λ_{i+1} morala bi se podudarati sa polaznom veličinom λ_i , ali praktično se dozvoljava da razlika između λ_i i λ_{i+1} ne bude veća od 3-5. Ako taj uvjet nije zadovoljen, postupak se ponavlja ali sada sa polaznom vrijednosti λ_{i+1} . Nakon najviše 2 do 3 približavanja uspije se dobiti dovoljno točne vrijednosti.

U dijelu proračuna prilikom određivanja unutarnjeg promjera cjevovoda, izračunatu vrijednost istog treba odmah usuglasiti sa standardiziranim vrijednostima unutarnjih promjera za proizvodnju cijevi, prije nego što se prelazi na daljnji tijek proračuna. Usuglašavanje se sastoji u izboru najbližeg većeg standardiziranog unutarnjeg promjera cijevi, jer je vrlo mali postotak vjerojatnosti da se proračunom upravo dobije jedna od standardiziranih vrijednosti.

Lako se može ustvrditi da na brodu ne postoji jednostavan cjevovod bez obzira na njegovu namjenu. Svaki cjevovod je više ili manje složen u odnosu na rasprostranjenost i konfiguraciju. Ova tvrdnja se pogotovo odnosi na one brodske cjevovode, kod kojih je neophodno provesti odgovarajući hidraulički proračun. No bez obzira na rasprostranjenost i konfiguraciju mreže pojedinog broskog cjevovoda, uvijek je moguće izdvojiti pojedine dijelove unutar čijih granica su konstantne vrijednosti transportirane količine brzine strujanja medija ili unutarnjeg promjera cjevovoda. Takvi su dijelovi, od kojih se sastoji čitava mreža jednog cjevovoda, nazvani proračunsko područje jednostavnog cjevovoda. Na taj način je moguće hidraulički proračun cjevovodne mreže svesti na niz proračuna uzastopnu ili paralelno raspoređenih jednostavnih cjevovoda, ali se kod toga strogo mora poštivati zakon neprekinutosti i jednakost tlakova u pojedinim spojnim čvorovima.

Prilikom razmatranja klasifikacije cjevovoda rečeno je već da je kod brodskih cjevovoda prisutan vrlo veliki raspon vrijednosti radnih tlakova. Visina radnog tlaka transportiranog medija ima utjecaja na opsežnost izvođenja hidrauličkog proračuna. Primjerice, kod nekog relativno kratkog cjevovoda sa visokim radnim tlakom (napojni cjevovod parnih kotlova, neki glavni

parovodi itd.) udio gubitka tlaka Δp praktično je beznačajan u odnosu na visinu radnog tlaka. U takvim slučajevima potpuno je zadovoljavajuće samo određivanje promjera cjevovoda uz pomoću formule (29). S druge strane pak, kod cjevovoda sa niskim radnim tlakom i velikom rasprostranjenosti unutar broda (npr. kaljužni, balastni, protupožarni cjevovod itd.) gubitak tlaka λ_{i+1} predstavlja glavni dio ukupnog glavnog radnog tlaka. Ukupni radni tlak mora postići pumpa za transportiranje medija, pa je za takav cjevovod kompletan hidraulički proračun od bitnog značaja. I na kraju, usisna visina tlaka ograničena je kod tekućina, da bi cjevovod sa pumpom kao cjelina uopće mogao normalno funkcionirati. Prema tome za usisne cjevovode je određivanje gubitka tlaka λ_{i+1} od presudne važnosti, da ne bi došlo do prekoračenja graničnih vrijednosti.

U brodskim cjevovodima primjenjuju se različite vrijednosti brzina strujanja tekućina, para i plinova. Odabiru se obzirom na utjecaj korozije, erozije, pojave šumova, hidrauličkih udara, te na mogućnosti postizanja tlaka kod pumpi i ventilatora kod nekog određenog kapaciteta.

Za transportiranje kondenzata, slatke i morske vode kroz čelične i bakrene cijevi uobičajene brzine strujanja su 2-3 m/s u tlačnim, a 0,5-1,5 m/s u usisnim cjevovodima. Kod viskoznijih tekućina, kao što su mazut, sirova nafta ili razna ulja, koriste se brzine 2-2.5 m/s u tlačnim, a 0,3-1,2 m/s u usisnim cjevovodima. Za transportiranje smjese vodene pare sa kondenzatom, zasićene i ispušne vodene pare uobičajene brzine strujanja su 20-30 m/s. Kod pregrijane pare, komprimiranog zraka i plinova koriste se brzine strujanja 20-40 m/s. Danas se već kod plinovitih medija primjenjuju brzine strujanja i do 100 m/s. U ventilacijskim sustavima brzina zraka ograničena je na 10-15 m/s u magistralnom cjevovodu a 5-8 m/s u odvojcima, zbog opasnosti od pojave šumova. No, danas već postoje izvedbe ventilacijskih sustava sa brzinama strujanja 30-50 m/s, ali sa ugrađenim specijalnim prigušivačima šumova i uz primjenu visokotlačnih ventilatora.

Ograničenje brzine strujanja vode u tlačnim cjevovodima uvjetovano se nastojanjem za smanjenje razarajućeg djelovanja procesa ubrzane korozije i erozije čeličnih i bakrenih cijevi. Kod raznih plastičnih cijevi u tom slučaju brzina strujanja može biti povećana bez opasnosti od korozivnog i erozijskog razaranja materijala cjevovoda. U usisnim cjevovodima ograničenje brzine strujanja diktirano je također sa pojavom ubrzane korozije i erozije, ali i sa ograničenjem visine usisnog tlaka, tj. sa usisnim mogućnostima pumpi.

U pravilu, unutar navedenih granica brzina strujanja za pojedine vrste medija, veće brzine se primjenjuju kod većih, a manje kod manjih promjera cjevovoda. Znači da kod većih vrijednosti potrebnih transportiranih količina treba koristiti i veće brzine strujanja. Primjerice na veće brzine strujanja u proračunu će kao rezultat dati manje promjere cijevi. Kod manjih promjera cijevi manja je težina cjevovoda, a time je i niža cijena. Manja težina cjevovoda je ujedno povoljnija u ukupnoj težinskoj bilanci gradnje broda. No, istovremeno se zbog veće brzine strujanja medija povećani gubitci tlaka, što zahtjeva potrebu ugradnje pumpi sa većim vrijednostima tlakova kako na usisnoj, tako i na tlačnoj strani. Veći osnovni parametri pumpe povećavaju njezinu cijenu. Zbog opisanih suprotnih efekata kod projektiranja cjevovoda treba uvijek tražiti optimalno rješenje.

8.2 Proračun čvrstoće cijevi

Krajnji rezultati hidrauličkog proračuna cjevovoda zajedno sa radnim uvjetima transportiranog medija je poznavanje unutarnjeg promjera cijevi i radnog tlaka medija. Iz radnih uvjeta transportiranog medija također mora biti poznata i njegova radna temperatura, koja je neophodna za dalji tok proračuna. Dakle nabrojeni parametri: unutarnji promjer cijevi, radni tlak i radna temperatura, kao i vrsta medija, polazna su osnova za određivanje potrebne debljine stijenke cijevi.

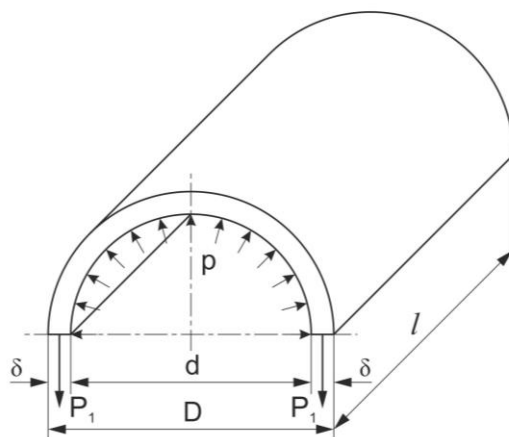
Radna temperatura medija, kao treći od nabrojenih parametara, ima dvostruki utjecaj na konačnu debljinu stijenke. S jedne strane, mehanička svojstva materijala (čvrstoća, granica elastičnosti) se smanjuju sa povećanjem temperature. Smanjenje mehaničkih svojstava različito je za svaku vrstu i kvalitetu materijala, a konkretne vrijednosti redovito daju na raspolaganje proizvođači materijala. Na primjer, smanjenje mehaničkih svojstava je tako veliko, da se bakar i aluminijska bronca koriste samo do cca. 225 °C, legure bakra i nikla do temperature 300 °C, ugljični čelici do cca 480 °C, a čelici nisko legirani sa Cr i Mo do temperature cca 600 °C u radnim uvjetima gdje nisu potrebne posebna razmatranja. Prema tome, radna temperatura je uzrok, da se u izrazu za određivanje debljine stijenke koristi manja vrijednost dozvoljenog naprezanja za odabranu vrstu i kvalitetu materijala. S druge strane, radna temperatura i vrsta medija imaju direktan utjecaj na izbor vrste i kvaliteta materijala cijevi mora se obaviti u početnoj fazi proračuna.

U praksi se susreću i razni cilindri sa različitim debljinama stijenke i sa različitim promjerima opterećeni sa unutarnjim ili vanjskim radnim tlakom. Kod dovoljno malenog omjera debljine stijenke i srednjeg polumjera, naprezanje materijala stijenke u smjeru polumjera (radijalno naprezanje) je zanemarivo maleno. To je slučaj klasičnog primjera dvoosnog naprezanja. Kod debelostijenih cilindara ili cijevi i manjih promjera, omjer debljine stijenke i srednjeg polumjera je osjetno veći. Tada se kod analize naprezanja u stijenci više ne smije zanemariti naprezanje u materijalu stijenke okomito na površinu cilindra ili cijevi (radijalno naprezanje). U tom slučaju se pojavljuje klasičan primjer troosnog naprezanja.

Odmah se može konstatirati, da je kod brodskih cjevovoda vrlo mali broj slučajeva kada se moraju primijeniti postupci određivanja veličina naprezanja za klasičan primjer troosnog naprezanja. U velikoj većini slučajeva upotrebljavaju se formule za određivanje veličine naprezanja kao kod klasičnog primjera dvoosnog naprezanja. Stoga je korisno podsjetiti se na postupak za određivanje veličine naprezanja u stijenci cijevi ili cilindra kod klasičnih primjera dvoosnog naprezanja. U tom slučaju glavna naprezanja su međusobno okomita i to jedno naprezanje je usmjereno u cirkularnom pravcu (smjer tangente), a drugo u pravcu paralelnom sa osi cijevi ili cilindra.

Razmotrimo isječak iz cilindra ili cijevi prikaza na Slici 8-5. Na unutarnju površinu isječka promjera d i duljine l djeluje nadtlak p . Na slici je prikazana samo jedna polovina isječenog prstena duljine „ l “. Druga polovina je zamijenjena sa priloženim silama P_1 . Opterećenje od nadtlaka je potpuno simetrično pa će se horizontalne komponente opterećenja međusobno poništavati. Ukupna vertikalna komponenta iznositi će:

$$P = p \cdot d \cdot l \quad (N) \quad (88)$$



Slika 8-5 Isječak cijevi

Zadovoljenje statičkog uvjeta ravnoteže $\Sigma Y = 0$ zahtijeva da zbroj sila P_1 mora biti jednak vertikalnoj komponenti sile P , tj.

$$P = 2 \cdot P_1 \quad (89)$$

Iz slike se može zaključiti, da je:

$$P_1 = s \cdot l \cdot \sigma_o \quad (90)$$

pa uvrštavanjem vrijednosti za sile P i P_1 u jednadžbu dobivenu iz statičkog uvjeta ravnoteže

$$p \cdot d \cdot l = 2 \cdot s \cdot l \cdot \sigma_o \quad (91)$$

slijedi izraz za veličinu naprezanja u cirkularnom smjeru:

$$\sigma_c = \frac{p \cdot d}{2 \cdot s} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (92)$$

odnosno odavde izraz za određivanje debljine stijenke:

$$s = \frac{p \cdot d}{2 \cdot \sigma_c} \quad (\text{mm}) \quad (93)$$

Izrazi (92) i (93) mogu poslužiti za određivanje naprezanja, odnosno debljine stijenke, ako je poznat unutarnji promjer cilindra ili cijevi. Međutim, kod standardiziranih serija cijevi u važećim standardima postoje podaci o vanjskom promjeru i debljini stijenke cijevi. Stoga je uputno, da se izloženo razmatranje za veličinu naprezanja u cirkularnom smjeru transformira radi izravnog korištenja vanjskog promjera u konačnim izrazima.

Istovremeno se može primijeniti pretpostavka da nadtlak p djeluje na promjeru smještaja sila P_1 , tj. na polovini debljine stijenke. Ova pretpostavka je potpuno dopustiva kod klasičnog primjera dvoosnog naprezanja, obzirom da pomak površine djelovanja unutarnjeg tlaka ima utjecaja samo na promjenu veličine radijalnog naprezanja, koje je zanemarivo maleno. Prema tome, prema Slici 8-5 ukupna vertikalna komponenta opterećenja od unutarnjeg nadtlaka bit će:

$$P = (D - s) \cdot p \cdot l \quad (\text{N}) \quad (94)$$

Vrijednost sile P_1 se nije promijenila pa uvrštavanjem u jednadžbu dobivenu iz statičkog uvjeta ravnoteže:

$$(D-s) \cdot p \cdot l = 2 \cdot s \cdot l \cdot \sigma_o \quad (95)$$

$$2 \cdot s \cdot \sigma_o = D \cdot p - s \cdot p \quad (96)$$

slijedi izraz za veličinu naprezanja u cirkularnom smjeru:

$$\sigma_c = \frac{p}{2s} (D-s) = \frac{D \cdot p}{2s} - \frac{p}{2} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (97)$$

odnosno, malom transformacijom iz (96), odavde izraz za određivanje debljine stijenke:

$$s(2\sigma_c + p) = D \cdot p \quad (98)$$

$$s = \frac{D \cdot p}{2\sigma_c + p} \quad (\text{mm}) \quad (99)$$

Iz nauke o čvrstoći je nadalje poznato, da je naprezanje u smjeru paralelnom sa osi cilindra ili cijevi posljedica djelovanja unutarnjeg tlaka na podnice kod cilindra, odnosno na zatvorene krajeve cijevi. Iznos ovog naprezanja jednak je polovini veličine naprezanja u cirkularnom smjeru. Međutim, za dimenzioniranje debljine stijenke cijevi odlučan je nepovoljniji slučaj, a to je naprezanje u cirkularnom smjeru.

Izrazi (98) i (99) ipak su čisto teoretskog karaktera. Za praktičnu upotrebu moraju pretrpjeti daljnje transformacije, koje uzimaju u obzir dozvoljeno odstupanje debljine stijenke od nazivne, a neizbježno je kod izrade cijevi, zatim eventualna moguća oslabljenja kao posljedice zavarivanja kod šavnih cijevi, smanjenje debljine stijenke kod savijanja cijevi i konačno dodatak za koroziju radi povećanja debljine stijenke čime je određenoj cijevi osiguran razumni vijek trajanja. Nabrojani dodaci sadržani su u formulama propisanim u pravilima svih klasifikacijskih društava za određivanje debljine stijenke cijevi ako je podvrgnuta djelovanju radnog tlaka medija. Zbog navedenih razloga se formule klasifikacijskih društava osjetno razlikuju od izraza (98) i (99).

Potrebno je naglasiti da klasifikacijska društva nisu jedinstvena u zahtjevu na koje se sve cijevi odnosi propisana formula za određivanje debljine stijenke cijevi. Isto tako oblik formule za izračunavanje debljine stijenke cijevi nije istovjetan kod svih klasifikacijskih društava. Zbog toga se u proračun debljine stijenke cijevi moraju zadovoljiti zahtjevi onog klasifikacijskog društva čiju klasu mora imati brod.

Detaljnije razmatranje zahtjeva za određivanje debljine stijenke cijevi pojedinačno kod svakog klasifikacijskog društva nije nužno jer se međusobno mnogo ne razlikuju. Radi toga će se detaljnije razmatrati samo propisani zahtjevi Hrvatskog registra brodova za bolje razumijevanje i lakše korištenje u praksi.

U dijelu VIII za pomorske brodove, odnosno u dijelu VII za brodove unutrašnje plovidbe Hrvatski registar brodova u svojim pravilima o gradnji propisuje, da debljina stijenke cijevi podvrgnutih tlaku ne smije biti manja od izračunate po formuli:

$$s = \frac{s_o}{1 - \frac{a}{100}} \quad (\text{mm}) \quad (100)$$

gdje je : a - dozvoljeno negativno odstupanje debljine stijenke cijevi kod proizvodnje u %, koje može biti najviše- 15% mjestimično po DIN standardima.

Preliminarna debljina stijenke s_o treba izračunati pomoću formule:

$$s_o = \frac{D \cdot p}{200 \cdot \sigma_d \cdot \varphi + p} + b + c \quad (\text{mm}) \quad (101)$$

gdje je: D - vanjski promjer cijevi u (mm),

p - proračunski tlak, koji mora biti jednak najvećem radnom tlaku u (N/mm^2),

σ_d - dozvoljeno naprezanje u (N/mm^2),

φ - koeficijent oslabljenja kod zavarenih cijevi,

b - dodatak koji uzima u obzir smanjenje debljine stijenke uslijed savijanja u (mm),

c - dodatak za koroziju.

Ovakvo suhoparno tumačenje pojedinih parametara u formuli (101) nije dovoljno da bi se bez poteškoća i jednoznačno moglo odabrati njihovu ispravnu vrijednost za proračun. Radi toga neophodno je šire tumačenje nabrojenih parametara, koje i nalazimo u spomenutim pravilima Hrvatskog registra brodova, odnosno u pravilima drugih klasifikacijskih društava.

Proračunski tlak „ p “ u pravilu mora biti jednak tlaku otvaranja sigurnosnog ventila ugrađenog na predmetni cjevovod. Iznimno kod cjevovoda za gašenje požara sa CO_2 za cijevi od boca do ispusnih ventila proračunski tlak mora biti jednak proračunskom tlaku boca CO_2 .

Klasifikacijsko društvo Det Norske Veritas detaljnije i jednoznačno daje tumačenje pojma „proračunski tlak“ za pojedine vrste cjevovoda, i to:

- a.- za parovode spojene na kotao ili pregrijač pare – p mora biti jednak proračunskom tlaku kotla,
- b.- za cjevovode sa ugrađenim sigurnosnim ventilom – p mora biti jednak tlaku otvaranja sigurnosnog ventila,
- c.- za cjevovode na niskotlačnoj strani redukcijskih ventila na kojima nije ugrađen sigurnosni ventil – p mora biti jednak radnom tlaku medija ispred redukcijskog ventila,
- d.- za cjevovode tereta ukapljenih plinova – p mora biti jednak najvećoj mogućoj vrijednosti tlaka otvaranja prekotlačnih ventila na tankovima,
- e.- za cjevovode spojene na pumpe – p mora biti jednak najvećem radnom tlaku pumpe, tj. tlaku otvaranja sigurnosnog ventila pumpe ili kod centrifugalnih pumpi najvećem mogućem tlaku pumpe prema njezinoj karakteristici,
- f.- za napojne cjevovode – p mora biti jednak ili veći od $1,25 \times$ radni tlak kotla ili radni tlak kotla $+7 \text{ N/mm}^2$ (0,687 MPa),

pa nakon ovog tumačenja nije potreban daljnji komentar.

Dozvoljeno naprezanje σ_d za čelične cijevi uzima se jednako najmanjoj vrijednosti od sljedećih veličina:

$$\frac{\sigma_B^{20}}{2,6}; \frac{\sigma_s^t}{1,8}; \frac{\sigma_d^t}{1,8}; \frac{\sigma_n^t}{1,0} \quad (102)$$

gdje je: $\sigma_B / 2,6$ - minimalna rastezna (vlačna) čvrstoća propisana pravilima za materijal cijevi, koja se ispituje kod temperature okoline -20°C (293 K),

$\sigma_s^t / 1,8$ - minimalna granica elastičnosti propisana u pravilima za materijal cijevi, koja se ispituje kod radne temperature materijala,

$\sigma_d^t / 1,8$ - srednja vrijednost rastezne čvrstoće za 100,000 sati rada kod radne temperature materijala,

$\sigma_n^t / 1,0$ - srednja vrijednost granice puzanja s ostatnom deformacijom 1% za 100,000 sati rada kod radne temperature materijala.

Radi izbora najmanje vrijednosti dozvoljenog naprezanja kod provedbe proračuna cjevovoda obavezno je određivanje prve tri od navedenih vrijednosti. Radna temperatura materijala cijevi uzima se jednakom najvećoj radnoj temperaturi transportiranog medija s time, da se u račun ne uzimaju temperature manje od 100°C .

Za cijevi od bakra i bakrenih legura u pravilima su u formi tablica propisane vrijednosti dozvoljenih naprezanja ovisno o kvaliteti materijala i radnoj temperaturi radi primjene u proračunu.

Koeficijent oslabljenja φ jednak je 1 za bešavne cijevi i za odobrene zavarene cijevi koje se smatraju jednako vrijednima kao bešavne. Za ostale zavarene cijevi jednak je 0,9, ali uz uvjet da se ne dozvoljava upotreba zavarenih cijevi sa koeficijentom oslabljenja manjim od 0,9.

Dodatak za koroziju „c“ određen je u posebnim tablicama prema vrsti materijala cijevi i transportiranog medija. Za čelične cijevi ovaj dodatak iznosi od 0,3 do 3,0 mm, a za bakar i bakrene legure od 0,5 do 1,0 mm. Vrijednosti navedene u tablicama su iskustvenog karaktera, a svrha im je da se osigura zadovoljavajući vijek trajanja cijevi u eksploataciji.

Dodatak za savijanje cijevi „b“ određuje se pomoću formule:

$$b = \frac{1}{2,5} \cdot \frac{D}{R} \cdot \frac{D \cdot p}{200 \cdot \sigma_d \cdot \varphi + p} \quad (\text{mm}) \quad (103)$$

gdje se kao novi parametar pojavljuje srednji polumjer savijanja cijevi R u [mm]. Ukoliko u procesu savijanja cijevi ne dolazi do smanjenja debljine stijenke, ovaj dodatak nije potrebno računati.

Pomoću formula (100), (101) i (103) moguće je izračunati potrebnu debljinu stijenke bilo koje cijevi podvrgnute opterećenju sa radnim tlakom medija. Ovako izračunatu vrijednost debljine stijenke nadalje treba korigirati iz dva razloga:

- 1.- treba odabrati upravo takvu veličinu, koja će se stvarno moći nabaviti kod proizvođača cijevi- dakle, potrebno je uskladiti sa standardiziranom serijom debljina stijenki cijevi propisanom u nacionalnim standardima (HRN, DIN, GOST itd.) odabirući kod toga prvu veću vrijednost od dobivene proračunom,
- 2.- mora se voditi računa o činjenici, da klasifikacijska društva u svojim pravilima ovisno o namjeni, vrsti transportiranog medija, odabranom materijalu za cijev i njihovom promjeru propisuju najmanje dozvoljene debljine stijenki, koje se smiju primijeniti kod pojedinog sustava cjevovoda. Zahtjev klasifikacijskog društva mora biti zadovoljen, pa ako proračun i izbor debljine stijenke iz standarda daje manju debljinu, mjerodavna je propisana minimalna debljina.

Konačno, unutarnji promjer cijevi izračunat u okviru hidrauličkog proračuna, vanjski promjer upotrebljen u formulama (100), (101) i (103) i odabrana debljina stijenke, moraju biti međusobno usklađeni, uzevši kod toga u obzir asortiman standardizirane serije za proizvodnju cijevi iz nacionalnog standarda. Ukoliko se za to usklađivanje mora značajnije odstupiti od vrijednosti dobivenih proračunom, tada je neophodno ponoviti proračunom.

Izloženi postupak za dimenzioniranje debljine stijenke cijevi u potpunosti je upotrebljiv kod cjevovoda opterećenih sa radnim tlakom transportiranog medija, dakle sa unutarnjim tlakom, ako je isti veći od okolnog vanjskog tlaka. Ovaj postupak može se koristiti i za dimenzioniranje debljine stijenke cijevi u slučajevima kada je radni tlak transportiranog medija manji od okolnog vanjskog tlaka, tj. kada je unutar cijevi tlak manji od 1,0 MPa, obzirom da kod brodskih cjevovoda u ovom slučaju ne postoje izrazito nepovoljne izvedbe velikih promjera i velikih duljina cijevi.

Međutim, kod velikih brodova, a posebno kod velikih tankera, kod onih cjevovoda koji se polažu kroz tankove, postoji mogućnost da su cijevi opterećene sa vanjskim tlakom većim od atmosferskog i bitno većim od unutarnjeg tlaka transportiranog medija. Nadalje, kod gradnje takvog broda i provedbe ispitivanja sa probnim tlakom vodom pojedinih tankova ili grupe tankova, vanjsko opterećenje cijevi unutar tankova može čak biti osjetno veće od normalnih uvjeta u eksploataciji, o čemu treba posebno voditi računa. U takvim slučajevima izloženi postupak za dimenzioniranje debljine stijenke cijevi nije dovoljan, jer kod potpuno ispravno dimenzioniranih cijevi sa dovoljno velikim koeficijentima sigurnosti u odnosu na granicu elastičnosti materijala, može doći do plastičnih deformacija, odnosno do loma stijenke cijevi. Plastične deformacije i lom stijenke posljedica su gubitka stabilnosti stijenke cijevi kao cilindrične ljuske. Gubitak stabilnosti može nastupiti i kod osjetno manjeg naprezanja od granice elastičnosti materijala cijevi, ako su ispunjeni odgovarajući uvjeti. Zbog toga je ovdje neophodno izvršiti računsku provjeru stabilnosti cijevi kao cilindrične ljuske i u slučaju potrebe izvršiti ili dodatno povećanje debljine stijenke cijevi ili odgovarajuća ukrućenja pomoću rebara na vanjskom promjeru cijevi.

8.3 Proračun elastičnosti cjevovoda

Prema opterećenju od unutarnjeg ili vanjskog tlaka dimenzioniranje debljine stijenke cijevi riješeno je u okviru ranije izloženog proračuna čvrstoće cijevi. Međutim, na cjevovodima postoji i niz drugih opterećenja, zbog kojih se u pojedinim slučajevima moraju provesti dodatne računske i konstruktivne radnje kod projektiranja cjevovoda. Takva opterećenja su: vlastita težina cijevi, težina transportiranog medija, težina izolacije cijevi, kao posljedica pojave poprečnih vibracija cijevi, dodatna montažna zbog netočnosti izvedbe elemenata cjevovoda, dinamičke sile u koljenima i mjestima skretanja toka transportiranog medija, dodatna produljenja cjevovoda kao posljedica elastičnih deformacija brodskog trupa, kao posljedica produljenja cjevovoda uslijed njegovog zagrijavanja, te dodatna montažna kao rezultat namjernog prednaprezanja elemenata cijevi. Većinu od nabrojenih opterećenja moguće je efikasno prihvatiti bez posebnih opasnosti za sam cjevovod primjenom adekvatnih konstruktivnih zahvata kod projektiranja cjevovoda. Za preostala opterećenja neophodne su dodatne radnje, koje vrlo često mogu biti veoma složene po svom opsegu i karakteru. Navedena problematika se razmatra u okviru proračuna elastičnosti cjevovoda.

Vlastita težina cijevi, transportiranog medija i izolacije, naročito kod horizontalno položenog cjevovoda, uzrokuju dodatna naprezanja u stijenci cijevi od momenata savijanja, a superponiraju se sa naprezanjima od radnog tlaka. Ovdje treba pribrojiti i naprezanja u stijenci cijevi kao posljedica poprečnih vibracija cijevi, jer su istog karaktera kao i naprezanja od opterećenja težinom.

Veličina naprezanja od vlastite težine cijevi ovisi o težini cijevi po jedinici duljine i o momentu otpora poprečnog presjeka cijevi. Dakle kod manjih promjera i većih debljina stijenke cijevi, naprezanja od vlastite težine bit će veća. Težina transportiranog medija postaje značajna kod tekućih i krutih medija u odnosu na povećanje naprezanja u stijenci cijevi. Težina izolacije uzrokovati će povećanje naprezanja naročito kod cjevovoda sa visokim radnim temperaturama transportiranog medija i u slučajevima upotrebe izolacijskih materijala veće specifične težine.

Vibracije brodskog trupa su neizbježne kao posljedica rada brodskih strojeva i uređaja, te utjecaja valova u vožnji broda. One se preko točaka pričvršćenja brodskog cjevovoda na priključke strojeva i uređaja ili izravno na brodski trup prenose i na sam cjevovod, koji u većoj ili manjoj mjeri vibrira u smjeru okomitom na svoju uzdužnu os. Veličina naprezanja u stijenci cijevi kao posljedica poprečnih vibracija ovisi o veličini amplitude. U koliko dođe do pojave rezonance, naprezanja mogu biti vrlo velika, te može doći i do loma pojedinih elemenata cjevovoda.

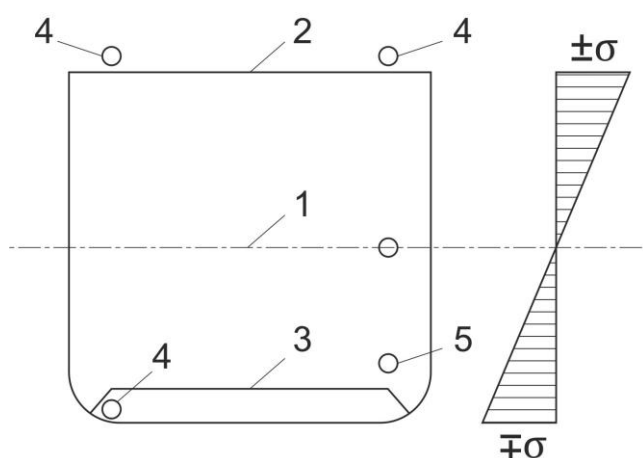
Značajno povećanje naprezanja u stijenci cijevi od navedenih opterećenja moguće je spriječiti primjenom dovoljnog broja i adekvatno raspoređenih oslonaca i ovjesa za pričvršćivanje cjevovoda na konstrukciju trupa broda.

Pod netočnosti izvedbe elemenata cjevovoda treba podrazumijevati nepotpunu paralelnost brtvenih površina na prirubničkim spojevima. Ako brtvene površine prirubnica nisu paralelne, kod montaže je potrebno pojačano pritezanje brtve radi postizanja nepropusnosti. Kao posljedica pojačanog pritezanja pojavljuje se moment savijanja, koji uzrokuje dodatno naprezanje u stijenci

cijevi. Može se ustvrditi da je idealnu paralelnost brtvenih površina praktično vrlo teško postići i da će manje ili više svaki element broskog cjevovoda biti opterećen sa opisanim dodatnim momentom savijanja. U fazi izrade projekta veličina dodatnog momenta savijanja, vrlo teško se može odrediti računskim putem, pa je i veličina dodatnih napreznja od tog momenta uglavnom nepoznata. Jedino što se može poduzeti radi smanjenja ovog napreznja je da se kod izrade elemenata cjevovoda nastoji postići što veća paralelnost brtvenih površina. U posebno važnim slučajevima potrebno je unaprijed propisati najveća dozvoljena odstupanja od paralelnosti, a na osnovi njih se tada mogu i računski odrediti veličine dodatnih napreznja.

U koljenima i na mjestima skretanja toka transportiranog medija pojavljuju se dinamičke inercijske sile. One će biti veće kod većih brzina strujanja, veće mase transportiranog medija i manjih polumjera zakrivljenja koljena. Vrijednost dinamičkih sila može se odrediti računskim putem i treba ih tretirati kao vanjsko opterećenje za element cjevovoda, koje uzrokuje dodatna uzdužna i savojna napreznja u poprečnom presjeku materijala cijevi. Ovo opterećenje za sada ima samo teoretsku važnost, obzirom da ne uzrokuje značajne vrijednosti napreznja, ako se primjenjuju propisane brzine strujanja transportiranog medija navedene u odjeljku 7.1. No bez obzira na to, projektant mora biti upoznat sa činjenicom, da su opisana opterećenja i napreznja prisutna u cjevovodu.

Prilikom vožnje broda po valovitom moru, trup broda je opterećen sa momentima savijanja lociranim u uzdužnoj vertikalnoj ravnini, koji uzrokuju pojavu napreznja prema Slici 8-6.



Slika 8-6 Distribucija napreznja po visini presjeka broskog trupa uslijed savijanja u vertikalnoj ravnini

Posljedica napreznja je pojava deformacija broskog trupa, koje su najveće u najudaljenijim zonama trupa broda kao nosača (paluba (2) i dvodno (3)), a jednako nuli u neutralnoj liniji (1).

Cjevovodi montirani na palubi (4) i u blizini dvodna (5) izloženi su tim deformacijama broskog trupa, koje mogu iznositi i nekoliko desetaka centimetara, što ovisi o gradnji i duljini broda. Cjevovodi preuzimaju deformacije broskog trupa na takozvanim "čvrstim točkama", tj. na mjestima prolaza cjevovoda kroz nepropusne pregrade ili kroz palube, kao i na mjestima

priključenja na ugrađene strojeve i uređaje. Ove deformacije će u stijenci cijevi uzrokovati dodatna naprezanja koja se superponiraju sa naprezanjima od unutarnjeg tlaka i mogu doseći štetne veličine. Ako su poznate vrijednosti deformacije brodskog trupa, moguće je računskim putem odrediti i veličinu naprezanja u stijenci cijevi, uzrokovanog tim deformacijama. U praksi se ne radi proračun naprezanja u brodskom cjevovodu uslijed deformacija brodskog trupa, ali za izbjegavanje neželjenih posljedica poduzimaju se iste mjere kod projektiranja njihove konfiguracije, kao i za slučaj pojave naprezanja uslijed toplinskih dilatacija kod cjevovoda sa zagrijanim transportiranim medijem.

Poznato je, da se povećanjem temperature materijala povećava volumen (kod toga je voda iznimka ali samo u rasponu temperatura od 0 do +4 °C). Ovdje je posebno interesantna činjenica, da se povećanjem volumena povećava duljina neke cijevi (ili štapa) u odnosu na njezinu početnu duljinu. To je tako zvano linearno produljenje cijevi, koje se može nazvati toplinskim produljenjem, a moguće ga je izračunati pomoću izraza:

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta t \quad (\text{mm}) \quad (104)$$

odnosno toplinsko produljenje na jedinicu početne duljine cijevi, koje se može nazvati relativno toplinsko produljenje, a određuje se pomoću izraza:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \alpha \cdot \Delta t \quad (\text{mm}) \quad (105)$$

Ako na krajevima takve cijevi nije omogućeno slobodno povećanje početne duljine za Δl , pojaviti će se naprezanje koje se može odrediti pomoću poznatog izraza iz Nauke o čvrstoći:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (\text{N/mm}^2) \quad (106)$$

Uvrštenjem vrijednosti za ε iz izraza (105), naprezanje u materijalu cijevi sa upetim krajevima uslijed njezinog zagrijavanja bit će:

$$\sigma = \alpha \cdot \Delta t \cdot E \quad (\text{N/mm}^2) \quad (107)$$

Za povećanje temperature izraz (107) za određivanje naprezanja doživljava malu transformaciju, tako da slijedi:

$$\sigma_1 = \alpha \cdot E \quad (\text{N/mm}^2) \quad (108)$$

U formulama (104) i (108) upotrijebljeni simboli imaju sljedeća značenja:

- l - početna duljina cijevi,
- Δt - razlika temperature materijala cijevi uslijed zagrijavanja,
- α - koeficijent linearnog toplinskog produljenja u koji iznosi:
 - za lijevano željezo: $0,9 \cdot 10^{-5}$
 - za ugljični čelik: $1,2 \cdot 10^{-5}$
 - za legirane čelike: $1,6 \cdot 10^{-5}$
 - za bakrene legure: $1,8 \cdot 10^{-5}$

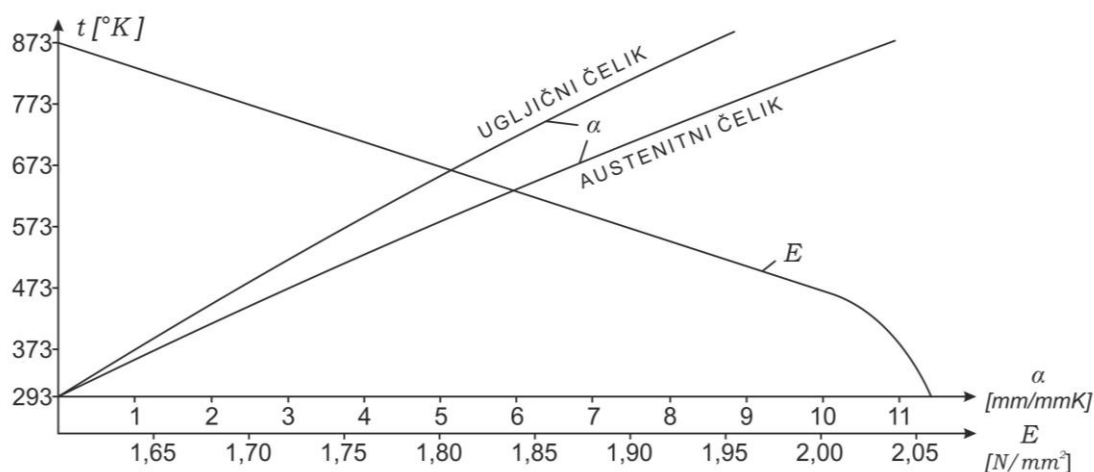
Navedene vrijednosti za koeficijent linearnog toplinskog produljenja α i modul elastičnosti E mogu se smatrati konstantnim samo u rasponu temperatura cca od 0 do 100 °C. Kod viših temperatura njihove vrijednosti se također mijenjaju i to tako, da se povećava vrijednost koeficijenta linearnog toplinskog produljenja α , a smanjuje modula elastičnosti E . Radi ilustracije, na slici 8-7 prikazane su vrijednosti koeficijenta toplinskog produljenja α i modula elastičnosti E različitih čelika za izradu cijevi u rasponu temperatura od +20 do 600 °C.

Na primjer, kod neke ravne cijevi upete na oba kraja izrađene od ugljičnog čelika porast temperature za $\Delta t = 1^\circ\text{C}$ u rasponu temperatura od 0 do 400 °C uzrokovat će naprezanje:

$$\sigma_1 = \alpha \cdot E = 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 2,06 \cdot 10^5 = 1,2 \cdot 2,06 = 2,47 \quad (\text{N/mm}^2) \quad (109)$$

A porast temperature za $\Delta t = 100^\circ\text{C}$ prouzročio bi naprezanje u istoj cijevi:

$$\sigma_{100} = \sigma_1 \cdot 100 = 2,47 \cdot 100 = 247 \quad (\text{N/mm}^2) \quad (110)$$



Slika 8-7 Ovisnost koeficijenta toplinskog istezanja i modula elastičnosti o temperaturi

Što je veće od granice elastičnosti običnog ugljičnog čelika. Iz ovog primjera se vidi da naprezanja u materijalu cijevi samo uslijed zagrijavanja poprimaju vrlo visoke vrijednosti. Stoga je neophodno da se kod takvog cjevovoda poduzmu posebne mjere radi smanjenja tih naprezanja, odnosno opterećenja koja iz njih slijede.

Svaki brodski cjevovod bez obzira na namjenu mora biti priključen sa oba svoja kraja na neki od brodskih uređaja ili strojeva. Izvjestan broj cjevovoda proteže se unutar trupa broda toliko, da mora prolaziti kroz nepropusne pregrade, a jedan dio njih prolazi i kroz palube. Svaki takav priključak na brodski uređaj ili stroj, odnosno svaki prolaz kroz nepropusnu pregradu ili palubu, treba smatrati upetim krajem cjevovoda ili njegovog dijela, obzirom da je krutost uređaja, strojeva, pregrada i paluba osjetno veća od samog cjevovoda. Uobičajeno je, da se takvi priključci i prolazi nazivaju „čvrstim točkama“ broskog cjevovoda. Između ovih čvrstih točaka ugrađen je izvjestan broj ovjesa i oslonaca, no njihova konstruktivna izvedba i razmještaj moraju omogućiti slobodna toplinska produljenja.

Čvrste točke brodskog cjevovoda u svojoj su biti sastavni dio brodskog trupa, pa njihova međusobna udaljenost ovisi o toplinskim ili drugim produljenjima trupa broda izrađenog od ugljičnog čelika. Spajanje brodskog cjevovoda na elemente brodskog trupa vrši se prilikom montaže cjevovoda u brod, dakle kada i cijevi i trup broda imaju temperaturu okoline. To je stvarno početno stanje temperature cjevovoda kod razmatranja njegovog produljenja uslijed zagrijavanja. Treba spomenuti, da su ovom prilikom zanemareni mogući pomaci krajeva elemenata cjevovoda na prirubničkim spojevima, a dozvoljavaju ih ugrađene brtve sa svojom podatljivošću.

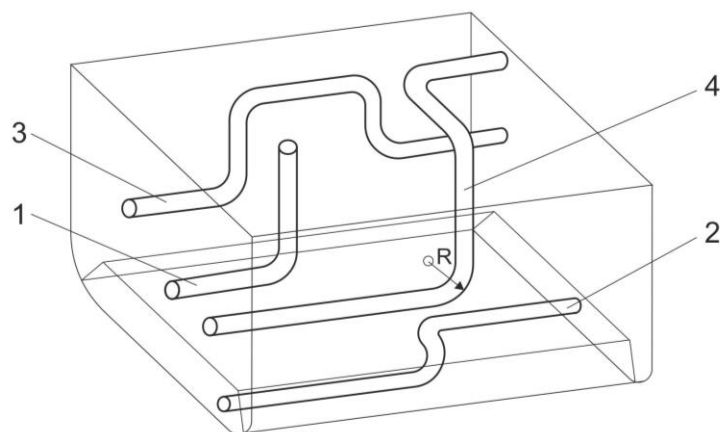
Nakon obavljene montaže elemenata cjevovoda, treba razlikovati dva različita slučaja:

- a- istovremeno zagrijavanje cjevovoda i trupa broda, i
- b- intenzivnije zagrijavanje samo cjevovoda.

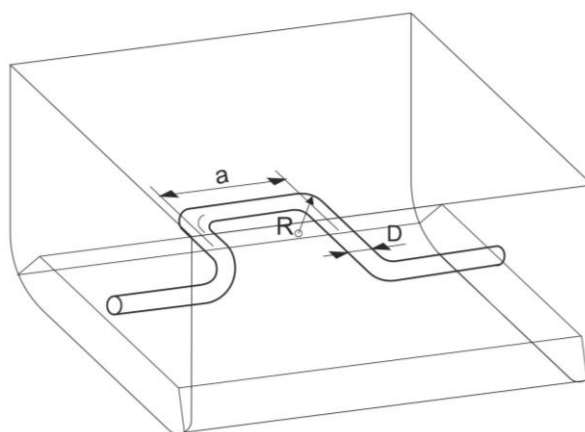
Osjetno istovremeno zagrijavanje cjevovoda i trupa pojavljuje se uslijed insolacije na palubi broda. Kao posljedica toga naprezanje u cjevovodu pojaviti će se samo uslijed razlike u vrijednosti koeficijenta linearnog toplinskog produljenja α , a to znači samo kada je materijal cijevi različit od materijala trupa broda. Ako su cijevi izrađene od ugljičnog čelika, kao i trup broda, toplinsko produljenje elemenata cijevi neće se bitno razlikovati od promjene razmaka između čvrstih točaka, pa nema razloga za pojavu dodatnih naprezanja. Prednje konstatacije vrijede, ako je ostvarena pretpostavka, da su temperature cijevi i trupa broda jednake i nakon zagrijavanja.

Kod intenzivnijeg zagrijavanja samo cjevovoda od transportiranog medija (npr. kod parovoda), cjevovoda će nastojati povećati svoju početnu duljinu, ali ga u tome sprječavaju konstrukcija trupa broda, strojevi i uređaji na čvrstim točkama. Uslijed toga pojavljuje se značajno povećanje naprezanja u materijalu cijevi, što je vidljivo iz obrađenog primjera za ravnu upetu cijev.

Kod izrade i polaganja brodskih cjevovoda praksa je da isti imaju koljena i lukove prema Slici 8-8. Koljena i lukovi preuzimaju na sebe toplinska i druga produljenja, pa se tako sprječava povećanje naprezanja. U tu svrhu mogu se upotrijebiti jedno ili više koljena u jednoj ravnini (na Slici 8-8 cjevovodi br. 1, 2 i 3), odnosno u više ravnina (na Slici 8-8 cjevovod br. 4). Ako su vrijednosti toplinskih produljenja nešto veće, upotrebljavaju se lukovi u obliku U-cijevi, prema Slici 8-9. Lukovi moraju imati polumjer zakrivljenja R jednak najmanje 4 vanjska promjera cijevi D , tj. $R \geq 4D$, a razmak „a“ ne smije biti manji od $2,5 R = 10 D$. Ako su polumjeri R manji, krutost takvih lukova je veća, pa je smanjena njihova sposobnost za preuzimanje toplinskih produljenja.



Slika 8-8 Koljena i lukovi cjevovoda

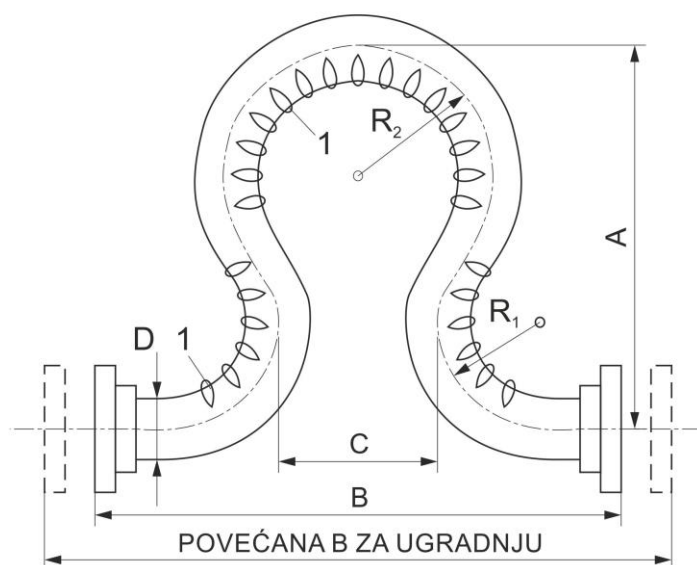


Slika 8-9 Lukovi u obliku U-cijevi

Kod još većih toplinskih produljenja, koja se pojavljuju kod parovoda svježe pare, upotrebljavaju se lukovi u obliku lire, prema Slici 8-10. Prilikom krivljenja cijevi za formiranje oblika lire, normirano je smanjivanje debljine stijenke cijevi na vanjskom dijelu zavoja luka. Da to smanjenje debljine stijenke bude što manje, prakticira se formiranje nabora (1) ugrijavanjem pomoću autogenog plamenika na unutarnjoj strani zavoja luka. Zbog izrade spomenutih nabora, polumjeri zakrivljenja R_1 i R_2 mogu biti i manji od $4D$, tj. $R_1 = R_2 = (1,3 \text{ do } 3)D$. Visina A lire izvodi se $A = (8 \text{ do } 20)D$, duljina lire $B = (1 \text{ do } 2)A$, a razmak $C = (3 \text{ do } 6)D$. Lira izrađena prema Slici 8-10 i sa navedenim osnovnim mjerama može na sebe preuzeti veličinu produljenja: $\Delta l = 5 \sim 10\%$ od B .

S obzirom na veličinu toplinskih produljenja, a to znači s obzirom na visinu radne temperature, lire se upotrebljavaju u najnepovoljnijim slučajevima. No kod brodskih cjevovoda se mogu susresti i tako velika produljenja, koje više niti lira ne može preuzeti, ako su joj osnovne mjere A , B i C skromno dimenzionirane prema mogućnostima ugradnje u skućeni brodski prostor. Tada se kod montaže lira kao elastični element ugrađuje u brodski cjevovod sa početnim prednaponom, tako da joj se duljina D prisilno poveća za duljinu:

$$\beta = (0,5 \sim 0,65) \cdot \Delta l \quad (111)$$



Slika 8-10 Luk u obliku lire

Primjena početnog prednapona kod montaže cjevovoda u brodski trup vrlo je česta. On se ne koristi samo kod lire kao elastičnog elementa cjevovoda, već i kod drugih izvedbi konfiguracije cjevovoda.

Ustvrđeno je već, da se između čvrstih točaka u cjevovodu pojavljuje naprezanje kao posljedica toplinskih produljenja materijala cijevi. Zbog ograničenja slobodne dilatacije cijevi na čvrstim točkama, cjevovod se mora elastično deformirati jednako kao da na njega djeluju tlačne sile. Dakle, naprezanje u cjevovodu uslijed toplinskih produljenja ima karakter tlačnog naprezanja. Ako se taj cjevovod kod montaže namjerno prednapregne sa nekim vlačnim naprezanjem, kod njegovog zagrijavanja vlačno naprezanje će se najprije smanjiti na nulu i tek nakon toga se pojavljuje tlačno naprezanje. Konačna maksimalna vrijednost tlačnog naprezanja biti će tako manja upravo za veličinu vlačnog naprezanja u nezagrijanim uvjetima.

Obzirom na skućene mogućnosti za smještaj cjevovoda u brodskim prostorima, opisan efekt početnog prednapona se vrlo često koristi za upotrebu samo koljena umjesto U-cijevi, odnosno U-cijevi umjesto lire, kod konačnog izbora vrste elastičnih elemenata cjevovoda. Na primjer, konfiguracija cjevovoda sa primjenom samo koljena i početnog prednapona može imati isti efekt kao upotreba U-cijevi bez početnog prednapona. Na taj način projektant cjevovoda ima za konačan izbor veliki broj mogućnosti kod određivanja konfiguracije nekog cjevovoda.

Početni prednapon, koji se može imenovati i kao namjerno montažno naprezanje ili prethodno deformiranje elementa cjevovoda, uzrokuje u stijenci cijevi dodatno naprezanje u hladnom stanju, a superponira se na naprezanje radnog tlaka. Nadalje, prirubnice i vijci za pritezanje prirubnica kod primjene početnog prednapona u hladnom stanju imaju dodatno opterećenje, koje se mora uzeti u obzir kod proračuna prirubničkog spoja. Spomenute posljedice primjene početnog prednapona upozoravaju da je strogo ograničeno njegovo povećavanje sa ciljem smanjenja naprezanja uslijed toplinskog produljenja, jer istovremeno ima negativan efekt u

smislu povećanja naprezanja u stijenci cijevi i povećanja opterećenja prirubničkog spoja u hladnom stanju.

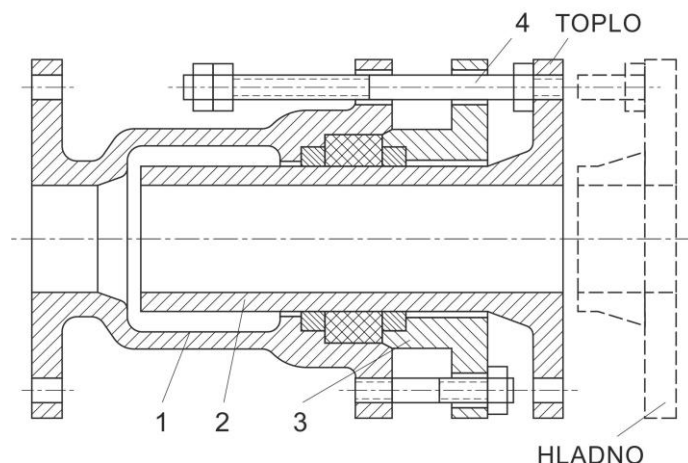
Koljena i lukovi prikazani na slikama 8-8 i 8-9, te lire prema Slici 8-10 imaju zajednički zadatak da preuzmu toplinska i druga produljenja cjevovoda radi smanjenja naprezanja u stijenci cijevi. Zbog toga se mogu imenovati zajedničkim nazivom elastični elementi broskog cjevovoda. Obzirom da se izrađuju od istog sirovinskog materijala kao i sam cjevovod (bešavne ili šavne cijevi), za upotrebu ovih elastičnih elemenata vrijede ista ograničenja kao i za sam cjevovod.

Skučene mogućnosti za smještaj cjevovoda u brodskim prostorima često puta ne dozvoljavaju ugradnju lire ili U-cijevi kao elastičnih elemenata broskog cjevovoda. Tada se moraju upotrebljavati kompenzacije, izvedbe koje su danas mnogobrojne. Zajednička karakteristika kompenzacija je da broskom cjevovodu kod zagrijavanja omogućuju slobodnu dilataciju između dviju čvrstih točaka. Zbog toga, praktično, nema pojave naprezanja u stijenci cijevi kao posljedice toplinskog produljenja, ali zato kod kompenzacije postoje druga ograničenja, o kojima će biti riječi u nastavku. Tipične izvedbe kompenzacija prikazane su na slikama 8-11 i 8-12. Na Slici 8-11 prikazana je kompenzacijska brtvenica. Sastoji se od kućišta (1) i cijevi (2), koja se može pomicati uzduž kućišta (1). Da ne bi transportirani medij prodirao izvan cjevovoda, postavljena je brtvenica (3). Najveći dozvoljeni pomak cijevi unutar kućišta, na slici prikazana crtkano, mora biti veći od predviđenog ukupnog toplinskog produljenja cjevovoda između dvije čvrste točke. Pomicanje cijevi (2) unutar brtvenice (3) smije biti toliko, da kraj cijevi (2) bude još uvijek sa nekom sigurnosnom duljinom unutar materijala brtve u smjeru prema kućištu (1). Ograničenje pomicanja cijevi (2) uzduž kućišta (1) postignuto je pomoću nekoliko vretena (4) omogućena je regulacija veličine maksimalnog pomaka cijevi (2) u kućištu (1), a ujedno je spriječena opasnost da radni tlak transportiranog medija izbacij cijev (2) iz kućišta, ako bi došlo do nekog nepredviđenog udara.

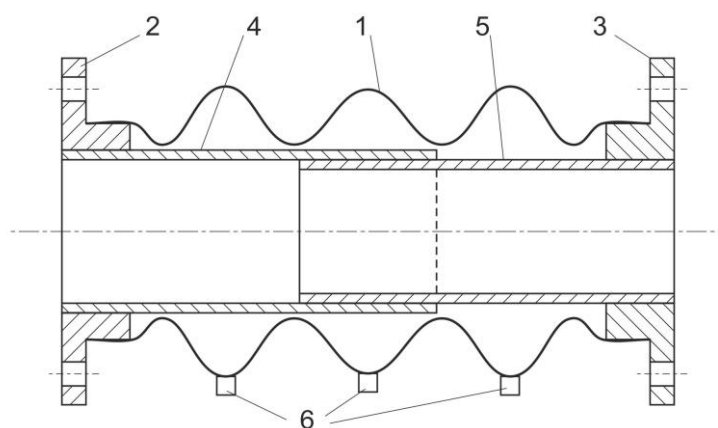
Nesmetano funkcioniranje kompenzacijske brtvenice bit će omogućeno, ako su simetrane kućišta i cijevi na istom pravcu, a kućište i cijev koncentrični. Radi toga je potrebna njezina veoma precizna montaža u brodski cjevovod. Ne smije biti opterećena sa momentima savijanja, što se otklanja postavljanjem ovjesa ili oslonaca na cjevovod u neposrednoj blizini i sa obje strane kompenzacijske brtvenice. Cijev (2) i umetnuti prsteni (5) moraju biti izrađeni od materijala otpornog na koroziju, da ne bi došlo do brzog propadanja dijelova brtvenice. Upotreba kompenzacijske brtvenice donekle je ograničena kod većih promjera cjevovoda, jer tada njezina vlastita težina postaje prevelika. U pravilu, kompenzacijske brtvenice se upotrebljavaju za radne tlake do 1,7 MPa i radne temperature do 300 °C.

Na Slici 8-12 prikazan je elastični kompenzator. Za razliku od kompenzacijske brtvenice, gdje je nepropusnost spoja postignuta primjenom brtve, kod elastičnog kompenzatora je nepropusnost spoja osigurana upotrebom valovite obloge (1) u obliku mijeha. Valovita obloga (1) međusobno spaja prirubnice (2) i (3) pričvršćene na cjevovod, kojem treba omogućiti aksijalnu dilataciju. Valoviti oblik obloge uzrokuje povećani otpor strujanju transportiranog medija. Da bi se ta pojava izbjegla, na prirubnice (2) i (3) se postavljaju cijevi (4) i (5) za vođenje struje transportiranog medija kroz kompenzator. Kod pojave dilatacije ove cijevi međusobno klišu. Njihovo propuštanje zadržava valovita obloga (1), pa se u njezinim naborima zadržavaju transportirani medij. Ako je to vodena para, ona će kondenzirati i u hladnom stanju uzrokovati koroziju, koju je

nemoguće otkloniti u toku eksploatacije. Zbog toga, valovita obloga treba biti iz materijala otporna na koroziju, a na najnižim mjestima potrebno je postaviti priključke za odvodnjavanje. Kod većeg broja nabora otežano je postavljanje priključka na svaki od njih. Zato je povoljnije za ovaj tip kompenzatora, da bude montiran u vertikalnom položaju.



Slika 8-11 Kompenzacijska brtvenica



Slika 8-12 Elastični kompenzator

Postojanje cijevi (4) i (5) zahtijeva da simetrane priрубnice (2) i (3) budu na istom pravcu, a cijevi (4) i (5) međusobno strogo koncentrične. Ovi zahtjevi mogu biti udovoljeni jedino primjenom velike preciznosti kod njegove montaže u cjevovod. Ako se izostavi jedna cijev, na primjer cijev (4), točnost položaja simetrane priрубnice (2) i (3) može biti i manja, a stroga koncentričnost više nije obavezna. U tom slučaju se ovakvi elastični kompenzatori mogu ugraditi i u one cjevovode, gdje su simetrane priрубnice (2) i (3) međusobno nagnute za koji stupanj.

Kod većeg broja nabora postoji mogućnost da uslijed vlastite težine valovita obloga legne na cijev (4) i (5) i uzrokuje poremećaj kod dilatiranja. U tom slučaju se, kod horizontalnog položaja elastičnog kompenzatora, između priрубnice (2) i (3) postave kotve izvan valovite obloge, da bi se obloga mogla na njih osloniti.

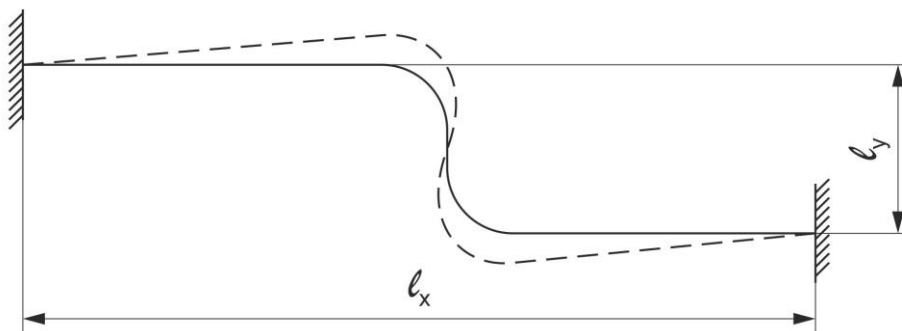
Nadalje, kod većeg broja nabora se krajnji nabori deformiraju više od srednjih, pa stoga kompenzator gubi stabilnost u odnosu na svoju uzdužnu os. Istovremeno ne postoji simetričnost deformacije svakog pojedinog nabora. Kako se na povećanju broja nabora postiže sposobnost preuzimanja veće dilatacije, to su mogućnosti ovog tipa kompenzatora ograničene u odnosu na veličinu toplinskog produljenja.

Nosivost valovite obloge je vrlo mala, pa elastični kompenzator ne može od cjevovoda preuzeti nikakva opterećenja u poprečnom smjeru. Zbog toga se i ovdje moraju koristiti ovjesi ili oslonci u neposrednoj blizini i sa obje strane elastičnog kompenzatora.

Valovita obloga se danas izrađuje u nekoliko konstruktivnih izvedbi. Za sve izvedbe je zajedničko da im je ograničena otpornost u odnosu na radni tlak. Radi toga se elastični kompenzatori starijih izvedbi koriste kod radnih tlakova do 0,7 MPa i radnih temperatura do 180 °C kod bakrene izvedbe, odnosno do 400 °C kod čelične izvedbe. Konstruktivna izvedba nabora valovite obloge ograničava upotrebu ovih elastičnih kompenzatora kod manjih promjera cjevovoda, jer nabori kod malih promjera ne posjeduju potrebnu elastičnost. Međutim, nova tehnologija izrade valovitih obloga od vrlo tankih čeličnih nehrđajućih limova, koju je razvila i koristi firma Teddington, povećala je mogućnost upotrebe kompenzatora. Ovi kompenzatori koriste se za radne tlake do 4,0 MPa i radne temperature do 480 °C, a ograničenje za manje promjere cjevovoda praktično više ne postoji.

Element cjevovoda položen u ravnini prema Slici 8-13 promijeniti će uslijed zagrijavanja svoju duljinu između dvije čvrste točke. Na slici je punom linijom prikazana njegova konfiguracija kod montaže, dakle kod temperature okoline, a crtkano karikirano oblik konfiguracije nakon zagrijavanja. Za određivanje toplinskog produljenja formulu (104) treba primijeniti za oba smjera koordinatnog sustava, pa će ista iznositi: $\Delta l_x = l_x \cdot \alpha \cdot \Delta t$ i $\Delta l_y = l_y \cdot \alpha \cdot \Delta t$

gdje su l_x i l_y udaljenosti između čvrstih točaka elementa cjevovoda u koordinatnom sustavu položenom u ravninu elementa. Kao posljedica ovih produljenja, pojavljuju se reakcijska opterećenja u osloncima i naprezanja u stijenci cijevi. Kod projektiranja, cijevi treba dimenzionirati tako da se, s jedne strane, uslijed prevelikih naprezanja ne dođe do razaranja stijenke cijevi, tj. da bude osigurana njena dugotrajna eksploatacija, a s druge strane da cjevovod bude dovoljno elastičan i podatljiv kako se ne bi pojavila prevelika reakcijska opterećenja na krajevima. Veličina reakcijskih opterećenja ograničena je i konstrukcijom priključaka na strojevima i uređajima, te pregradnih i palubnih prolaza.

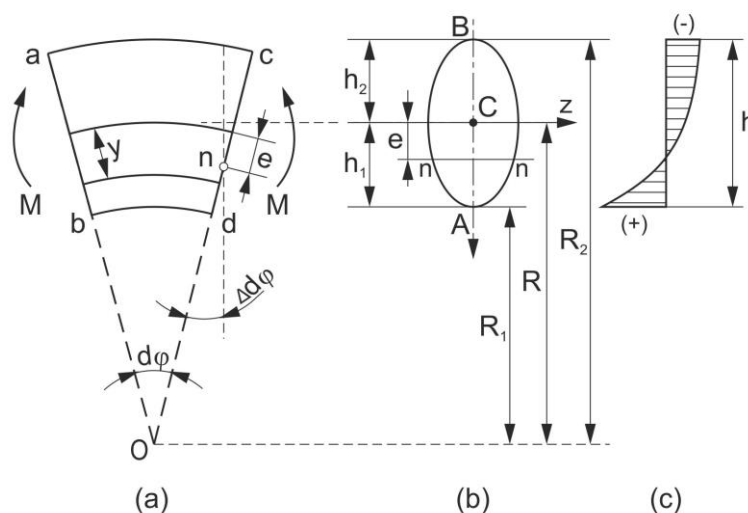


Slika 8-13 Promjena duljine elementa cijevi uslijed promjene temperature

U općem slučaju element cjevovoda može biti opterećen sa uzdužnim i poprečnim koncentriranim silama, uzdužnim i poprečnim kontinuiranim opterećenjem, te sa momentima torzije i savijanja. Za rješavanje rasporeda ovih opterećenja uzduž elementa cjevovoda u potpunosti su primjenjive metode i zakoni razrađeni za štapne sustave. Za slučajeve opterećenja elementa cjevovoda sa uzdužnim opterećenjima i momentima torzije, primjena metoda i zakona za štapne sustave omogućuje također određivanje naprezanja i deformacija. Međutim, kod opterećenja sa poprečnim koncentriranim silama, poprečnim kontinuiranim opterećenjem, odnosno sa momentima savijanja, potrebno je strogo razlikovati ravne od zakrivljenih dijelova cjevovoda, jer su bitno različite teoretske osnove za određivanje naprezanja i deformacije.

Za ravne elemente u potpunosti su primjenjive metode i zakoni za ravne štapove iz Nauke o čvrstoći. Njihova osnova značajka je da je kod savijanja neutralna linija identična sa linijom težišta poprečnih presjeka, naročito kod simetričnih oblika poprečnih presjeka. Iz spomenute osnovne značajke slijedi, da će se naprezanje po visini poprečnog presjeka mijenjati po linearnom zakonu, kako je to prikazano na Slici 8-6. Ako je oblik poprečnog presjeka simetričan u odnosu na horizontalnu simetralu, veličine naprezanja u krajnjem gornjem i donjem sloju bit će međusobno jednake, ali suprotnog predznaka.

Koljena ugrađena u cjevovod su njegovi zakrivljeni dijelovi. Za određivanje naprezanja i deformacija treba ih barem poistovjetiti sa krivim štapovima, a slučaj njihovog čistog savijanja moguće je razmotriti uz pomoć Slike 8-14.



Slika 8-14 Čisto savijanje (bez utjecaja smicanja) zakrivljenih štapova

Za određivanje naprezanja u poprečnom presjeku krivog štapa polazi se od sljedećih pretpostavki:

- spojna linija težišta poprečnih presjeka krivog štapa nalazi se u ravnini,
- poprečni presjeci štapa imaju barem jednu os simetrije,
- momenti savijanja M nalaze se u ravnini zakrivljenosti štapa, i

- poprečni presjeci štapa, koji su u početku bili ravni i okomiti na težišnu liniju, ostaju takvi i nakon savijanja - ista ova pretpostavka je primijenjena i kod proučavanja čistog savijanja ravnog štapa.

Neka su ab i cd dva susjedna presjek krivog štapa, a mali kut između njih prije savijanja $d\varphi$. Uslijed savijanja poprečni presjek cd okreće se u odnosu na ab oko neutralne osi nn za mali kut $\Delta d\varphi$. Ovaj kut i odgovarajući moment M su pozitivni ako se početna zakrivljenost štapa smanjuje za vrijeme savijanja. Uslijed ovog okretanja uzdužna vlakna su na konveksnoj strani štapa stlačena, a na konkavnoj rastegnuta.

S y je označena udaljenost vlakana od težišne osi u ravnini savijanje, s time da je pozitivna u pravcu prema centru zakrivljenosti od težišne linije poprečnog presjeka štapa. S e je označena udaljenost neutralne osi nn od težišta C . Uz pomoć Slike 8-14a slijedi da je izduženje bilo kojeg vlakna za vrijeme savijanja $(y - e) \cdot \Delta d\varphi$. Odgovarajuće relativno izduženje istog vlakna iznosi:

$$\varepsilon = \frac{(y - e) \cdot \Delta d\varphi}{(R - y) \cdot d\varphi} \quad (112)$$

U izrazu (100) R je polumjer zakrivljenosti težišne linije štapa (Slika 8-14b), a nazivnih je početna duljina vlakna između susjednih poprečnih presjeka ab i cd .

Pod pretpostavkom da nema poprečnog tlaka između uzdužnih vlakana, naprezanje uslijed savijanja na udaljenosti y od težišne osi, koje je okomito na poprečni presjek, iznosi:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = \frac{E \cdot (y - e) \cdot \Delta d\varphi}{(R - y) \cdot d\varphi} \quad (113)$$

Iz (113) se može zaključiti da raspodjela naprezanja po visini poprečnog presjeka više nije linearna kao kod ravnih štapova, već da se mijenja po zakonu hiperbole, kako je prikazano na Slici 8-14c. Suma normalnih sila raspodijeljenih po poprečnom presjeku mora biti jednaka nuli kod čistog savijanja. Odavde slijedi, da je neutralna os pomaknuta od težišta poprečnog presjeka prema centru zakrivljenosti O težišne linije štapa.

Jednadžba (113) ima dvije nepoznanice: udaljenost e neutralne osi od težišta C i kut okretanja $\Delta d\varphi$. Za određivanje njihovih vrijednosti mogu se koristiti dvije statičke jednadžbe, koje tvrde da je suma normalnih sila raspoređenih po površini poprečnog presjeka jednaka nuli i da je moment tih sila jednak vanjskom momentu M . Te jednadžbe su:

$$\int_F \sigma \cdot dF = \frac{E \cdot \Delta d\varphi}{d\varphi} \int_F \frac{(y - e) \cdot dF}{R - y} = 0 \quad (114)$$

$$\int_F \sigma \cdot y \cdot dF = \frac{E \cdot \Delta d\varphi}{d\varphi} \int_F \frac{(y - e) \cdot y \cdot dF}{R - y} = M \quad (115)$$

Iz jednadžbe (114) slijedi da je:

$$\int_F \frac{y \cdot dF}{R - y} - e \int_F \frac{dF}{R - y} = 0 \quad (116)$$

Prvi integral na lijevoj strani izraza (116) ima dimenziju površine, pa ga je moguće izraziti u obliku:

$$\int_F \frac{y \cdot dF}{R-y} = m \cdot F \quad (117)$$

gdje je m bezdimenzijski broj kojeg treba odrediti za svaki pojedini oblik poprečnog presjeka kada se obavi naznačena integracija. Veličina $m \cdot F$ imenovana je kao „modificirana površina“ poprečnog presjeka. Drugi integral u izrazu (116) može se transformirati na slijedeći način:

$$\int_F \frac{dF}{R-y} = \int_F \frac{(y+R-y) \cdot dF}{R \cdot (R-y)} = \int_F \frac{y \cdot dF}{R(R-y)} + \int_F \frac{dF}{R} = (m+1) \cdot \frac{F}{R} \quad (118)$$

pa jednačba (116) konačno postaje:

$$m \cdot F - (m+1) \cdot \frac{F \cdot e}{R} = 0 \quad (119)$$

a odavde slijedi:

$$e = R \cdot \frac{m}{m+1} \quad (120)$$

Jednačba (115) se može riješiti ako se prethodno ustvrdi vrijednost integrala:

$$\int_F \frac{(y-e) \cdot y \cdot dF}{R-y} = \int_F \frac{y^2 \cdot dF}{R-y} - e \int_F \frac{y \cdot dF}{R-y} \quad (121)$$

Prvi integral je rješiv uz pomoć transformacije kako slijedi:

$$\begin{aligned} \int_F \frac{y^2 \cdot dF}{R-y} &= \int_F \frac{(y^2 + R_y - R_y) \cdot dF}{R-y} \\ &= - \int_F \frac{y \cdot (R-y) - R_y}{R-y} \cdot dF = - \int_F \left(y - \frac{R \cdot y}{R-y} \right) dF = - \int_F y dF + R \int_F \frac{y dF}{R-y} = m \cdot R \cdot F \end{aligned} \quad (122)$$

Uzevši u obzir izraz (117), što je rješenje drugog integrala u izrazu (121), slijedi:

$$\frac{E \cdot \Delta d\varphi}{d\varphi} \cdot (m \cdot R \cdot F - m \cdot e \cdot F) = M \quad (123)$$

i odavde:

$$\frac{E \cdot \Delta d\varphi}{d\varphi} = \frac{M}{m(R-e) \cdot F} = \frac{M}{F \cdot e} \quad (124)$$

Uvrštenjem (124) u jednačbu (115), dobiva se formula za određivanje normalnih naprezanja:

$$\sigma = \frac{M \cdot (y-e)}{m(R-e)(R-y) \cdot F} = \frac{M \cdot (y-e)}{F \cdot e \cdot (R-y)} \quad (125)$$

Naprezanje u krajnjim vlaknima A i B (Slika 8-14b) moguće je odrediti uvrštenjem vrijednosti $y = h$, i $y = -h_2$, pa slijedi:

$$\sigma_A = \frac{M \cdot (h_1 - e)}{F \cdot e \cdot R_1} \quad (126)$$

$$\sigma_B = -\frac{M \cdot (h_2 + e)}{F \cdot e \cdot R_2} \quad (127)$$

gdje su R_1 i R_2 unutarnji i vanjski polumjer savijenog štapa. Određivanje veličina m i e iz izraza (117) i (120) za zadani oblik poprečnog presjeka, omogućuje izračunavanje vrijednosti normalnih naprezanja uslijed čistog savijanja pomoću jednadžbe (125).

Promjena $\Delta d\varphi$ kuta $d\varphi$ između dva susjedna presjeka slijedi iz izraza (124):

$$\Delta d\varphi = \frac{M \cdot d\varphi}{e \cdot F \cdot E} = \frac{M \cdot ds}{e \cdot R \cdot F \cdot E} \quad (128)$$

a odgovarajuća promjena zakrivljenja težišne linije štapa bit će:

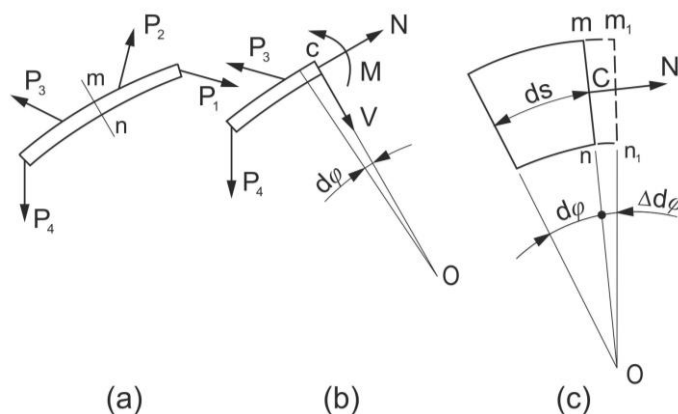
$$\frac{\Delta d\varphi}{ds} = \frac{M}{e \cdot R \cdot F \cdot E} = \frac{M \cdot (m+1)}{m \cdot R^2 \cdot F \cdot E} \quad (129)$$

Ako je radijalna dimenzija h krivog štapa malena prema polumjeru zakrivljenja R težišne linije, može se zanemariti y u odnosu na R u jednadžbama (112) i (113). Odavde slijedi zaključak da se sa povećanjem polumjera zakrivljenosti broj m približava nuli, a istovremeno se veličina $m \cdot R^2 \cdot F$ približava vrijednosti momenta inercije I_z poprečnog presjeka u odnosu na težište. Tada se izraz (113) za određivanje promjene zakrivljenja približava vrijednosti:

$$\frac{\Delta d\varphi}{ds} = \frac{M}{E \cdot I_z} \quad (130)$$

što je identično poznatom izrazu za određivanje zakrivljenja početno ravnih štapova.

Općenitiji slučaj savijanja krivog štapa je njegovo opterećenje sa koncentriranim silama, koje se nalaze u ravnini zakrivljenja težišne linije, prema Slici 8-15. Kod toga treba pretpostaviti da sile $P_1 \dots P_4$ predstavljaju sustav sila u ravnoteži. Očito je da će deformacije i progib štapa također biti u istoj ravnini.



Slika 8-15 Savijanje zakrivljenog štapa koncentriranim silama

Određivanje naprezanja u bilo kojem poprečnom presjeku m - n štapa (Slika 8-15a) omogućeno je pretpostavkom, da je odstranjen dio štapa desno od tog presjeka. Djelovanje odstranjenog dijela na lijevi dio štapa zamijeni se silom, koja djeluje u težištu C poprečnog presjeka i momentom savijanja M . Rastavljanjem sile u dvije komponente, jednu okomito na poprečni presjek, a drugu u radijalnom smjeru zakrivljenja štapa, daje na kraju moment savijanja M , uzdužnu silu N i poprečnu silu V . Pozitivni smjerovi ovih sila prikazani su na Slici 8-15b.

Uzdužna sila N uzrokovati će jednoliko raspoređena naprezanja po poprečnom presjeku, a veličina im je:

$$\sigma_N = \frac{N}{F} \quad (131)$$

Posljedica postojanja naprezanja σ_N su jednoliko raspoređena relativna izduženja svih vlakana. Ukupna izduženja, proporcionalna početnoj duljini vlakana između dva susjedna poprečno presjeka, bit će proporcionalna udaljenosti središta zakrivljenja od težišna linije. Na taj način, uslijed djelovanja uzdužne sile N , početni kut $d\varphi$ povećati će se za iznos:

$$\Delta d\varphi = \frac{N \cdot ds}{F \cdot E \cdot R} \quad (132)$$

a početna duljina ds vlakna težišne linije povećava se za iznos:

$$\Delta ds = \frac{N \cdot ds}{F \cdot E} \quad (133)$$

Poprečna sila V uzrokuje smično naprezanje i izvjesno iskrivljenje poprečnog presjeka. Uz pretpostavku da je ovdje raspodjela smičnog naprezanja po poprečnom presjeku ista kao i kod ravnog štapa, relativno radijalno pomicanje dva susjedna poprečna presjeka bit će isto kao i kod ravnih štapova.

Primjena principa superpozicija za normalna naprezanja i deformacije uzrokovane momentom savijanja M i uzdužnom silom N , daje u ovom slučaju izraz za ukupno normalno naprezanje:,

$$\sigma = \frac{M \cdot (y - e)}{F \cdot e \cdot (R - y)} + \frac{N}{F} \quad (134)$$

te za ukupnu promjenu $\Delta d\varphi$ kuta $d\varphi$ između dva susjedna presjeka:

$$\Delta d\varphi = \frac{M \cdot ds}{e \cdot R \cdot F \cdot E} - \frac{N \cdot ds}{F \cdot E \cdot R} \quad (135)$$

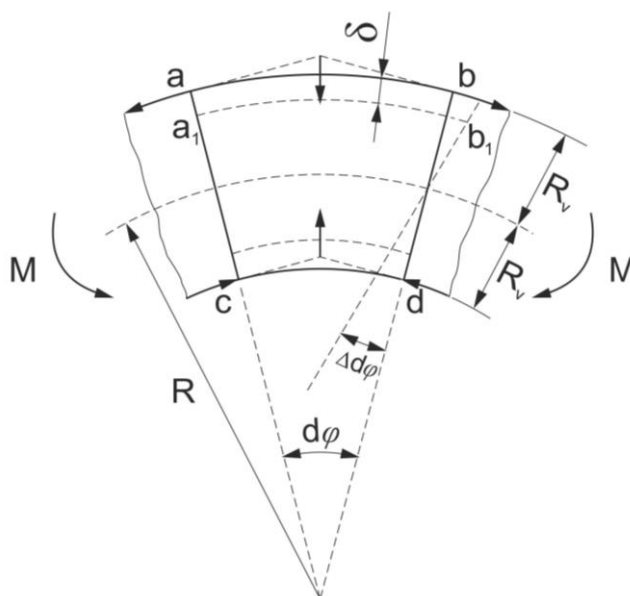
Formule (132) do (135) omogućuju određivanje naprezanja i deformacija za bilo koju vrstu opterećenja smještenu u ravninu zakrivljenja težišne linije krivog štapa.

Za određivanje progiba opterećenog štapa uobičajeno je da se kao najpovoljnija metoda koristi Castiglianov teorem. On omogućuje određivanje pomaka točke djelovanja sile u njezinom pravcu, pomoću parcijalne derivacije jednadžbe za energiju deformacije krivog štapa po sili koja opterećuje taj štap.

Kod izvođenja jednadžbi (113) do (130) za naprezanje i deformacije opterećenih krivih štapova, polazna pretpostavka bila je nema poprečnog tlaka između uzdužnih vlakana štapa. To znači da se oblik poprečnog presjeka ne mijenja. Ova pretpostavka je potpuno opravdana kod punih štapova, obzirom da vrlo mali pomaci u ravnini presjeka uslijed poprečnih skraćivanja i izduženja ne utječu osjetno na raspored naprezanja.

Međutim, kod savijanja tankostijene krive cijevi, uvjeti su bitno različiti. Poznato je da krive cijevi sa relativno tankim stijenkama pokazuju veću gipkost nego što bi trebalo očekivati prema izloženoj teoriji savijanja krivih štapova. Zbog toga ovdje treba uzeti u obzir i deformaciju oblika poprečnog presjeka kod savijanja. Ovaj problem je proučio i teoretski obradio Karman za cijevi okruglog presjeka. Nakon Karmana je veći broj autora, kao što su Bantlin, Wahl, Hovgaard, Vignes, Karl i drugi, sa eksperimentalnim istraživanjima potvrdio točnost njegovih teoretskih postavki, a ujedno su teoretske rezultate Karmana proširili i na nove slučajeve.

Utjecaj deformacije oblika poprečnog presjeka cijevi može se razmotriti na elementu izdvojenom sa dva susjedna presjeka ac i bd iz okrugle cijevi, prema Slici 8-16. Zakrivljena cijev je opterećena momentima savijanja sa smjerom djelovanja prema slici. Vlačne sile na konveksnoj strani i tlačne sile na konkavnoj strani koljena cijevi reduciraju se na rezultante usmjerene prema neutralnoj osi. Zbog toga će se početni kružni presjek spljoštiti i postati eliptičan.



Slika 8-16 Promjena oblika poprečnog presjeka cijevi uslijed savijanja

Spljoštavanje poprečnog presjeka utjecati će na deformacije uzdužnih vlakana stijenke cijevi. Vanjsko vlakno ab zauzeti će nakon savijanja neki položaj a_1b_1 . Pomak vanjskog vlakna može se označiti sa δ . Ukupno izduženje vlakna bit će:

$$\overline{a_1b_1} - \overline{ab} = \overline{a_1b_1} - \overline{a_1e_1} - (\overline{ab} - \overline{a_1e_1}) \quad (136)$$

S $d\phi$ označen je kut između susjednih presjeka ac i bd , s $\Delta d\phi$ njegovo povećanje kod savijanja, s R polumjer težišne osi, a s R_v vanjski polumjer poprečnog presjeka cijevi. U daljnje razmatranje

se polazi od pretpostavke da je omjer R_v/R toliko malen, da se za neutralnu os može smatrati težišna linija poprečnih presjeka. Iz slike slijedi, da je:

$$\overline{a_1 b_1} - \overline{a_1 e_1} = (R_v - \delta) \cdot \Delta d\varphi \approx R_v \cdot \Delta d\varphi \quad (137)$$

jer se pomak δ kao vrlo malen može zanemariti u odnosu na polumjer R_v . Ukupno izduženje vlakna ab prema izrazu (136) bit će:

$$\overline{a_1 b_1} - \overline{ab} = R_v \cdot \Delta d\varphi - \delta \cdot d\varphi \quad (138)$$

a relativno izduženje:

$$\varepsilon = \frac{\overline{a_1 b_1} - \overline{ab}}{\overline{ab}} = \frac{R_v \cdot \Delta d\varphi - \delta \cdot d\varphi}{(R + R_v) \cdot d\varphi} = \frac{R_v}{R + R_v} \cdot \frac{\Delta d\varphi}{d\varphi} - \frac{\delta}{R + R_v} \quad (139)$$

Prvi član na desnoj strani jednadžbe (139) daje izduženje vlakna uslijed zakretanja presjeka bd u odnosu na presjeke ac . Isto to izduženje postoji i kod savijanja punih štapova. Drugi član na desnoj strani jednadžbe (139) daje utjecaj spljoštavanja poprečnog presjeka. Na primjer, ako je $R + R_v = 1500$ mm i $\delta = 0,5$ mm, njihov omjer iznosi $1/3000$ što odgovara naprezanju od $68,7$ N/mm² u stijenci čelične cijevi. Dakle, očigledno je znatan utjecaj drugog člana jer vrlo malo spljoštavanja presjeka cijevi znatno smanjuje naprezanje u krajnjem vlaknu ab . Sličan zaključak vrijedi i za vlakno cd na konkavnoj strani koljena cijeni.

Promjena smjera momenta savijanja mijenja samo predznak normalnog naprezanja. Rezultat toga je da će se umjesto spljoštavanja cijevi u radijalnom pravcu, pojaviti spljoštavanje u pravcu okomitom na ravninu Slike 8-16. Uslijed toga se vlakno ab na konveksnoj strani koljena cijevi udaljuje od centra zakrivljenosti. Istovremeno u tom vlaknu je sada tlačno naprezanje. Prema tome i u ovom slučaju spljoštavanje presjeka smanjuje naprezanje u vlaknima stijenske cijevi.

Odavde slijedi zaključak, da najudaljenija vlakna ne primaju onaj dio naprezanja kojeg treba očekivati na osnovi obične teorije savijanja. Opisani utjecaj na savijanje cijevi može se tretirati jednako kao utjecaj smanjenja momenta inercije poprečnog presjeka. Prema tome, umjesto jednadžbe (135) izvedene za pune krive štapove, za određivanje $\Delta d\varphi$ kuta $d\varphi$ za tankostijene cijevi treba koristiti jednadžbu:

$$\Delta d\varphi = \frac{M \cdot R \cdot d\varphi}{k \cdot E \cdot I_z} \quad (140)$$

u kojoj je k bezdimenzijski faktor, tzv. faktor Karmana, koji karakterizira utjecaj spljoštavanja. Ovaj faktor ovisi samo o dimenzijama cijevnog koljena, a njegova približna vrijednost se određuje pomoću formule:

$$k = \frac{1 + 12 \cdot \kappa^2}{10 + 12 \cdot \kappa^2} \quad (141)$$

gdje je: $\kappa = \frac{s \cdot R}{R_v^2}$ - geometrijski parametar cijevi.

U pogledu utjecaja spljoštavanja na naprezanja u poprečnom presjeku, Karman je pokazao da se umjesto jednostavne jednadžbe za normalno naprezanje:

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I_z} \quad (142)$$

gdje je y udaljenost od neutralne osi, mora koristiti složenija jednadžba:

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{k \cdot I_z} \cdot \left(1 - \beta \cdot \frac{y^2}{R_v^2}\right) \quad (143)$$

gdje je novi bezdimenzijski faktor:

$$\beta = \frac{6}{5 + 6 \cdot \kappa^2} \quad (144)$$

Karman je pošao od jednadžbe $\sigma = \frac{M \cdot y}{I_z}$ na osnovi pretpostavke da se raspodjela naprezanja po visini poprečnog presjeka sa dovoljnom točnosti može smatrati linearnom, ako je R veliko u odnosu na R_v .

Najveća vrijednost naprezanja je u vlaknima na vanjskom promjeru cijevi D na konveksnoj ili konkavnoj strani cijevnog koljena, pa iz jednadžbe (143) proizlazi:

$$\sigma_{\max} = k_1 \cdot \frac{M \cdot D}{2I_z} \quad (145)$$

gdje je novi bezdimenzijski faktor:

$$k_1 = \frac{2}{3 \cdot k \cdot \sqrt{3\beta}} \quad (146)$$

koji opet ovisi samo o dimenzijama cijevnog koljena.

Navedene promjene veličine $\Delta\varphi$ i σ kod krivih cijevi očito će imati utjecaja na vrijednost njihove energije deformacije. Zbog toga, često upotrebljavani teorem Castigliana kod krivih štapova nije više pogodan za primjenu u proračunima deformacija kod krivih cijevi. Zato neki autori, npr. Vološim, ne preporučuju korištenje tog teorema, već sustava jednadžbi u kanonskoj formi za određivanje osnovnih nepoznanica. Ovdje se koristi pojam o radu i sa osnovnim postavkama kinematike, prema već primjenjivanoj praksi u tehničkoj mehanici uopće nema potrebe za korištenjem pojma energije deformacije.

Osim izloženih teoretskih osnova za određivanje naprezanja i elastičnih promjena centralnog kuta zakrivljenosti cijevi, u proračunu elastičnosti brodskog cjevovoda kao elastičnog sustava nužno je korištenje i drugih principa i teorema poznatih iz Nauke o čvrstoći. Osnova za proračun elastičnosti su sljedeći principi i teoremi:

- 1.- Princip pretpostavljenih pomaka. Ako se sustav nalazi u ravnoteži pod djelovanjem njemu priloženih vanjskih sila, suma radova njegovih vanjskih i unutarnjih sila bit će jednaka nuli kod svakog pretpostavljenog beskonačno malog pomaka točaka tog sustava. Pod pretpostavljenim podrazumijeva se bilo koji mogući pomak na vanjskim ili unutarnjim vezama, kod kojeg ostaju nepromijenjeni veličina i intenzitet vanjskih i unutarnjih sila odgovarajućih početnom stanju opterećenja sustava. Rad vanjskih i unutarnjih sila na

pretpostavljenim pomacima poznat je pod nazivom virtualni rad. Obzirom da su sile konstantne, kod virtualnog rada računa se puni iznos produkta svake sile sa odgovarajućim pomakom.

- 2.- Teorem o radu statički priloženih sila. Ukupni rad nekoliko statički priloženih sila na elastični sustav jedan je polovini sume umnožaka konačne vrijednosti svake sile sa konačnom vrijednosti njoj odgovarajućeg pomaka. Ukupan rad je uvijek pozitivan i ne ovisi o redoslijedu prilaganja vanjskih sila. Kod prilaganja vanjskih sila na elastični sustav, osim tih vanjskih sila rad ostvaruju i unutarnje sile, koje se pojavljuju u svim deformiranim elementima. Ako sustav nema početnih naprezanja, rad unutarnjih sila je uvijek negativan.
- 3.- Teorem o uzajamnosti rada. Zadana su dva različita stanja bilo kojeg linearno deformabilnog sustava, koja odgovaraju za dva različita statička opterećenja. Sa brojevima 1 i 2 mogu se označiti opterećenja, unutarnja naprezanja i deformacije, koja odgovaraju za ta dva stanja. Teorem tvrdi, da je u linearno deformabilnom sustavu virtualni rad vanjskih ili unutarnjih sila stanja 1 na pomacima stanja 2 jednak virtualnom radu istih sila stanja 2 na pomacima stanja 1.
- 4.- Teorem o uzajamnosti pomaka. Ovaj teorem je poseban slučaj teorema o uzajamnosti rada, kada je kod prvog i drugog stanja linearno deformabilni sustav opterećen samo sa po jednom silom jednakom jedinici. On kaže, da je pomak δ_{12} točke prilaganja prve sile u njezinom pravcu, uzrokovan djelovanjem druge sile, jednak pomaku δ_{21} točke prilaganja druge sile u njezinom pravcu, uzrokovan djelovanjem prve sile. U upotrijebljenim simbolima za pomak prvi indeks se odnosi na pravac na kojem se pomak dešava, a drugi indeks na uzrok koji je taj pomak izazvao. Navedena jednakost pomaka točna je i za slučaj raznorodnih opterećenja (sila - moment)
- 5.- Teorem o uzajamnosti reakcija. I ovaj teorem je poseban slučaj teorema o uzajamnosti rada, kada su kod prvog i drugog stanja linearnog deformabilnog sustava pomaci oslonaca jednaki jedinici. Teorem tvrdi, da je reakcija u prvom osloncu, kada drugi oslonac dobiva jedinični pomak na svojem pravcu, jednaka reakciji u drugom osloncu, kada prvo oslonac ima jedinični pomak na svojem pravcu. Ovaj teorem je točan i za istorodne (samo reaktivne sile, samo reaktivni momenti) i za raznorodne reakcije (reaktivna sila- reaktivni moment)

Kod izvođenja proračuna elastičnosti polazi se od pretpostavke da su elementi cjevovoda obični elastični sustavi, koji se ponašaju prema poopćenom Hookeovom zakonu:

$$\delta_i = x_1 \cdot \delta_{i1} + x_2 \cdot \delta_{i2} + \dots + x_n \cdot \delta_{in} \quad (147)$$

gdje je: δ_i - linearni ili kutni pomak,

$x_1 \dots x_n$ - aktivne sile,

$\delta_{i1} \dots \delta_{in}$ - pomaci istog tipa i na istom mjestu kao i δ_i , uzrokovani odgovarajućim silama $x_1 \dots x_n$, kada je veličina svake od tih sila jednaka jedinici.

Svaki sustav naziva se linearno deformabilan, ako se pokorava jednadžbi (147). Njegova značajka je da zadovoljava princip superpozicije, prema kojem je učinak zajedničkog djelovanja nekoliko sila jednak sumi učinaka tih sila. U linearno deformabilnom sustavu ne postoje ostatni pomaci i deformacije. Stvarni element cjevovoda nije u potpunosti linearno deformabilan sustav,

ali se radi se pojednostavljenja proračuna polazi od takve pretpostavke. Zbog toga je proračunski element cjevovoda samo dovoljno točan model stvarnog elementa.

Sa stanovišta mehanike gradnje element cjevovoda je jedan ili više puta statički neodređeni štapni sustav na sljedećim karakterističnim svojstvima:

- a.- toplinska produljenja, montažni zazori i pomaci oslonaca uzrokuju reakcije u osloncima različite od nule, i
- b.- veličina ovako uzrokovanih reakcija u osloncima ovisi o veličini poprečnog presjeka cijevi, konfiguraciji elementa cjevovoda i krutosti njegovih dijelova.

Prema metodi rješavanja statičke neodređenosti, elementi cjevovoda se dijele na jednostavne i složene. Jednostavan je element cjevovoda sa dva oslonca. Složeni ili razgranati je element cjevovoda sa pomičnim čvorovima, gdje se sastaju više od dva ogranka cjevovoda. Broj oslonaca u složenom cjevovodu jednak je broju ogranka, ali svakako je veći od 2.

Statička neodređenost jednostavnih elemenata cjevovoda najpodesnije se rješava pomoću metode sila, kod koje se za osnovne nepoznanice uzimaju naprezanja. Naziv osnovne imaju one nepoznanice, koje se određuju kao prve, a na osnovi njih se zatim određuju sve ostale tražene veličine. Statičku neodređenost složenih elemenata pogodno je rješavati pomoću metode pomaka. Osnovne nepoznanice kod te metode su pomaci čvorova. Za rješavanje statičke neodređenosti složenog elementa cjevovoda sa dva ili više čvorova može poslužiti i mješovita metoda, kod koje su u jednom dijelu naprezanja osnovne nepoznanice, kao u metodi sila, a u drugom dijelu pomaci čvorova, kao u metodi pomaka.

Za određivanje naprezanja uslijed savijanja u zakrivljenim dijelovima elemenata cjevovoda, prethodno treba izračunati vrijednost geometrijskog parametra κ . Za sve vrijednosti geometrijskog parametra do $\kappa = 1,44$ mora se uzeti u obzir utjecaj spljoštavanja poprečnog presjeka na veličinu naprezanja putem određivanja Karamanovog faktora. Naprezanje i promjena centralnog kuta u ovom slučaju se određuje pomoću formula (124) do (129). Ako je vrijednost geometrijskog parametra $\kappa > 1,44$, zanemariv je utjecaj spljoštavanja na veličinu naprezanja. U tom slučaju se naprezanje i promjena centralnog kuta računaju pomoću formula (110) do (119) izvedenih za krive štapove.

Poštivajući zaključke ustvrđene u poglavlju 7.2, ovdje će se detaljnije razmotriti samo klasičan primjer troosnog naprezanja, koji važi za tankostijene cijevi. Treba naglasiti, da su ova dva međusobno okomita naprezanja u stijenci cijevi (cirkularno ili tangencijalno i uzdužno) rezultatna naprezanja:

Na primjer, pojava uzdužnog naprezanja bit će posljedica unutarnjeg tlaka u cijevi, momenata savijanja i uzdužnih koncentriranih sila, a cirkularnog ili tangencijalnog od unutarnjeg tlaka i momenata savijanja. Naprezanja od navedenih uzročnika neće imati uvijek iste predznake u određenom području poprečnog presjeka cijevi. Prema tome, rezultatno naprezanje treba odrediti uz uzimanje u obzir i predznaka svake od pojedinih komponenata. Spomenuti su samo neki uzročnici pojave uzdužnog i cirkularnog naprezanja radi ilustracije, i nema potrebe da se ovako uopćeno nastavi sa nabrojanjem ostalih uzročnika pojave naprezanja. U svakom

pojedinom slučaju projektant će morati uzeti u obzir sve moguće uzročnike pojave naprezanja, kao i istovremenost njihovog djelovanja za naročito važne opasne presjeke.

Na kraju, potrebno je naglasiti, da postoji bitna razlika u karakteru između navedena dva naprezanja a od velikog je utjecaja na moguće posljedice za slučaj prekoračenja dozvoljenih vrijednosti jednoga od njih u stijenci cijevi. Maksimalne vrijednosti, koje se proračunom redovito i određuju, kod uzdužnog naprezanja egzistiraju samo u vlaknima poprečnog presjeka u neposrednoj blizini i na samom vanjskom promjeru cijevi. To proizlazi iz dijagrama rasporeda normalnih naprezanja od savijanja. Ukoliko je stvarno maksimalno naprezanje veće od granice plastičnosti materijala, sigurno je da neće doći do puknuća stijenke cijevi, već će stanje naprezanja u materijalu stijenke cijevi prijeći u elasto-plastično područje. To isto se ne može kazati i za cirkularno naprezanje, kod kojega je veličina resultantnog naprezanja jednolika u uzdužnom presjeku stijenke cijevi. Prema tome, ako je stvarno cirkularno naprezanje iznad granice plastičnosti materijala, doći će do razaranja stijenke cijevi, jer stanje naprezanja materijala više nije u elastičnom području.

U općem slučaju jedan element broskog cjevovoda omeđen između dvije čvrste točke, bit će opterećen tlakom transportiranog medija (radnim u radnim uvjetima, a probnim u uvjetima ispitivanja), uzdužnim silama, momentima savijanja i momentima torzije, kao posljedicom toplinskih produljenja u radnim uvjetima odnosno montažnih istezanja u uvjetima montaže, vlastitom težinom, težinom transportiranog medija i izolacije, koje mogu biti uzdužne ili poprečne u odnosu na os cjevovoda itd. U proračunu se sva opterećenja tretiraju kao statička, obzirom da je broj promjena veličine opterećenja praktično znatno ispod 10000. Također u praksi nije primijećeno razaranje cijevi ako naprezanja nisu prešla granicu plastičnosti, izuzev kod slučajeva gubitka stabilnosti.

Naprezanja u poprečnim i uzdužnim presjecima ravnih i zakrivljenih dijelova cjevovoda određuju se prema dimenzijama cijevi određenim pomoću izloženih postupaka u poglavljima 7.1 i 7.2. Kod određivanja resultantnih uzdužnih i cirkularnih naprezanja treba imati na umu, da od jednog te istog momenta savijanja, naprezanja u koljenu mogu imati i veće vrijednosti nego u ravnoj cijevi, iako se poprečni presjek sa najvećim momentom savijanja može nalaziti na ravnoj cijevi. Zbog toga je neophodno, da se resultantna naprezanja odrede odvojeno za najnepovoljniji slučaj kod ravnih dijelova, a odvojeno za najnepovoljniji slučaj kod zakrivljenih dijelova cjevovoda.

Proračunate vrijednosti resultantnih naprezanja ne smiju biti veće od dozvoljenog naprezanja za odabrani materijal cjevovoda. Za usporedbenu ocjenu izračunatih vrijednosti resultantnih naprezanja koristi se jedna od teorija sigurnosti čvrstoće, uzevši u obzir da se ovdje radi u slučaju klasičnog dvoosnog naprezanja u stijenci cijevi. Na primjer, po prvoj glavnoj teoriji sigurnosti čvrstoće najveće naprezanje ne smije biti veće od dozvoljenog. Ova teorija se vrlo često i koristi za dimenzioniranje cijevi, iako po teoriji čvrstoće nije najpogodnija za dvoosne i troosne slučajeve naprezanja.

Dozvoljena naprezanja određuje se u odnosu na granicu plastičnosti odabranog materijala kod radne temperature uz primjenu koeficijenta sigurnosti veličine 1,2-1,5. Manja vrijednost koeficijenta sigurnosti odabire se u slučajevima, kada su sa većim postotkom točnosti određene veličine naprezanja od pojedinih opterećenja, a iz toga i resultantna naprezanja, kao i za

slučajeve gdje će kod povećanja najvećeg resultantnog naprezanja iznad granice plastičnosti, stanje naprezanja materijala stijenke cijevi prijeći u elasto-plastično područje. Veća vrijednost koeficijenta sigurnosti odabire se analogno, kada je resultantno naprezanje određeno sa manjim postotkom točnosti i ako kod prijelaza najvećeg naprezanja izvan granice plastičnosti odmah postoji opasnost pojave razaranja stijenke cijevi.

No, bez obzira što je manja opasnost od pojave razaranja kod stanja opterećenosti materijala u elasto-plastičnom području, dakle iznad granice plastičnosti za neke slojeve materijala stijenke, nije preporučljivo da se takvi slučajevi namjerno toleriraju u brodskom cjevovodu. Razlog tomu je u činjenici da naprezanja u materijalu jednaka ili veća od granice elastičnosti ubrzavaju proces korozijskog razaranja tog materijala. Kako su korozijski procesi neizbježni u brodskim cjevovodima, to će svako povećanje stvarnog naprezanja iznad granice elastičnosti negativno utjecati na duljinu njegove eksploatacije.

Ukoliko se na kraju proračuna zaključi da resultantna naprezanja u stijenci cjevovoda ne zadovoljavaju izložene uvjete sigurnosti čvrstoće u odnosu na veličinu dozvoljenog naprezanja, potrebno je izmijeniti konfiguraciju elementa cjevovoda, zatim eventualno i dimenzije cijevi i sa novim podacima ponoviti proračun.

Klasifikacijska društva u svojim pravilima manje ili više propisuju obavezu za provedbu proračuna elastičnosti brodskih cjevovoda. U nastavku su kratko navedeni njihovi zahtjevi i propisane vrijednosti.

Germanischer Lloyd zahtjeva provedbu analize elastičnosti za sve cjevovode sa radnom temperaturom $\geq 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, kao i za cjevovode namijenjene za transportiranje jako pothlađenih medija.

Hrvatski registar brodova zahtjeva da se za sve parovode promjera $\geq 80\text{ mm}$ i radne temperature $\geq 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ provede proračun elastičnosti u odnosu na toplinska produljenja, a prirubnički spojevi se moraju proračunati i na nepropusnost.

Bureau Veritas zahtjeva da se proračun elastičnosti izradi za sve cjevovode sa radnom temperaturom $\geq 350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kod toga određuje, da najveće resultantno naprezanje ne smije biti veće od granice puzanja materijala cijevi kod radne temperature, podijeljene sa koeficijentom sigurnosti 1,7. Spomenuta granica puzanja definirana je kao opterećenje u kp/mm^2 , koje između 25–og i 35–og sata uzrokuje izduženje od $5 \times 10^{-4}\%$ na sat za vrijeme ispitivanja sa ukupnim trajanjem od 72 sata.

American Bureau of Shipping i Det Norske Veritas najopširniji su u zahtjevima svojih pravila u odnosu na provedbu kontrole naprezanja u proračunu elastičnosti cjevovoda. DNV zahtjeva provedbu kontrole elastičnosti za sve parovode sa radnom temperaturom $\geq 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, a veliko ABS za glavne parovode sa radnom temperaturom $\geq 427\text{ }^{\circ}\text{C}$. Od obaveze kontrole elastičnosti ABS isključuje one elemente cjevovoda sa dvije čvrste točke kod kojih je zadovoljen uvjet da ne bude veća od 1 veličina Q određena pomoću formule:

$$Q = \frac{6000 \cdot D_n \cdot y}{(L - U)^2} \quad (148)$$

gdje je: D_n - nazivni promjer cijevi u mm,

y – ukupno toplinsko produljenje elementa cjevovoda u mm,

L – razvijena duljina simetrale cjevovoda u mm,

U – najkraća udaljenost čvrstih točaka mjerena na spojenom pravcu u mm.

Rezultantno naprezanje kao posljedica toplinskih produljenja mora se odrediti prema formuli:

- kod DNV:

$$\sigma_R = \sqrt{\sigma_b^2 + 4 \cdot \tau^2} \quad (149)$$

- kod ABS:

$$S_E = \sqrt{S_b^2 + 4 \cdot S_t^2} \quad (150)$$

gdje je: σ_R ili S_E - rezultantno naprezanje u N/mm²,

σ_b ili S_b - rezultantno naprezanje od savijanja u N/mm²,

τ ili S_t - rezultantno naprezanje od torzije u N/mm².

U pravilima DNV i ABS nije jednoznačno definirano o kojem se naprezanju od savijanja radi, ali ovdje treba podrazumijevati uzdužno naprezanje u stijenci cijevi. Rezultantno naprezanje izračunato prema formuli (132a) odnosno (132b) ne smije biti veće od dozvoljenog naprezanja propisanog u pravilima.

Proračuni elastičnosti svih cjevovoda, za koje je propisana kontrola elastičnosti u pravilima klasifikacijskih društava, moraju biti dostavljeni na odobrenje onom klasifikacijskom društvu, čiju klasu brod mora imati. Proračuni moraju sadržati, osim točne skice konfiguracije svakog elementa cjevovoda, i sve početne podatke potrebne za izvođenje detaljnog proračuna. Radi toga Bureau Veritas, Det Norske Veritas i American Bureau of Shipping u svojim pravilima taksativno navode, koji sve početni podaci moraju biti prikazani u proračunu dostavljenom na odobrenje.

8.4 Proračun toplinske izolacije

Izolacija se postavlja na cjevovode radi smanjenja količine topline koja prolazi od transportiranog medija unutar cijevi na okolni ambijent, odnosno od okolnog ambijenta na transportirani medij. Smjer prolaženja topline ovisi samo o tome, da li transportirani medij u cijevi ima višu temperaturu od okolnog ambijenta ili obrnuto. Količina topline ovisit će o razlici temperatura transportiranog medija i okolnog ambijenta, veličini površine preko koje se vrši taj prijelaz, te o vrsti materijala kroz koji prolazi toplina.

Kod brodskih cjevovoda izolacija se koristi na cjevovodima i uređajima uglavnom kod tri različita slučaja:

- 1.- Kada je transportirani medij zagrijan, tj. kada ima višu temperaturu od okolnog ambijenta- radi smanjenja temperature površine cjevovoda; ovaj primjer postoji kod svih vrsti parovoda, cjevovoda zagrijanog ulja za loženje itd.
- 2.- Kada je transportirani medij pothlađen u odnosu na okolni ambijent – također radi smanjenja gubitaka i sprječavanja nošenja površine cijevi; ovaj slučaj je nazočan kod cjevovoda rashladnih uređaja, cjevovoda ukapljenih plinova itd.
- 3.- kada okolni ambijent ima temperaturu nižu od 0°C- radi sprječavanja pojave zamrzavanja transportiranog medija u cjevovodu, ovaj primjer postoji kod cjevovoda slatke vode izloženih niskim temperaturama okolnog ambijenta.

Činjenica je ipak, da je od ukupnog broja cjevovoda instaliranih na brodu za različite namjene, samo jedan manji dio njih zaštićen primjenom izolacije radi smanjenja prolaza topline.

Materijali namijenjeni za izoliranje cjevovoda moraju imati minimalnu težinu i niski koeficijent toplinske vodljivost, ne smiju biti zapaljivi i ne smiju trunuti. Navedenim uvjetima više ili manje udovoljavaju izolacijski materijali, koji se najčešće upotrebljavaju za izoliranje brodskih cjevovoda, a to su :

- a.- za izoliranje pothlađenih cjevovoda i sprječavanje zamrzavanja: kudeljna pletenica, pust, pluto mljevene i u obliku ploča, te azbestno platno;
- b.- za izoliranje zagrijanog cjevovoda: azbestna pletenica i azbestno platno za temperaturu medija do 400°C, smjesa magnezija 85% i azbesta 15% za temperature medija do 450°C (ako je preddeformirana, tada se na cijevi pričvršćuje sa pocinčanom žicom), staklena vuna za temperature medija do 480°C i mineralna vuna za temperature medija do 830°C.

Staklena i mineralna vuna najbolje udovoljavaju zahtjevima za materijal izolacije, pa su bez sumnje najpovoljnije za primjenu. No, njihova upotreba ima i negativnu stranu, obzirom da se kod manipuliranja sa njima prilikom izrade izolacije na brodu, odvajaju se vrlo sitne čestice i dospijevaju u dišne organe i u pore kože radnika (naročito na rukama), što je vrlo štetno za zdravlje. Zbog toga, kod izvođenja izolacije sa staklenom i mineralnom vunom, radnici obavezno moraju koristiti respiratore i zaštitnu odjeću.

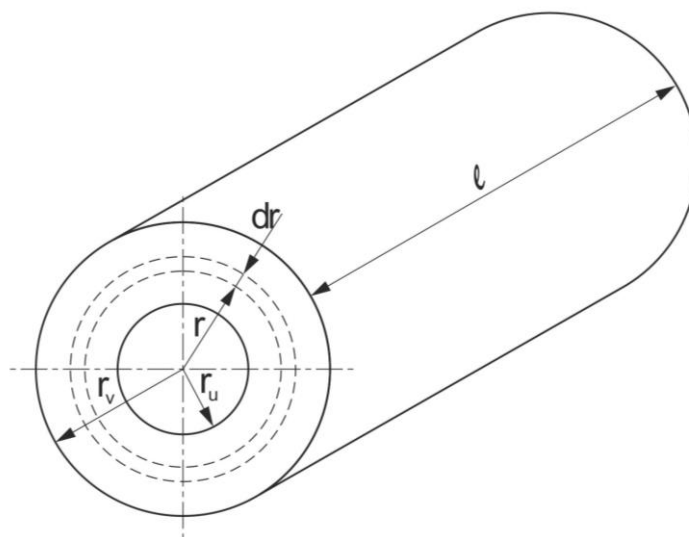
Bez obzira na vrstu upotrijebljenog materijala, izolacija se na cjevovod postavlja tako, da je od svakog prirubničkog spoja udaljena cca 80-100 mm. Time je omogućena nesmetana demontaža i

montaža elemenata cjevovoda, izoliraju se sa za tu svrhu posebno izrađenim azbestnim jastucima. Oblik jastuka mora biti podešen prirubničkom spoju ili vrsti armature. Konstruktivna izvedba jastuka mora omogućavati njegovo jednostavno skidanje i ponovo postavljanje.

Kod zagrijanih cjevovoda temperatura vanjske površine izolacije ne smije biti veća od 60 °C kako bi se izbjegla opasnost od opekotina kod posade broda. Uz ispunjenje ovog uvjeta, kod projektiranja izolacije potrebno je izvršiti takav izbor kvalitete izolacijskog materijala, da u najnepovoljnijim slučajevima debljina izolacije ne bude veća od vrijednosti danih u tablici 7.5-1.

Formulu za izvođenje proračuna toplinske izolacije moguće je izvesti pomoću teoretskih osnova iz Nauke o toplini. Stoga će se ukratko ponoviti taj izvod. Toplinski tok, koji se provodi kroz neku cilindričnu površinu stijenke polumjera r i duljine L prikazane na Slici 8-17, određuje se pomoću izraza:

$$Q_s = -\frac{dt}{dr} \cdot \lambda \cdot 2\pi r L \quad (151)$$



Slika 8-17 Segment cijevi

Kod ustaljenog stanja provođenja topline, kroz unutarnju i vanjsku cilindričnu površinu mora prolaziti ista količina topline. To znači da je $Q_s = konst$, pa iz (151) slijedi da je:

$$dt = -\frac{Q_s}{2\pi r L} \cdot \frac{dr}{r} \quad (152)$$

pa se kod $\lambda = konst$ integriranjem izraza (152) dobiva:

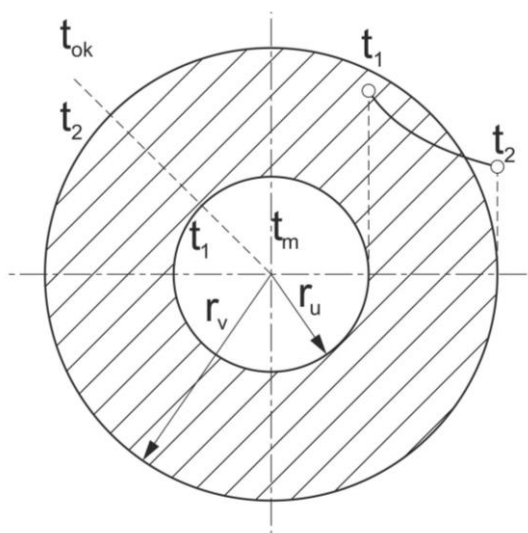
$$t_1 - t = \frac{Q_s}{2\pi r L} \cdot \ln \frac{r}{r_u} \quad (153)$$

Izraz (153) pokazuje da se temperatura u stijenci cijevi mijenja po zakonu logaritamske funkcije udaljenosti od osi cijevi. Krivulja promjene temperature prikazana je na Slici 8-18. Ako se za vanjsku površinu cijevi uvrsti $r=r_u$ i $t=t_2$, tada količina toka topline, koja prolazi kroz taj cilindar, iznosi:

$$Q_s = 2\pi r L \cdot \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{r_v}{r_u}} \quad (\text{J/s}) \quad (154)$$

Isti taj toplinski tok mora prijeći od zagrijanog transportiranog medija na unutarnju površinu stijenke polumjera r_u , te od vanjske površine stijenke polumjera r_v na okolni ambijent. Prijelaz topline od medija na unutarnju površinu karakteriziran je koeficijentom prijelaza topline α_1 , a od vanjske površine na okolni ambijent sa koeficijentom prijelaza topline α_2 (vidi Sliku 8-18). Ako se označi temperatura medija s t_m , a okolnog ambijenta s t_{ok} , tada će za jediničnu duljinu cijevi toplinski tok biti:

$$q_s = 2r_u \pi \alpha_1 (t_m - t_1) = \frac{2\pi \lambda}{\ln \frac{r_v}{r_u}} \cdot (t_1 - t_2) = 2r_v \pi \alpha_2 (t_2 - t_{ok}) \quad (\text{J/m} \cdot \text{s}) \quad (155)$$



Slika 8-18 Prolaz topline kroz cijevnu stijenku

Eliminiranjem temperatura na unutarnjoj i vanjskoj površini konačno se dobije izraz za određivanje toplinskog toka kroz stijenku cijevi jedinične duljine:

$$q_s = \frac{2\pi(t_m - t_{ok})}{\frac{1}{r_u \alpha_1} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_v}{r_u} + \frac{1}{r_v \alpha_2}} \quad (\text{J/m} \cdot \text{s}) \quad (156)$$

Izraz (156) omogućuje određivanje toplinskog toka kada je između transportiranog medija i okolnog ambijenta samo stijenka cijevi. Međutim kod postavljanja izolacije osim stijenke cijevi, na putu prolaženja toka topline postoji i debljina izolacije. U općem slučaju izolacija može biti izvedena iz više slojeva sa različitim vrijednostima koeficijenata toplinske vidljivosti λ . Za ovaj slučaj izraz (156) može se transformirati u formulu:

$$q_s = \frac{2\pi(t_m - t_{ok})}{\frac{1}{r_u \alpha_1} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_v}{r_u} + \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_1}{r_v} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \ln \frac{r_n}{r_{n-1}} + \frac{1}{r_n \alpha_2}} \quad (\text{J/m} \cdot \text{s}) \quad (157)$$

odnosno primjenom odgovarajućih promjera:

$$q_s = \frac{\pi(t_m - t_{ok})}{\frac{1}{d_u \alpha_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_v}{d_u} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_1}{d_v} + \dots + \frac{1}{2\lambda_n} \ln \frac{d_n}{d_{n-1}} + \frac{1}{d_n \alpha_2}} \quad (\text{J/m} \cdot \text{s}) \quad (158)$$

gdje su:

- α_1 i α_2 - koeficijenti prijelaza topline od transportiranog medija na stijenku cijevi i od vanjske površine izolacije na okolini ambijent,
- λ - koeficijent toplinske vodljivosti materijala cijevi,
- $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ - koeficijenti toplinske vodljivosti slojeva izolacije,
- t_m - temperatura transportiranog medija,
- t_{ok} - temperatura okolnog ambijenta,
- $d_u, d_v, d_1, \dots, d_n$ - odgovarajući unutarnji i vanjski promjer cijevi, te promjeri slojeva izolacije.

Radi pojednostavljenja proračuna u nazivniku formula (157) i (158) mogu se zanemariti:

- prvi član kod cijevi kroz koje prolazi tekući medij, i
- drugi član kod metalnih cijevi,

jer su vrlo mali u odnosu na ostale članove u nazivniku.

Uvođenjem novog koeficijenta prolaza topline, čija je vrijednost određena pomoću izraza:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{d_u \alpha_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_v}{d_u} + \frac{1}{2\lambda_1} \cdot \ln \frac{d_1}{d_v} + \dots + \frac{1}{2\lambda_n} \cdot \ln \frac{d_n}{d_{n-1}} + \frac{1}{d_n \cdot \alpha_2} \quad (159)$$

formula (140) dobiva mnogo jednostavniji i prikladniji oblik za proračun:

$$q_s = k \cdot \pi \cdot (t_m - t_{ok}) \quad (\text{J/m} \cdot \text{s}) \quad (160)$$

Toplinski tok kroz stijenku cijevi i slojeve izolacije je konstantna. Ta činjenica omogućuje da se izvrši provjera vrijednosti temperature na vanjskoj površini izolacije uz pomoć izraza:

$$q_s = \pi d_n d_2 (t_n - t_{ok}) \quad (161)$$

Odakle:

$$t_n = \frac{q_s}{\pi \cdot d_n \cdot \alpha_2} + t_{ok} \quad (162)$$

Ukoliko je tako izračunata temperatura t_n veća od maksimalno dopuštene 60°C, cijeli postupak proračuna treba ponoviti. Pri tome se mijenja debljina izolacije ili bira kvalitetniji izolacijski materijal.

9. OPREMA BRODSKIH CJEVOVODA

Pod pojmom oprema brodskih cjevovoda podrazumijevaju se svi oni raznovrsni proizvodi, uređaji i naprave koje se ugrađuju u brodski cjevovod za njegovo normalno funkcioniranje, za upravljanje sa radom broskog energetskog postrojenja, za održavanje funkcije dijelova brodske konstrukcije, za siguran i pouzdan rad samog cjevovoda, te za osiguranje normalnih ili snošljivih uvjeta života i rada na brodu za posadu i putnike. Ovdje pripadaju:

- 1.- Armatura – ventili (zaporni, zaporno-nepovratni, nepovratni, regulacijski, redukcijski, sigurnosni), butterfly ventili, ventilne stanice, zasuni, priklupci ili klapete, pipci, slavine, te razvodnici ili manipulatori.
- 2.- Prolazi cjevovoda- pregradni , palubni, priključci cjevovoda na pregradama i palubama.
- 3.- Spojevi cjevovoda- rastavljivi (prirubnički, narezni) i nerastavljivi
- 4.- Brtvljenje spojeva – za nepokretne, za pokretne spojeve
- 5.- Uisne naprave – košare, zvona, stopala
- 6.- Kompenzatori – kompenzacijske brtvenice, elastični kompenzatori, elastični elementi
- 7.- Oslonci i ovjesi cjevovoda
- 8.- Izolacija cjevovoda
- 9.- Zaštita cjevovoda od erozije i korozije
- 10.- zagrijavanje ili hlađenje cjevovoda.

Uisne naprave, kompenzatori i izolacija detaljnije su razmotreni u dosadašnjem dijelu izlaganja. Opis izvedbe i funkcioniranja jednog dijela opreme izložen je u srodnim predmetima brodstrojarskog usmjerenja studija. U nastavku izlaganja bit će detaljnije razmotrene izvedbe opreme za zaštitu cjevovoda od erozije i korozije. U ovom poglavlju posvetit će se više pažnje armaturi, kao najvažnijem dijelu opreme broskog cjevovoda, zatim izvedbama prolaza i spojeva cjevovoda, izvedbama opreme za brtvljenje cjevovoda, te osloncima i ovjesima.

9.1 Armatura brodskih cjevovoda

Zbirni naziv armatura obuhvaća veliki broj proizvoda raznih tipova i izvedbi sa zajedničkim zadatkom, da se ugrađuju u cjevovode radi prekida odnosno reguliranja toka transportiranog medija, za sigurnost cjevovoda itd. Nije potrebno posebno naglašavati važnost uloge armature u brodskim cjevovodima namijenjenim za potrebe broskog energetskog uređaja. Dovoljno je ustvrditi, da je armatura stvarno sastavni dio instalacija energetskih uređaja, a i ostalih brodskih sustava, pomoću koje se ostvaruju svi zadaci brodskih instalacija za sigurnu plovidbu broda i osiguranje života na njemu. Posebno treba naglasiti, da upravo brodska armatura omogućuje što ekonomičnije odvijanje svih procesa na brodu. Radi toga su njezine konstruktivne izvedbe u

stalnom razvoju i usavršavanju, naročito u smislu postizanja što veće automatizacije kod upravljanja sa radom svih brodskih sustava.

Tehnički zahtjevi za normalno funkcioniranje armature, te zahtjevi pouzdanosti, pogodnosti posluživanja i prikladnosti za njezin remont, imaju bitan utjecaj kod definiranja zahtjeva kojima mora udovoljiti brodska armatura. Za razliku od uvjeta eksploatacije armature u stacionarnim postrojenjima, na brodu su ti uvjeti sasvim drugačiji. Na brodu armatura može biti smještena u prostore kaljuže, u prostorije srednjeg dijela broda i na gornjoj palubi.

Armaturi smještenoj u prostorima kaljuže u pravilu je otežan pristup. Zbog toga su ograničene mogućnosti nadzora njezinog tehničkog stanja. U toku eksploatacije armatura u kaljuži može biti povremeno izložena djelovanju morske vode. Uslijed razlike u temperaturi transportiranog medija i okolnog ambijenta u prostoru njezinog smještaja, na vanjskoj površini armature dolazi do kondenzacije vode, što ima negativan utjecaj na korozijsku otpornost materijala vanjskih dijelova armature. Unutar armature na usisnim cjevovodima morske vode, naročito u ventilima smještenim na oplati broskog trupa (tzv. kingston ventilima), u toku eksploatacije razvijaju se razne vrste školjki, koje su uzrok oštećenja brtvenih površina zapornog organa. Zbog navedenih vrlo teških uvjeta, neophodna je što češća kontrola stanja ove armature, a i njezin vijek trajanja je osjetno ograničen.

Uvjeti eksploataciji armature smještene u prostorijama srednjeg dijela broda izrazito su bolji u odnosu na djelovanje okolnog ambijenta i mogućnosti nadzora nad njezinim stanjem. Trajnost ove armature zbog toga može biti osjetno veća od trajnosti armature smještene u prostorima kaljuže.

Armatura smještena na gornjoj palubi izložena je djelovanju kapljica morske vode, morske magle, te razlika u temperaturi. Kod nje je temperaturni režim okolnog ambijenta određen sa područjem plovidbe broda.

Temperatura okolnog zraka može se mijenjati od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ u različitim područjima plovidbe broda. Sa gledišta korozijskog djelovanja na materijale, najteži uvjeti su u zonama tropske klime sa temperaturom zraka do $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ i relativnom vlažnosti do 100%. U zonama hladne klime temperatura od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ uzrokuje značajno smanjenje plastičnih svojstava materijala. Niska temperatura posebno štetno djeluje na nemetalne materijale, koji se uglavnom upotrebljavaju kao elementi za brtvljenje u armaturi.

Bilo koja izvedba armature može biti smještena u svaki od navedenih prostora unutar broda. Prema tome, bez obzira na izvedbu, brodska armature mora biti projektirana za upotrebu u bilo kojim uvjetima, tako da bude osigurana radna sposobnost brodskih sustava.

Nabrojani vanjski uvjeti proizlaze iz stanja okolnog ambijenta i utječu uglavnom na korozijska svojstva materijala armature. Osim o njima, projektant mora voditi računa i o nizu drugih faktora od bitnog značaja za projektiranje. U grupu osnovnih zahtjeva za brodsku armaturu treba svrstati sljedeće:

- mogućnost montaže u bilo kojem položaju (od ovoga su iznimke nepovratne izvedbe ventila, pojedini tipovi sigurnosnih ventila i specijalna armatura za automatiku)
- jednostavnost i pogodnost za eksploataciju

- hermetičnost (dovoljan stupanj hermetičnosti zapornog organa, te nepropusnost u odnosu na okolni ambijent)
- postojanje pokazivača za otvoreni i zatvoreni položaj zapornih organa kod daljinski upravljane armature
- postojanje lokalnog pokazivača položaja zapornog organa kod armature sa ručnim i daljinskim mehaničkim upravljanjem
- postojanje paralelnog ručnog mehanizma za upravljanje sa armaturom u slučaju kvara daljinskog upravljanja
- osiguranje pokretanja putem ručnog ili daljinskog upravljanja nakon dugotrajnog stajanja armature u neradnom stanju i bez povremenog otvaranja i zatvaranja
- osiguranje fiksiranja zapornih organa u krajnjim položajima
- osiguranje rada bez udarca daljinski upravljane armature sa reguliranjem vremena njezinog pokretanja pomoću hidraulike
- odsutnost pojave šumova od kavitacije kod prolaza medija kroz protočni dio armature
- održavanje dozvoljenog nivoa šuma zraka kod rada armature
- osiguranje da na ručnom mehanizmu potrebno opterećenje ne bude veće od 150 N
- minimalna masa armature

Navedenim osnovnim zahtjevima brodska armatura mora udovoljiti u uvjetima realno prisutnim u radu brodskih sustava, a to su:

-istovremeno djelovanje valjanja, nagiba i trima broda

- vibracije, kod kojih mora biti osigurana otpornost armature na vibracije, stabilnost reguliranih točaka i parametara transportiranog medija, te pouzdanost svih spojeva; ne smije doći do pojave rezonance armature u cjelini ili pojedinih njezinih dijelova kod svih frekvencija, koje su realno moguće u brodskim uvjetima rada
- šokovi do najvećeg intenziteta kod svih frekvencija (visina intenziteta šokova i otpornost armature na šokove ovise o namjeni broda)

U navedenim uvjetima rada i uz zadovoljenje osnovnih zahtjeva, konstruktivna izvedba brodske armature, bez obzira na tip i oblik, mora biti maksimalno pouzdana u toku eksploatacije i sa što većom trajnošću. Pouzdanost i trajnost armature u eksploataciji sve više dolaze do izražaja kod modernih brodova, gdje je tendencija uvođenja što veće automatizacije rada brodskih sustava. S time u vezi nastaju bitne promjene u uvjetima eksploatacije i održavanja tih sustava u cjelini, a također i u uvjetima razmještaja brodske armature.

Za izradu dijelova armature koristi se samo jedan dio standardnih materijala od veliko izbora koji je na raspolaganju na tržištu. Za ispravan izbor materijala potrebno je posvetiti posebnu pažnju samo važnijim dijelovima armature, kao što su na primjer kod ventila – kućište, vreteno, matica vretena, pladanj i sjedište pladnja. Ti dijelovi moraju u što većoj mjeri udovoljiti zahtjevima koji proizlaze iz uvjeta eksploatacije, konstruktivnih osobitosti i tehnologije, izrade armature. Materijali za armaturu moraju udovoljiti slijedećim osnovnim zahtjevima:

- visoka korozijska – erozijska otpornost u različitim medijima u toku propisane trajnosti
- visoka mehanička svojstva – čvrstoća, plastičnost, žilavost
- visoka otpornost na prijanjanje i habanje kod trenja bez podmazivanja i kod primjene specijalnog načina podmazivanja (na primjer kod povremenog nanošenja sredstva za podmazivanje)
- visoka sposobnost nošenja specifičnih površinskih tlaka koja omogućuje smanjenje mase detalja
- održavanje svojstva dugotrajne eksploatacije
- niska cijena.

Sa gledišta korozijske otpornosti i izdržljivosti protiv erozije presudan značaj kod izbora materijala ima transportirani medij i uvjeti rada dijelova armature. Potrebno je uzeti u obzir zagađenost medija, brzinu njegovog protjecanja, radnu temperaturu i tlak. U odnosu na korozijsko djelovanje agresivnog medija najosjetljivija mjesta armature su brtvene površine zapornih organa, gdje se pojavljuju najaktivniji procesi korozijsko-erozivno djelovanja. Ova pojava je izrazita kod armature pomoću koje se vrši regulacija parametara transportiranog medija.

Za proračun čvrstoće dijelova armature koriste se vrijednosti mehaničkih svojstava propisane u standardima za odabrani materijal. No, kod toga treba uzeti u obzir da se mehanička svojstva materijala ne mijenjaju sa promjenom temperature. Povećanje temperature će, u pravilu, uzrokovati smanjenje svojstava čvrstoće materijala, a povećanje plastičnosti. Kod smanjenja temperature slučaj je obrnut- svojstva čvrstoće se povećavaju, a plastičnosti smanjuju, pa tako poneki žilavi materijali mogu postati kruti. Ova pojava je naročito važna kod armature upotrijebljene u cjevovodima za plinovite medije, obzirom da se zbog smanjivanja tlaka mogu postići vrlo niske temperature.

Dijelovi parne armature istovremeno su podvrgnuti djelovanju visokih opterećenja i temperatura. U tim uvjetima značajne su pojave puzanja, relaksacije materijala i smanjenja čvrstoće tokom vremena (trajna čvrstoća). Pojava relaksacije je naročito važna kod projektiranja nepropusnih priрубničkih spojeva. Pojava relaksacije kod vijaka za pritezanje tih spojeva može uzrokovati nestanak nepropusnosti spoja u toku eksploatacije. O pojavi relaksacije treba nadalje voditi računa kod izbora tolerancija za stezni spoj kod uprešanih sjedišta za pladanj itd.

Važna karakteristika materijala su njegova antifrikcijska svojstva. Ona definiraju njegovu sposobnost da ne naginje prijanjanju i habanju, a u vezi s time je i mali koeficijent trenja. Kod armature se prijanjanje pojavljuje na površinama dijelova, koji se dodiruju kod međusobnog pomicanja, na primjer: na brtvenim konusnim površinama zapornog organa zasuna i ventila, u narezu vretena, u narezu holender spojeva, na mjestu dodira vretena sa tuljkom za vođenje, na mjestu oslanjanja sfernog završetka vretena na pladanj itd. Posljedica prijanjanja je zaribavanje sa pojavom vrlo ozbiljnih oštećenja dodirnih površina, što u toku eksploatacije armaturi smanjuje njezinu pouzdanost ili je eliminira iz pogona.

Presudan značaj kod izbora materijala za važnije dijelove armature imaju njegova tehnološka svojstva i to : ljevačka svojstva, zavarljivost i mogućnost lemljenja, obradivost toplim i hladnim

plastičnim deformiranjem, obradivost rezanjem, mogućnost izvršenja operacija toplinske, kemijsko-toplinske i galvanske obrade, te sposobnost poliranja. Svako od navedenih svojstava ima presudnu ulogu kod donošenja odluke, da li će se pojedini materijal upotrijebiti za izradu određenog dijela armature.

Očito je da materijali za brodsku armaturu moraju udovoljiti mnogobrojnim, pa često i proturječnim zahtjevima. Standardno se upotrebljavaju sljedeći materijali: sivi lijev (samo u pojedinim cjevovodima gdje su relativno niski radni tlakovi i gdje ne postoji povišena radna temperatura), žilavi lijev, mjed, bronca, ugljični čelik, legirani čelik, legure lakih metala, specijalne legure sa titanom i plastične mase. Niti jedan od tih materijala ne zadovoljava u potpunosti svim zahtjevima. Svaki od tih materijala ima svojih prednosti, koje su u prilog njegove upotrebe, ali i nedostataka. Radi toga se istovremeno koriste materijali sa visokim tehnološkim svojstvima i materijali čija je obrada povezana sa poteškoćama. Za izradu dijelova treba izvršiti takav izbor materijala, da bude osigurana visoka radna sposobnost i pouzdanost armature u eksploataciji.

Klasifikacijska društva u svojim pravilima za sve cjevovode ne dozvoljavaju upotrebu armature sa kućištem izrađenim iz nekih od navedenih materijala. Jedino se armatura sa kućištem izrađenim od bronce, ugljičnog ili legiranog čelika može koristiti bez ograničenja u svim cjevovodima, bez obzira na veličinu nazivnog promjera i na visinu nazivnog tlaka. Na primjer, armatura sa kućištem izrađenim od sivog lijeva smije se upotrebljavati samo u cjevovodu kaljuže, balasta, te rashladne morske vode i slatke vode bez ograničenja u odnosu na nazivni tlak i nazivni otvor, zatim u cjevovodu hidraulike samo do nazivnog tlaka 1,6 MPa, u cjevovodu komprimiranog zraka samo do nazivnog tlaka 1,0 MPa i radne temperature 220°C, te u cjevovodu goriva i maziva uz ograničenje upotrebe sa nazivnim tlakom i nazivnim otvorom. Kod ostalih cjevovoda, za koje klasifikacijska društva u svojim pravilima detaljnije propisuju pojedinosti, nije dozvoljena upotreba armature sa kućištem od sivog lijeva (na primjer: parovodi, napojni cjevovod itd.). Slična, ali očito manja ograničenja postoje za armaturu sa kućištem od žilavog lijeva i mjedi. Ostali prethodno spomenuti materijali za izradu kućišta armature, mogu se koristiti u cjevovodima detaljnije propisanim od klasifikacijskog društva, jedino ako za svaki pojedini primjer brodogradilište dobije pristanak. Za davanje pristanka klasifikacijskog društvo posebno razmatra svaki takav primjer pojedinačno. Ograničenja za korištenje pojedinih materijala nisu istovjetna kod svih klasifikacijskih društava. Zbog toga projektant cjevovoda mora strogo voditi računa o spomenutim ograničenjima onog klasifikacijskog društva čiju klasu mora imati brod.

S obzirom na mjesto ugradnje unutar trupa broda, armaturu treba dijeliti u tri skupine, i to:

- 1.- koja se ugrađuje izravno na oplatu trupa broda, pregradu pramčanog pika i nepropusne pregrade,
- 2.- koja se montira izravno na strukturne i ugrađene tankove goriva i maziva, razne posude pod tlakom, kotlove i ostale parne uređaje, te
- 3.- ostalu, koja se montira u cjevovode.

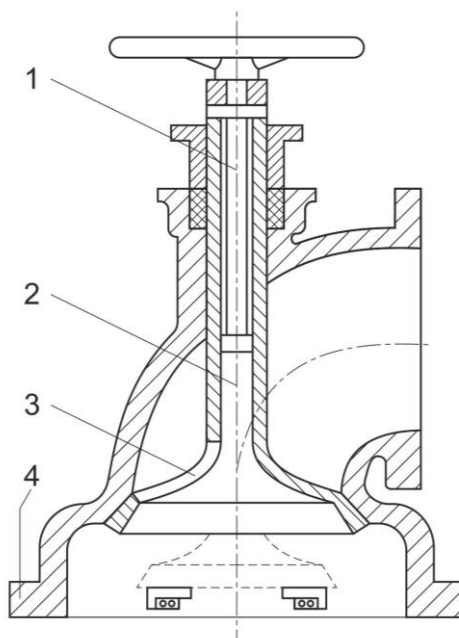
Jedan dio armature svrstane u drugu skupinu ne smatra se sastavnim dijelom cjevovoda, već ugrađene energetske opreme (armatura na kotlu, na posudi pod tlakom itd.). Ova armatura je

predmet razmatranja kod projektiranja te opreme. Svu ostalu armaturu treba tretirati kao sastavni dio brodskih cjevovoda. Kod nje se primjenjuju različiti kriteriji za konstruktivnu izvedbu kućišta i primjenu materijala za izradu kućišta ovisno o pripadnosti jednoj od navedenih skupina.

Realno je uvijek moguće u toku eksploatacije da dođe do loma kućišta armature svrstane u prvu skupinu. U tom slučaju je neposredno ugrožena sigurnost broda zbog direktnog prodora vode u trup odnosno zbog poremećaja projekta za nepotopivost broda. Prema tome za konstruktivnu izvedbu kućišta ove armature moraju se primijeniti najstroži kriteriji. Kućište i njegova prirubnica za pričvršćivanje na konstrukciju trupa broda moraju biti projektirani za dva do tri stupnja veći nazivni tlak. Materijal kućišta smije biti samo iz kategorije žilavih materijala (bronca, ugljični i legirani čelik). Tako se postiže specijalno ojačana konstruktivna izvedba, pa zato ova armatura ima i poseban naziv „oplatna armatura“.

Kućišta armature svrstane u drugu skupinu moraju biti projektirana za jedan do dva stupnja veći nazivni tlak. Za upotrebu materijala ovdje vrijede ista ograničenja kao kod armature iz prve skupine. Opisani kriterij za armaturu iz prve i druge skupine propisani su kao zahtjevi i u pravilima klasifikacijskih društava.

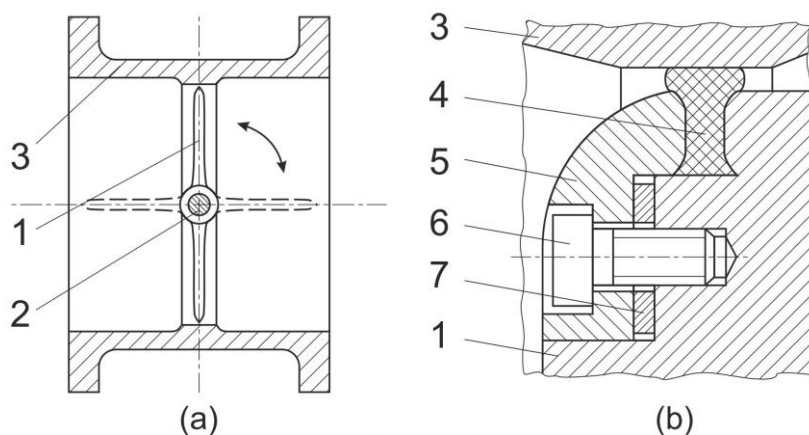
Ventil za usis rashladne morske vode ili kingston ventil prikazan je na Slici 9-1. U većini slučajeva to su ventili kutne izvedbe kućišta. Na ojačanje na oplati trupa pričvršćuju se pomoću prirubnice (4). Naročitost u njihovoj konstrukciji je u tome, da se pladanj (2) nalazi ispod sjedišta (3) ventila. Znači, strujanje vode iz mora u usisni cjevovod nastoji ga zatvoriti. To nije potpuno u skladu sa principima koji se primjenjuju za smjer strujanja medija kroz ventil kod standardnih izvedbi, ali su time postignute dvije veoma značajne prednosti.



Slika 9-1 Kingston ventil

Prvo, ako dođe do loma vretena (1) i ventil bude tako onesposobljen za normalno funkcioniranje, strujanje morske vode će nastojati pritisnuti pladanj (2) na sjedište (3). Tako će se smanjiti odnosno potpuno prekinuti ulazjenje morske vode u unutrašnjost broda. Drugo, zamjena i demontaža pladnja (2) i sjedišta (3) može se obaviti izvana, pa za tu operaciju nije nužno demontiranje čitavog ventila. Ovi ventili se nalaze većinom na oplati blizu dna broda, pa operaciju demontaže i monte pladnja (2) i sjedišta (3) može obaviti ronilac. Demontaža čitavog ventila radi njegovog popravka moguća je samo na dokovanom brodu, što je neusporedivo skuplje. Na kraju je potrebno naglasiti, da se hermetičnost zatvaranja kingston ventila mora postići tlakom metalne brtvene površine pladnja (2) na metalnu brtvenu površinu sjedišta (3). Time je svedena na minimum mogućnost njihovog oštećenja od krutih čestica školjaka, koje izrastu tokom vremena u eksploataciji.

Buterfly ili leptir ventil prikazan je na Slici 9-2. Njegova konstruktivna izvedba je, grubo rečeno, sinteza ventila i zasuna. Otvaranje odnosno zatvaranje buterfly ventila obavlja se zakretanjem ručnog kola ili ručice pričvršćene na osovinu (2) izvan kućišta (3). Okretanjem osovine (2) premješta se leptir (1) unutar kućišta (3) u zatvoreni ili otvoreni položaj, kako je prikazano na Slici 9-2a. Veza između ručnog kola i osovine (2) u većini slučajeva ostvarena je posredstvom zupčanog ili pružnog prijenosa, naročito u slučajevima kada se manipulacija otvaranja i zatvaranja obavlja ručno.



Slika 9-2 Butterfly ventil

Ovakvom izvedbom postignuto je da strujanje medija kroz ventil ne mijenja smjer, pa se koeficijent otpora relativno malen – približno kao kod zasuna. Nadalje, leptir (1) se kao zaporni organ zakreće, a ne giba se translatorno. Zbog toga je konstrukcija kućišta neusporedivo manja od kućišta zasuna, pa mu je i masa mnogo manja. Također su i sile potrebne za zakretanje leptira značajno manje od sila potrebnih za podizanje zapornog organa zasuna, jer je bitno različita veličina dodirnih površina naročito u početku gibanja zapornog organa.

Hermetičnost zatvaranja leptira u kućištu ostvarena je pomoću gumene brtve (4) ugrađene u leptir (1), prema Slici 9-2b. Gumena brtva je pričvršćena u leptiru (1) pomoću prstena (5) i

vijaka (6). Regulacija pritezanja brtve (4) omogućena je mijenjanjem debljine podloške (7), a time se ujedno regulira i hermetičnost zatvaranja ventila za razne radne tlakove medija.

Veoma privlačne prednosti leptir ventila su mali koeficijent otpora, težina i gabarit. One naročito postaju izrazite kod većih nominalnih otvora cjevovoda. Osnovni i najveći nedostatak im je što se hermetičnost zatvaranja zapornog organa postiže pomoću gumene brtve. Današnja tehnologija omogućuje dobivanje raznih kvaliteta gume kemijski otporne na agresivne medije, ali svaka guma je osjetljiva i neotporna na mehanička oštećenja. Zbog toga leptir ventili nisu pogodni za primjenu u cjevovodima rashladne morske vode. Većinom se upotrebljavaju u cjevovodima nafte i naftnih derivata, odnosno kod medija koji nisu zagađeni krutim česticama.

U brodskim cjevovodima često se primjenjuju ventilne stanice, ventilne kutije i ventilni sanduci. Korištenje ventilnih stanica, kutija ili sanduka omogućuje, da se upravljanje sa pojedinim sustavima koncentrira uglavnom u jednom prostoru, gdje je osigurano da posada sa njima stručno upravlja. Sa takvim smještajem je ujedno omogućen i najbolji pregled nad funkcioniranjem dotičnog sustava cjevovoda. Primjenom ventilnih stanica, kutija ili sanduka postiže se bitno manja težina od potrebnog broja pojedinačne armature sa kojom bi se postigao isti efekt za opseg mogućnosti upravljanja sa jednim ili više sustava cjevovoda. Njihova upotreba pogodnija je kod manjih promjera cjevovoda.

Najekonomičnije rješenje je da standardiziranu brodsku armaturu proizvode specijalizirani proizvođači. U toku proizvodnje mora biti organizirana stalna kontrola kvalitete upotrijebljenog materijala putem određivanja kemijske analize i ispitivanja mehaničkih i tehnoloških svojstava. To se naročito odnosi na lijevane dijelove armature, kao što su većinom kućišta i zaporni organi. Svaki izrađeni primjerak armature mora se nadalje podvrgnuti kontroli na nepropusnost pomoću hidrauličkog ispitivanja. Kod toga se odvojeno ispituje nepropusnost kućišta sa ispitnim tlakom ne manjim od 1,5 (NP), a zatim hermetičnost zatvaranja zapornog organa u smjeru strujanja transportiranog medija sa ispitnim tlakom 1,0-1,25 (NP).

Prema zahtjevima u pravilima klasifikacijskih društava kontrola kvalitete materijala mora se izvršiti za svu armaturu iz prve skupine, zatim za armaturu namijenjenu za parne cjevovode, cjevovode napojne vode i cjevovode komprimiranog zraka, te za armaturu koja se montira na kotlove i posude pod tlakom, ako je radni tlak veći od 0,7 MPa, odnosno nazivni otvor veći od 32 do 50mm. Svaki pojedini primjerak mora biti ispitan na nepropusnost kućišta sa ispitnim hidrauličkim tlakom visine 1,5-2,5 (NP), odnosno sa najmanje 0,35 do 0,4 MPa, a zatim na hermetičnost zatvaranja zapornog organa sa ispitnim tlakom 1,25 (NP). Kontrola kvalitete materijala kućišta i hidraulična ispitivanja moraju se provesti kod proizvođača armature u prisutnosti inspektora klasifikacijskog društva. Ukoliko su sva ispitivanja dala zadovoljavajuće rezultate, inspektor utiskuje svoje oznake i žig na svaki pojedini primjerak armature, te za preuzetu armaturu izdaje odgovarajuće uvjerenje (atest). Potrebno je još napomenuti, da klasifikacijska društva međusobno nemaju jednoznačne zahtjeve u odnosu na donju granicu, od koje je proizvođač obavezan da kontrolu kvalitete materijala i hidraulična ispitivanja gotove armature provodi pod izravnim nadzorom njihovog inspektora.

U jedan brod ugrađuje se velik broj raznih tipova armature različitih nazivnih otvora. To je neminovna potreba. Kod projektiranja i gradnje broda uvijek se nastoji da ugrađena oprema ima što manju težinu, jer se tako dobiva na većoj nosivosti za teret. Na brodu je također uvijek

prisutan problem skućenosti prostora prilikom ugradnje opreme. Armatura je relativno lagana i malog gabarita u odnosu na drugu opremu koja se ugrađuje u brod. No, obzirom na njezinu mnogobrojnost potrebno je uvijek nastojati da se koristi što lakša armatura i sa što manjim gabaritom, jer se ovdje i sa malim pojedinačnim uštedama na težini i gabaritu mogu postići veliki ukupni efekti.

9.2 Spojevi cjevovoda

Osnovna svrha postojanja cjevovoda je da se pomoću njih izvrši međusobno spajanje raznih strojeva, uređaja i opreme ugrađene u brod. Pomoću cjevovoda se nadalje ostvaruje veza ugrađenih strojeva, uređaja i opreme sa raznim vrstama medija smještenim u ugrađene i strukturne tankove, te izvan trupa broda. Za ostvarenje navedenih zadataka pojedini elementi jednog dijela sustava cjevovoda moraju prolaziti kroz palube i nepropusne pregrade unutar trupa broda. U trasu svakog cjevovoda moraju se montirati spajanjem razne vrste armature, kao njegovog sastavnog dijela. Nabrojene činjenice zahtijevaju postojanje spojeva u cjevovodima.

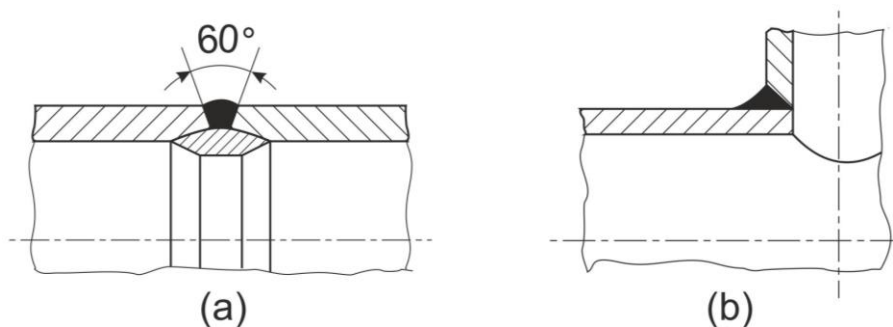
Postoji još čitav niz drugih razloga, kao što su:

- svi proizvođači u svijetu isporučuju cijevi u trgovačkim duljinama 4 do 10 metara bez obzira na veličinu promjera, a potrebe za duljinama elemenata cjevovoda na brodu su sasvim drugačije
- ekonomično korištenje cijevi isporučenih u trgovačkim duljinama kod krojenja i izrade trase cjevovoda, tako da otpad bude što manji
- pojedini elementi cjevovoda moraju se granati na dva ili više ogranaka što se uvijek izvodi pomoću posebno ugrađenih elemenata ili armature.
- ograničenje duljine pojedinih gotovih elemenata cjevovoda, da bi se omogućilo njihovo nesmetano unošenje u teško pristupačne prostore u brodu
- ograničenje duljine elemenata cjevovoda kod kojih se mora provesti tako zvani topli postupak antikorozivne zaštite uronjavanjem u kadu sa rastopljenim cinkom, koji također zahtijevaju da se u trasi cjevovoda primjenjuju spojevi.

Sve vrste spojeva kod cjevovoda mogu se grupirati u nerastavljive i rastavljive. Nerastavljivi spojevi izvide se zakivanjem, lemljenjem ili zavarivanjem. Zakivani nerastavljivi spojevi koristili su se ranije kada tehnologija lemljenja i naročito zavarivanja nije još bila dovoljno razvijena. Danas se kod nerastavljivih spojeva uglavnom primjenjuje lemljenje ili zavarivanje, što prvenstveno ovisi o vrsti materijala cijevi. Za izvedbu većeg dijela brodskih cjevovoda koriste se cijevi od metalnih materijala, a među njima čelik ima dominantno mjesto. Zbog toga se može kazati da se zavarivanje najčešće koristi za izradu nerastavljivih spojeva, jer je danas najpovoljnija tehnologija za spajanje točaka.

Nerastavljivi zavareni spojevi kod cijevi se izvide stično prema Slici 9-3a ili kutno privarivanje ogranaka prema Slici 9-3b. Kod ovakvih vrsti spojeva izbjegnuta je mogućnost propuštanja na samom spoju i to im je velika prednost. Time je postignuto da je element cjevovoda nepropustan između dva rastavljiva spoja. Ujedno je težina takvog spoja mnogo manja od bilo kojeg

rastavljivog spoja, jer nema dodatnih težina – na primjer nema prirubnica. Osnovna mana tog spoja je njegova nerastavljivost. Zbog toga se taj spoj ne može koristiti na spojevima, gdje je potrebno demontiranje elemenata cjevovoda u toku eksploatacije broda. Nadalje, nerastavljivi zavareni spojevi diktiraju dodatna ograničenja kod izrade elemenata cjevovoda predviđenih za zaštitu pocinčavanjem, jer kod zavarivanja zaštitni sloj cinka nestane.



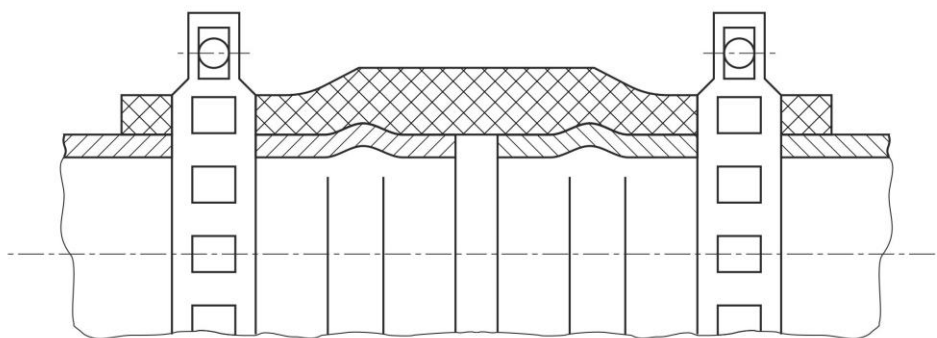
Slika 9-3 Nerastavljivi zavareni spojevi kod cijevi

Stično spajanje cijevi manjih promjera može se izvesti elektrootpornim zavarivanjem na posebnom stroju. Ovakav postupak zavarivanja izvodljiv je samo u radionici. Zavarivanje stičnih i kutnih spojeva redovito se izvodi ručno autogenim ili električnim postupkom zavarivanja u radionici ili na brodu. Ako je debljina stijenke do 4 mm spojni stični šav izvodi se bez skošavanja. Kod većih debljina krajeve cijevi treba skositi pod kutem od 60° prema Slici 9-3. Koeficijent oslabljenja φ ovako zavarenog spoja ne smije biti manji od 0,9, pa je time propisana velika čistoća i homogenost zavarenog spoja. Zbog toga naročitu pažnju treba posvetiti zavarivanju korijena šava i to da bude dobro provaren i homogen, te da na unutarnjem promjeru ne strše skrutnute kapljice dodatnog materijala, jer one značajno smetaju strujanju transportiranog medija i povećavaju otpore. Za izbjegavanje formiranja kapljica dodatnog materijala i dobro provarivanje korijena šava, postavlja se naročito oblikovani podložni prsten. Poželjno je da se prsten nakon zavarivanja odstrani, ako je to izvodljivo, jer je i on dodatni otpor kod strujanja transportiranog medija kroz cijev.

Klasifikacijska društva ne dozvoljavaju primjenu autogenog postupka zavarivanja kod promjera cijevi većih od 100 mm i debljina stijenki većih od 9,5 mm. Zato se kod cijevi većih promjera i debljina stijenki prakticira oblikovanje korijena šava autogenim postupkom, a nastavak se zavari električnim postupkom. Kombiniranjem autogenog i električnog postupka postižu se veće homogenosti i manji izdanci na unutarnjem promjeru cijevi, što omogućava autogeni postupak zavarivanja.

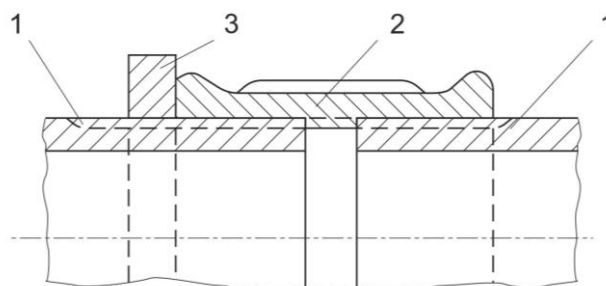
Rastavljivi spojevi izvedu se steznim obujnicama, kolčacima ili fitinzima, preturnim (holender) maticama – tzv. holender spojevi i pomoću prirubnica. Posebno još treba spomenuti brzorastavljive spojeve izvedene pomoću tako zvanih bajonet spojki (Storz spojke), koji se koriste samo kod protupožarnog cjevovoda za priključivanje platnenih cijevi, kod prijenosnih pumpi, te priključaka za spašavanje drugih brodova, također za priključivanje prijenosnih elastičnih (gipkih) cijevi.

Obujmice se koriste za spajanje gumenih, plastičnih i platnenih cijevi, te kod elastičnih spojeva metalnih cjevovoda. Njihova izvedba je prikazana na Slici 9-4. Kod ovih spojeva se gumena, plastična ili platnena cijev uvijek mora tijesno navući na metalnu a zatim se pritegne sa obujmicom. Radi veće sigurnosti spoja na metalnoj cijevi može se jedan ili više prstena oblikovati lokalnim povećanjem promjera cijevi. Obujmica u ovom spoju samo pojačava brtvljenje (nepropusnost spoja), koje je već postignuto tijesnim navlačenjem gumene na metalnu cijev. Glavni joj je zadatak da spriječi međusobno aksijalno pomicanje gumene i metalne cijevi kao posljedice djelovanja tlaka transportiranog medija. Izvedba konstrukcije obujmice treba omogućiti da se njezino radijalno pritezanje postigne na što većem dijelu opsega (idealno je 100%, ali teško ostvarivo). Danas postoji nekoliko patentiranih izvedbi obujmica, ali kod svih je zajedničko da im je upotreba ograničena kod većih promjera cijevi. Prije šire primjene obujmica i kod većih promjera cijevi isti efekt se može postići namatanjem i pritezanjem tanke žice, odnosno tankog konopa kod platnenih cijevi. No, primjena žice ili tankog konopa zahtijeva znatno više vrijeme za montažu takvog spoja.



Slika 9-4 Obujmica

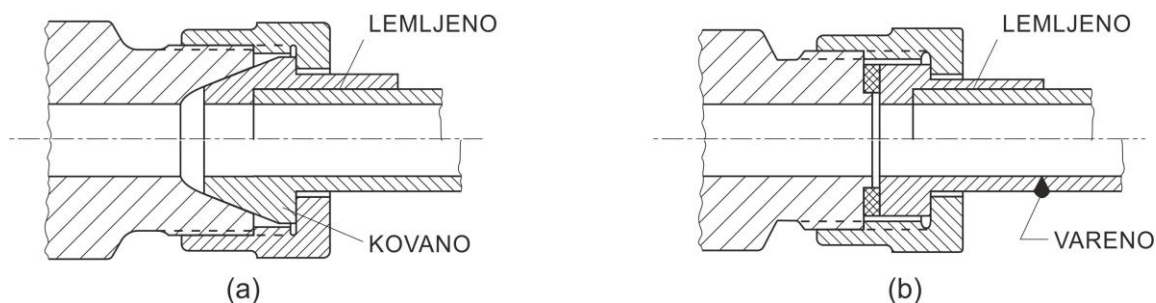
Kolčaci ili fitinzi mogu se koristiti za potrebe spajanja metalnih cijevi ali samo kod cjevovoda za slatku i morsku vodu, za potrebe grijanja toplom vodom, za komprimirani zrak niskog tlaka, za odušne cijevi i cijevi za sondiranje kaljuže i tankove vode, te kod sanitarnih cjevovoda. Izvedba spoja sa kolčakom prikazana je na Slici 9-5. Na stijenrama cijevi (1) mora biti izrađen narez za navrtavanje kolčaka (2), kojega treba fiksirati i osigurati od odvrtanja sa kontra maticom (3). Izrada nareza je moguća samo kod povećane debljine stijenke cijevi, ali je zbog postojanja zareza veća opasnost za pojavu pukotina u zarezu, tj za puknuće stijenke cijevi. Prema tome, ograničenje primjene ovakvog spoja uzrokovano je potrebom izrade nareza na stijenci cijevi. Za postizanje nepropusnosti takvog spoja, kod montaže kolčaka treba koristiti natopljeno konopljeno predivo ili njemu adekvatan brtveni materijal za spojeve sa narezom. Klasifikacijska društva u svojim pravilima dozvoljavaju upotrebu kolčaka jedino kod odušnih cijevi i cijevi za sondiranje kaljuže i tankova vode. Prema tome kolčaci se mogu upotrebljavati jedino još kod onih sustava cjevovoda, koji nisu pod izravnim nadzorom klasifikacijskih društava. Spojevi sa kolčakom primjenjuju se na cijevima unutarnjeg promjera do 150 mm.



Slika 9-5 Izvedba spoja sa kolčakom

Danas postoji veliki broj različitih varijanti izvedbe spojeva sa pretornom (holender) maticom, poznatih pod nazivom holender spojevi. S jedne strane su to izvedbe sa brtvljenjem na konusnoj površini bez primjene posebne brtve, a sa druge sa prirubljivanjem krajeva cijevi, gdje se obavezno mora koristiti posebna brtva od mekšeg materijala. Na Slici 9-6 prikazane su neke varijante izvedbe ovog spoja. Zajednička značajka za izvedbe prikazane na Slici 9-6 i njima slične je da na kraju cijevi treba pogodnom konstrukcijom osigurati prsten za oslonac pretorne matici preko kojega se vrši pritezanje spoja.

Gornji dio slike 9.2-4a prikazuje izvedbu sa koničnim umetkom zalemljenim na drugi kraj cijevi. Konični umetak se izrađuje od bakra za bakrene cijevi, a od mekog čelika za čelične cijevi. Lemljenje koničnog umetka na cijev zahtijeva zagrijavanje materijala cijevi, a to može nepovoljno djelovati na njegovu strukturu. Ako su takve cijevi izložene udarnim opterećenjima uslijed naglog porasta tlaka u njima, dolazi do loma stijenke cijevi nedaleko od završetka koničnog umetka nakon relativno kratkog vremena pogona. Opisano pucanje stijenke cijevi pojavljuje se, na primjer, kod visokotlačnih cijevi goriva pumpe goriva i ventila za gorivo kod dizelskih motora. Ova neugodna pojava može se otkloniti oblikovanjem konusa na kraju cijevi, prema daljnjem dijelu Slike 9-6a. Kraj cijevi se postepeno sabija (kuje) u užarenom stanju. Nakon kovanja se taj dio cijevi mora normalizirati, a zatim se konačni oblik konusa dobije na tokarskom stroju.



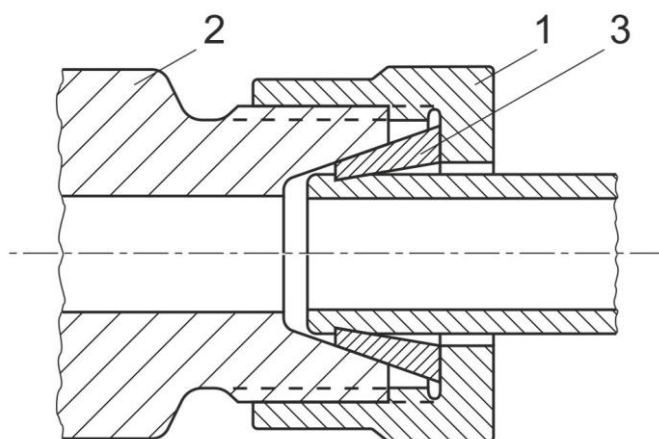
Slika 9-6 Spojevi sa pretornom

U principu isti način pričvršćivanja umetka na kraj cijevi, ali sa ravnom brtvenom površinom, prikazan je na gornjem dijelu Slike 9-6b. Kod ove izvedbe holender spojeva nepropusnog spoja

je osigurana primjenom posebne brtve od mekanog materijala. Stoga se ne zahtjeva velika preciznost obrade brtvene površine, a također nije potrebno posvetiti posebnu pažnju tvrdoći materijala dijelova sa brtvenom površinom. Umetci sa konusnom ili ravnom brtvenom površinom kod čeličnih cijevi se mogu i stično zavariti na stijenku cijevi, prema donjem dijelu Slike 9-6b. No, i u tom slučaju postoji problem zaostalih napreznja uslijed lokalnog zagrijavanja, kao i kod lemljenja.

Pojava pucanja cijevi kao posljedica lemljenja ili zavarivanja, odnosno skupa izrada oslonca za preturinu maticu kovanjem i tokarenjem, izbjegnute su kod izvedbe spoja sa zasječenim prstenom, prikazanog na Slici 9-7. Ovdje zasječeni prsten (3) kod pritezanja preturine matice (1) na spojni narezni dio (2) ulazi u konus spojnog nareznog djela, a ovaj ga prisili da se svojim krajem usiječe u stijenku cijevi po cijelom opsegu na vanjskom promjeru. Tako je dobiven čvrst i nepropustan spoj, koji se može otpuštati po volji, a da nije narušena njegova sigurnost.

Upotreba spojeva sa preturinom maticom vrlo je česta kod brodskih cjevovoda, ali uz ograničenje primjene do unutarnjeg promjera 32 mm. Ovi spojevi se najviše koriste kod cjevovoda hidraulike i komprimiranog zraka svih tlakova.



Slika 9-7 Spoj sa zasječenim prstenom

Kod svakog od do sada razmotrenih rastavljivih spojeva postoje veća ili manja ograničenja za njegovu primjenu. Međutim, za korištenje rastavljivog spoja ostvarenog pomoću prirubnica nema ograničenja sa stanovišta mogućnosti njegove upotrebe. Iz toga slijedi zaključak, da je najveći broj rastavljivih spojeva kod brodskih cjevovoda izveden pomoću prirubnica. Osnovni nedostaci prirubničkog spoja su, da od svih rastavljivih spojeva daje najveće dodatne težine, te da zahtjeva veći prostor za smještaj i rukovanje kod montaže. Zbog toga neograničenost upotrebe, kao velika prednost prirubničkog spoja, gubi na svom značaju malih promjera cjevovoda.

U nacionalnim standardima moguće je naći veliki broj različitih izvedbi prirubnica standardiziranih prema nazivnom tlaku i nazivnom unutarnjem promjeru cijevi. Sve te varijante

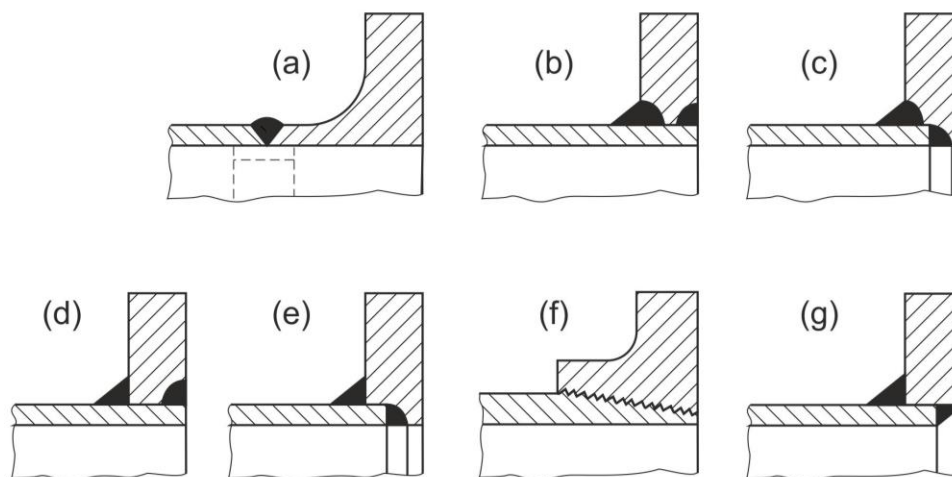
mogu se svrstati u dvije osnovne grupe, i to: sa prirubnicom čvrsto pričvršćenom na cijevi i sa slobodnom prirubnicom.

Čvrsto pričvršćenje prirubnice na cijev izvodi se sa koničnim narezom, uvaljivanjem, zakivanjem, lemljenjem i zavarivanjem. Brtvena površina prirubnice može biti jednako cijeloj dodirnoj površini prirubnice ili smanjena na izbočeni dio manjeg promjera. Ako je čitava dodirna površina prirubnice ujedno i brtvena, moment savijanja ne postoji na prirubnici kod pritezanja prirubničkog spoja. No, ako brtvene površine prirubnice u spoju nisu paralelne, za postizanje nepropusnosti spoja biti će potrebno jače pritezanje kod montaže, a brtveni materijal će biti potpuno nepotrebno najjače pritegnut na dijelu vanjskog oboda prirubnice. Sa gledišta postizanja nepropusnosti prirubničkog spoja, povoljnije su prirubnice sa izbočenim brtvenim dijelom manjeg promjera, ali zato su napregnute sa dodatnim momentom savijanja, koji može uzrokovati plastičnu deformaciju prirubnice.

Kod prirubničkih spojeva sa slobodnom prirubnicom oslonac za prirubnicu postiže se prirubljivanjem kraja cijevi, zbijanjem kraja cijevi za dobivanje odebljanog ruba ili privarivanjem prstena na kraj cijevi. Brtvena površina kod spoja sa slobodnim prirubnicama je površina ojačanog kraja cijevi. Prema tome kod ovih spojeva je opterećenje prirubnice i postizavanje nepropusnosti spoja slično kao kod čvrstih prirubnica sa izbočenom brtvenom površinom manjeg promjera. Slobodne prirubnice se mogu zakretati u odnosu na cijev, pa je time pojednostavljena montaža spoja. Jedino prsten na kraju cijevi mora biti izrađen od istog materijala kao i cijev, dok slobodna prirubnica može uvijek biti izrađena od ugljičnog čelika. Tako se može postići veća ekonomičnost kod cijevi izrađenih od obojenih legura i legiranih čelika. No, nedostatak takvog spoja je da mu je izvedbena duljina uzduž cijevi znatno veća nego kod čvrstih prirubnica.

Složenost opterećenja prirubnica zahtjeva da budu izrađene od žilavih materijala. Za čelične cijevi izrađuju se od lijevanog, kovanog ili valjanog čelika, a za bakrene od bronce. Prirubnice se danas većinom zavaruju na cijev, pa materijal prirubnice mora biti zavarljiv. To znači da kod čelika sadržaj ugljika i mangana mora zadovoljiti izraz $C+1/6Mn \leq 0,4 \%$, s time da sadržaj ugljika ne smije biti veći od 0,25%.

Klasifikacijska društva u svojim pravilima propisuju da se kod brodskih cjevovoda smiju primjenjivati prirubnički spojevi sa čvrstim prirubnicama samo u izvedbama prema Slici 9-8. Oblik prirubnica (a) do (c) može se koristiti za sve vrste medija, te za sve radne tlakove i temperature. Kod oblika (a), tj kod stičnog zavora, potrebno je postaviti prsten radi dobrog provarivanja korijena (na slici prikazan crtkano). Nakon završenog zavarivanja prsten se mora odstraniti. Ostali oblici prirubnica (d) do (g) imaju ograničenja za primjenu ovisno o vrsti medija, te o visini radnog tlaka i temperatura, prema tablici 8.2-1. Prirubnice oblika (c) i (e) nisu prikladne za upotrebu kod cijevi promjera manjeg od 75mm zbog slabe pristupačnosti elektrode zavaru na unutarnjem promjeru. Kod prirubnice oblika (f) narez mora biti koničan. Na jednom ili oba kraja nareza može se izvesti brtveni zavar nakon montaže prirubnice. Utori za zavare kod svih izvedbi, kao i dimenzija zavora, precizno su propisani u pravilima klasifikacijskog društva ovisno o debljini stijenke cijevi.

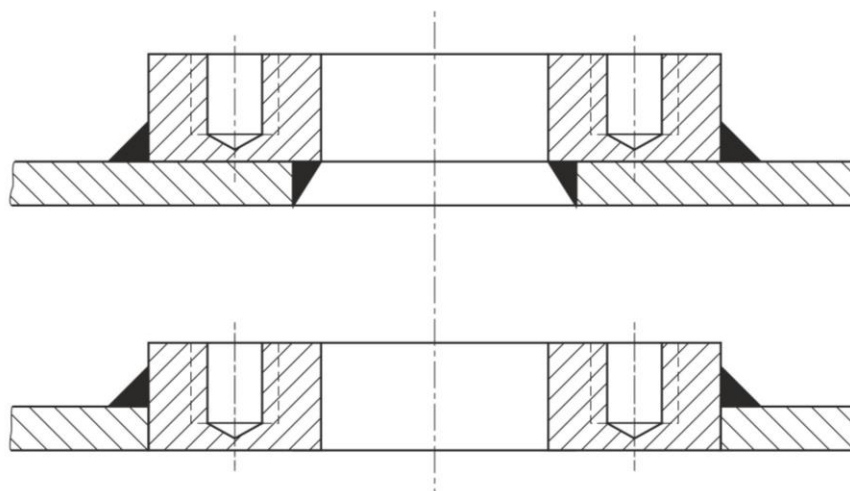


Slika 9-8 Izvedbe prirubničkih spojeva sa čvrstim prirubnicama

Razmotrene izvedbe spojeva upotrebljavaju se na trasi za međusobno spajanje elemenata brodskog cjevovoda, za spajanje cjevovoda sa ugrađenom armaturom i većim dijelom za spajanje cjevovoda sa strojevima, uređajima i opremom. Izloženi načini spajanja mogu se smatrati istovjetnim sa spojevima koji se koriste kod stacionarnih pogona.

Potrebno je još upoznati se sa izvedbama spojeva koji se pojavljuju i specifični su samo kod brodskih cjevovoda. U prvom redu treba razmotriti način spajanja brodskih cjevovoda na strukturne i ugrađene tankove, te na oplatu broda.

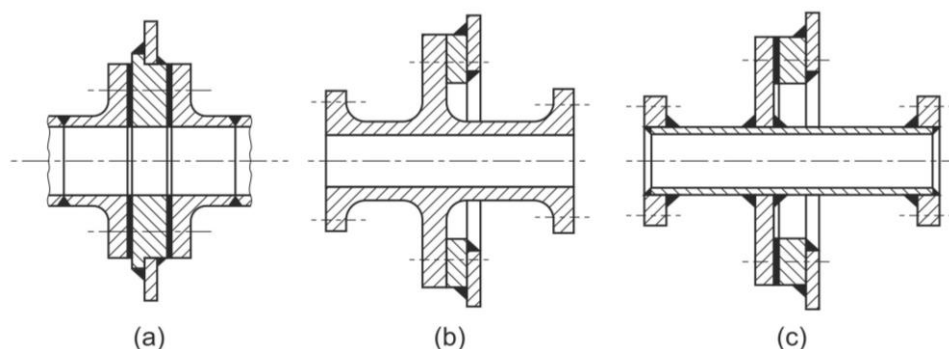
Za spajanje cjevovoda na strukturu i ugrađene tankove koriste se uglavnom prirubnički spojevi, a samo u pojedinim manje važnim slučajevima mogu biti narezni holender spojevi. Izvedba prirubnice na stijenci tanka može biti za navarivanje ili za uvarivanje, prema Slici 9-9. U pravilu, na ove izvedbe prirubnica izrađuju se slijepo narezni provrti za usadne vijke. Kod prirubnice za navarivanje ovi provrti bi se mogli jednostavnije i lakše izraditi kroz čitave debljinu prirubnice, ali u tom slučaju postoji opasnost da vijci odignu prirubnicu od stijenke tanka. Kod prirubnice za uvarivanje mogu nastati poteškoće kod zavarivanja, zbog pojave pukotina u zavaru u fazi njegovog hlađenja. Prirubnice zavarene na stijenu tanka sastavni su dio čvrstoće ove stijenke. Sa prirubnicom mora biti riješena kompenzacija za smanjenu čvrstoću stijenke tanka uslijed postojanja otvora. Zbog toga se dimenzije ovih prirubnica uzimaju iz standarda za NP10, iako je osjetno manji radi tlak u tanku. U pravilu, na prirubnicu prema slici 9.2-7 montira se zaporni organ (armatura), a tek na njega cijev. Na taj način je omogućena demontaža cijevi radi popravka i u slučaju kada je tank pun.



Slika 9-9 Izvedbe prirubnica na stijenci tanka

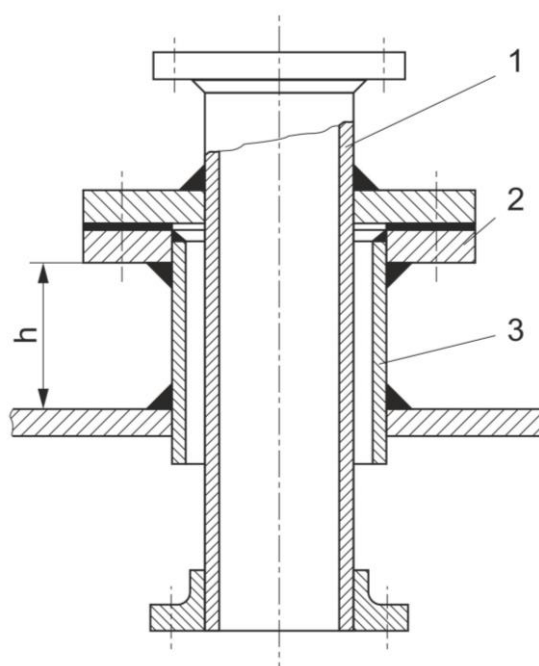
Za spajanje cjevovoda na oplatu borda koriste se isključivo prirubnički spojevi. Izvedba prirubnica na oplati istovjetna je onima na stijenci tanka, prema Slici 9-9. Razlika je, da se dimenzije oplatnih prirubnica iz standarda uzimaju za NP26 zbog povećane opasnosti za sigurnost broda. Na oplati broda većinom se upotrebljavaju prirubnice za navarivanje, a zavaruju se sa unutarnje strane. Na prirubnicu svakog otvora na oplati broda izravno mora biti ugrađen zaporni organ sa posebnim nazivom oplatna armatura. Za razliku od armature standardne izvedbe, oplatna armatura ima ojačanu konstruktivnu izvedbu strane koja se pričvršćuje na oplatnu prirubnicu, jer se i ona smatra sastavnim dijelom čvrstoće trupa broda.

Daljnja specifičnost pojavljuje se na mjestima gdje pojedini sustavi brodskih cjevovoda moraju prolaziti kroz nepropusne pregrade. Prolaženje bilo koje cijevi kroz nepropusnu pregradu ne smije ni u kojem slučaju narušiti njezinu nepropusnost. Radi toga se za prolaz cjevovoda kroz nepropusnu pregradu uvijek mora predvidjeti jedna od konstruktivnih izvedbi prikazanih na slici 9.2-8. Kod izvedbe (2) prirubnice cijevi ili armature pritežu se na pregradnu uvijek mora predvidjeti jedna od konstruktivnih izvedbi prikazanih na Slici 9-10. Kod izvedbe (a) prirubnice cijevi ili armature pritežu se na pregradnu prirubnicu pomoću usadnih vijaka, jer klasifikacijska društva ne dozvoljavaju prolaz vijaka kroz pregradnu prirubnicu kod bilo koje izvedbe. Narezni provrti za usadne vijke sa jedne i sa druge strane pregradne prirubnice međusobno su pomaknuti za pola razmaka na kružnici simetrala provrta. Izvedbe (b) i (c) su specijalni pregradni prolazi za cjevovod u lijevanoj odnosno u zavarenoj izvedbi. Na slici su prikazane karakteristične izvedbe nepropusnih pregradnih prolaza. U praksi postoji još niz različitih varijanti sa kojima se postiže ili rezanje manjeg otvora na pregradi, ili spajanje sa cjevovodom pomoću holender spoja, ili postavljanje izolacije sa jedne odnosno obje strane pregrade i tome slično.



Slika 9-10 Izvedbe prirubnica za prolaz cjevovoda kroz nepropusnu pregradu

Izvedbe prikazane na Slici 9-10 (b) i (c) i opisani principi primjenjuju se i kod sustava cjevovoda za prolaz kroz palubu. Kod palubnog prolaza je dodatna mogućnost, da se voda sa palube. Kod palubnog prolaza je dodatna mogućnost, da se voda sa palube slijeva u donje prostorije kod demontaže palubnog prolaza. Da se to ne bi dogodilo palubni prolaz (1) pričvršćuje se na prirubnicu (2) odignutu od palube za upotrebnu visinu h posredstvom druge cijevi (3), prema Slici 9-11. Cijev (3) ne mora imati znatno veći promjer od cijevi palubnog prolaza, ako se na primjer donja prirubnica pričvrsti na cijev pomoću nareza.



Slika 9-11 Odignuta prirubnica

Prilikom projektiranja pregradnih i palubnih prolaza mora se predvidjeti dovoljan odgovarajući prostor za nesmetano rukovanje ključevima kod montaže i demontaže prirubničkog spoja na cijevi. To je naročito važno, ako se na pregradu postavlja izolacija. Palubni i pregradni prolazi izrađuju se od čelika, ako je zavarena izvedba, odnosno od lijevanog čelika, ako je lijevana

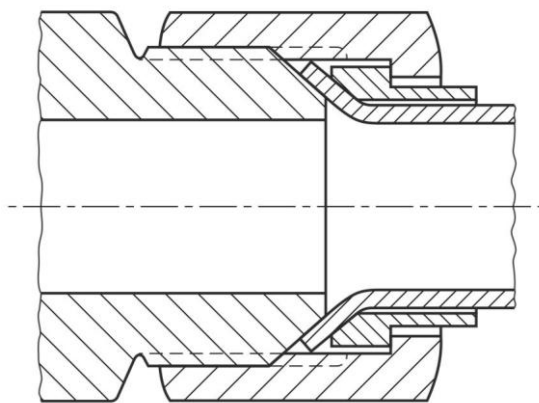
izvedba, za potrebe ugradnje u brodove čiji je trup od čelika. Za ugradnju u drvene brodove, mogu se raditi i od drugih žilavih materijala otpornih na koroziju.

9.3 Brtve

Kod prirubničkih spojeva dodirne brtvene površine prirubnica ne mogu se obraditi primjenom normalnih postupaka obrade (tokarenje, glodanje) tako da budu potpuno glatke. Nadalje, prilikom izrade i montaže elemenata cjevovoda vrlo teško je postići potpunu paralelnost prirubnica. U toku eksploatacije također može doći do malih lokalnih krivljenja prirubnice uslijed čega će se pojaviti njihova neparalelnost na spoju. Zbog navedenih uzoraka na svakom rastavljivom spoju brodskog cjevovoda doći će do propuštanja, ako se ne poduzmu posebne mjere da se to spriječi. Propuštanje transportiranog medija u okolni ambijent ili obrnuto ovisi o visini tlaka u i izvan cijevi. Kod narezanih spojeva propuštanje se pojavljuje zbog postojanja spiralno neprekinute zračnosti na vrhu zuba jednog i korijenu zuba drugog nareza. Osim spomenutih nepokretnih spojeva, postoje i spojevi gdje se jedna brtvena površina stalno ili povremeno giba u odnosu na drugu. Na takvim mjestima također se moraju poduzeti posebne mjere radi sprječavanja propuštanja.

Nepropusnost prirubničkog spoja moguće je ostvariti ako se završnom ručnom obradom (tuširanjem) postigne potpuno nalijeganje brtvenih površina. No, taj postupak je veoma skup, pa se primjenjuje samo za posebno važne slučajeve kod parovoda sa visokim radnim parametrima. Spoj sa ručno obrađenim brtvenim površinama je najkvalitetniji i najsigurniji, ali kod montaže zahtijeva premazivanje brtvenih površina sa specijalnom grafitnom pastom i jednako pritezanje svih spojnih vijaka.

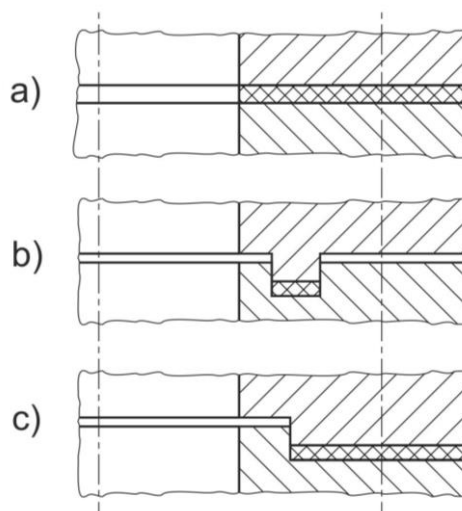
Drugi primjer postizanja nepropusnosti tlakom metala na metal bez ulaganja dodatnog materijala prakticira se kod holender spojeva prema Slikama 9-6a i 9-12. Ovdje se hermetičnost spoja postiže pritezanjem konusa na konus. Obrada brtvenih konusnih površina ne mora biti tako fina kao kod prirubničkog spoja, ali jedan konus treba biti izrađen od mekšeg materijala u odnosu na drugi. Standardnom obradom je dosta teško postići potpunu jednakost vršnih kutova oba konusa, pa se ovaj spoj često izvodi tako da je vanjska brtvena površina konusnog umetka (Slika 9-6a) obrađena kuglasto. Ako je vršni kut konusa manji, veća je sila pritezanja konusnih površina.



Slika 9-12 Postizanje nepropusnosti pritiskom metala na metal

Kod svih drugih izvedbi rastavljivih spojeva na cjevovodima i njihovoj opremi, a tih je najviše, nepropusnost spoja postiže se umetanjem mekšeg brtvenog materijala. Kod pritezanja spoja brtveni materijal se svojim elastoplastičnim deformiranjem prilagođava neravninama brtvenih površina i postojećim neparalelnostima. Pri tome treba strogo razlikovati nepokretne i pokretne rastavljive spojeve, obzirom da je bitno različit način brtvljenja sa upotrebom dodatnog mekšeg materijala.

U grupu nepokretnih rastavljivih spojeva treba svrstati sve prirubničke, holender i narezne spojeve elemenata spojeva međusobno, elemenata cjevovoda sa armaturom i elemenata cjevovoda ili armature s ugrađenim uređajima, strojevima i opremom. Kod upotrebe nemetalnih mekanih brtvenih materijala za prirubničke spojeve, postoji mogućnost da unutarnji tlak izbaci brtvu nedovoljno pritegnutu između brtvenih površina, kod izvedbe spoja prema Slici 9-13a. Ova mogućnost može se otkloniti, ako su brtvene površine prirubničkog spoja izvedene sa utorom-zaštićena brtva, prema slici 9-13b ili upušteno – poluzaštićena brtva, prema Slici 9-13a brtva neće biti izbačena, ako je primijenjena sila pritezanja 3 do 4 puta veća od sile kojom tlak medija djeluje na brtvu. Za sprječavanje djelomičnog kidanja ili deformiranja nemetalnih mekanih brtava uslijed djelovanja unutarnjeg tlaka, koriste se i metode njihovog armiranja ili oblaganja metalnim folijama. Oblaganje metalnom folijom ujedno omogućuje višekratnu upotrebu jedne brtve i nakon nekoliko rastavljanja i sastavljanja takvog spoja.



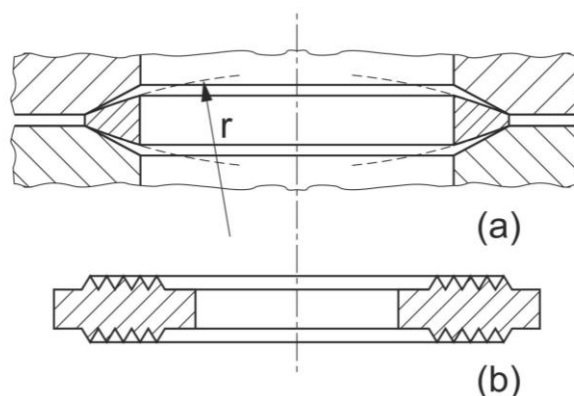
Slika 9-13 Uporaba nemetalnih materijala za prirubničke spojeve

Kod nepokretnih prirubničkih spojeva koriste se nemetalne kompozitne i metalne brtve. Za izradu nemetalnih brtava upotrebljavaju se:

- a.- crtači papir, paus papir, karton, presšpan i koža za radni temperature do 90 °C i radni tlak do 1,5 MPa
- b.- tehnička guma u pločama i gumena traka okruglog ili pravokutnog poprečnog presjeka za radne temperature od -40 do 100 °C i radni tlak do 2 MPa
- c.- tekstolit za radne temperature do 150 °C i radni tlak do 6 MPa
- d.- IT materijal (gumirani azbest) za radne temperature do 250°C i radni tlak do 4 MPa
- e.- azbestni karton, azbestna tkanina i azbestna pletenica za radne temperature do 400 °C i radni tlak do 1 MPa
- f.- armirano azbestno platno za radne temperature do 450 °C i radni tlak do 3 MPa
- g.- parolit za radne temperature do 450 °C i radni tlak do 7 MPa
- h.- polivinil i polibutilen za radne temperature od -40 ° do +60 °C i radni tlak do 1,5 MPa.

Veliku primjenu za brtvljenje nepokretnih prirubničkih i holender spojeva imaju prsteni okruglog poprečnog presjeka od tehničke gume, koji veoma efikasno brtve i kod malih sila pritezanja.

Kod većih parametara transportiranog medija koriste se metalne brtve. Najčešće upotrebljavani oblici metalnih brtava prikazani su na Slici 9-14a u obliku leće, te na slici 9-14b- nazubljene.

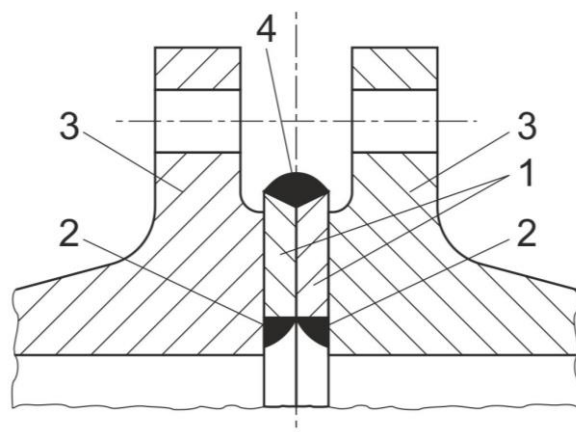


Slika 9-14 Oblici metalnih brtvi

Kod montaže metalnih brtava u prirubničkom spoju prakticira se premazivanje brtvenih površina specijalnom grafitnom pastom radi poboljšavanja nepropusnosti tog spoja. Za izradu metalnih brtava upotrebljavaju se:

- a.- olovo za radne temperature do 150 °C i radni tlak do 6 MPa
- b.- aluminij za radne temperature do 350 °C i radni tlak do 6 MPa
- c.- nikal za radne temperature do 500 °C i radni tlak do 8 MPa
- d.- monel-metal za radne temperature do 450 °C i radni tlak do 10 MPa
- e.- bakar za radne temperature do 300 °C i radni tlak do 20 MPa
- f.- razne vrste mekog ugljičnog i legiranog čelika za radne temperature do 600 °C i radni tlak do 20 MPa

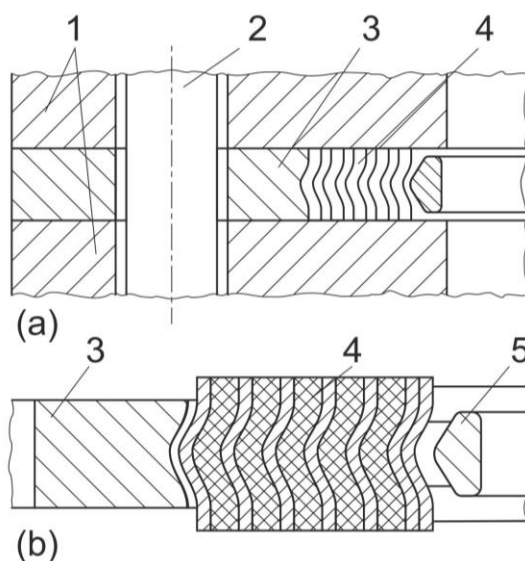
Za brtvljenje nepokretnog prirubničkog spoja kod visokih radnih temperatura i tlakova koristi se tako zvana membranska brtva prikazana na Slici 9-15. Po jedna tanka ploča (1) privarena je varom (2) na unutarnju stranu prirubnica (3), a zatim su obje ploče međusobno zavarene sa varom (4). Ovime je postignuta nepropusnost. Čvrstoća spoja osigurana je pritezanjem na vijcima. Kako nije potrebno pritezanjem vijaka postići i nepropusnost spoja, to je ovdje potrebna mnogo manja sila za pritezanje pomoću vijaka. Prilikom rastavljanja ovog spoja treba odsjeći zavar (4) nakon otpuštanja spojnih vijaka. Zbog zavarivanja je povećana opasnost od pojave korozije, pa se ploče (1) izrađuju od nehrđajućeg čelika.



Slika 9-15 Membranska brtva

Kompozitne i armirane brtve mogu se smatrati prijelazom između nemetalnih i metalnih brtava. Pojačavanjem nemetalnih brtava sa metalnim dodacima, ovdje je postignuto povećanje čvrstoće ili višekratnost uporabe, a da su istovremeno prisutna dobra svojstva podatljivosti. Za njihovu izradu koriste se tanki limovi od olova, aluminija, nikla, monel-metal, bakra, te ugljičnog ili legiranog čelika, a za ispunu azbestni papir, karton ili pletenica, odnosno parolit.

Posebno je interesantna spiralno namotana kompozitna kruto-elastična brtva prikazana na Slici 9-16. Kod nje se unutar krutog dijela brtve formiranog od nemetalnih prstena (3) i (5) nalazi elastični dio brtve formiran od spiralno namotanih profiliranih traka od mekog čelika debljine 0,25 mm sa ispunom od traka parolita debljina 0,3 do 0,5 mm ili azbestnog papira debljine 0,3 do 0,3mm. Elastični spiralni kompozitni namot (4) ima nešto veću debljinu od metalnih prstena (3) i (5), pa je u prirubničkom spoju prvo pritegnut kompozitni dio brtve, a zatim prirubnice nalegnu na prsten (3). Ova izvedba kompozitne brtve koristi se za radne temperature do 500 °C i radni tlak do 8 MPa.



Slika 9-16 Spiralno namotana kompozitna kruto-elastična brtva

Za brtvljenje nepokretnih narezanih spojeva najčešće se upotrebljava konopljena kudelja natopljena uljenom ili smolastom tekućinom (npr cikovo bjelilo) i to kod cjevovoda tople i hladne vode, sanitarnog cjevovoda, te cjevovoda hidrauličke. Kod plinovitih medija i viših radnih temperatura za ove spojeve se koriste metalne folije od kositra ili olova.

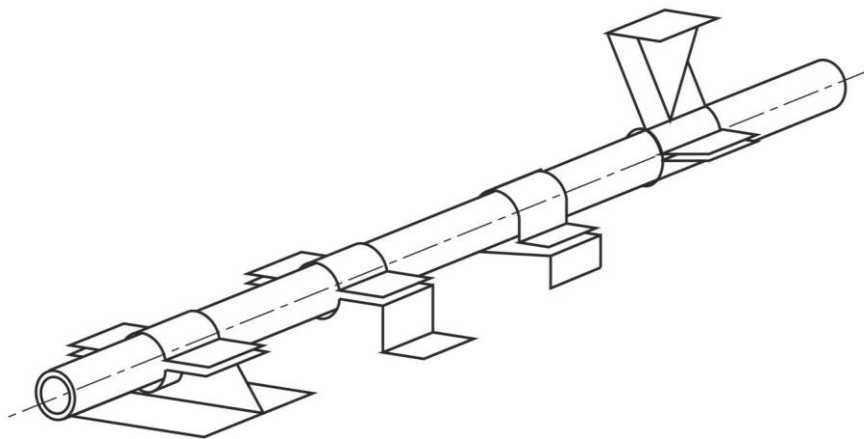
Klasičan primjer potrebe brtvljenja pokretnog spoja je izlaz vretena iz kućišta ventila, dobro poznat iz Elemenata strojeva. Za postizanje hermetičnosti spoja ovdje se koristi posebno konstruiran oblik brtvenice. Osim spomenutog primjera prisutnog kod armature, kod brodskih cjevovoda je potreba za brtvljenjem pokretnog spoja i kod kompenzacijskih brtvenica, te pregradnih prolaza. Za postizanje hermetičnosti pokretnog spoja najčešće se koriste prsteni okruglog poprečnog presjeka od tehničke gume, gdje god to dozvoljava radna temperatura i tlak. U naročito konstruiranoj brtvenici upotrebljavaju se koža, gumeni prsteni kvadratnog presjeka, gumene i kožne manžete, a za veće radne temperature grafitirana azbestna pletenica. Hermetičnost pokretnog spoja može se ostvariti i primjenom kožnatih, gumenih ili metalnih plosnatih membrana, odnosno metalnih membrana u obliku mijeha. Metalne plosnate membrane, odnosno membrane u obliku mijeha redovito imaju malu debljinu stijenke, pa je kod njih povećana opasnost od propadanja uslijed korozije. Zbog toga se za njihovu izradu moraju koristiti materijali otporni na koroziju.

9.4 Oslonci i ovjesi

Mjesta pričvršćenja cjevovoda ugrađenih unutar jedno nepropusnog prostora broda su na priključcima strojeva, uređaja ili ugrađene opreme, odnosno na prolazima kroz nepropusne pregrade ili palube. U većini slučajeva ovi priključci ne omogućavaju da horizontalno položeni cjevovodi budu oslonjeni tako da duljine slobodnog raspona cjevovoda budu dovoljno malene. Međutim, veličina naprezanja u materijalu stijenke cijevi i njezine deformacije uslijed statičkih opterećenja (vlastita težina, težina medija i izolacije itd.) diktiraju da ta duljina ne bude prevelika. Naprezanjima od statičkih opterećenja superponiraju se i naprezanja koja su posljedica poprečnih vibracija cijevi. Za cjevovod je naročito opasan moment, ako bi došlo do pojave rezonance poprečnih vibracija cijevi, kada amplituda titranja postaju vrlo velike. Pojava rezonance se može onemogućiti povećanjem vlastite frekvencije poprečnog titranja cijevi, tj. sa povećanjem njezine krutosti. Kod brodskih cjevovoda se taj efekt najjednostavnije postiže smanjenjem duljine slobodnog raspona cjevovoda.

Dakle, i kod statičkih i kod dinamičkih poprečnih opterećenja cjevovoda često je nužno skraćivanje slobodnog raspona, a to se postiže ugradnjom potrebnog broja oslonaca i ovjesa. Pomoću oslonaca i ovjesa, izvedenih u obliku dvodijelne obujmice (brage) prema Slici 9-17, cjevovod se pričvršćuje za konstruktivne elemente trupa broda (rebra, rebrenice, sponje i uzdužnjake palube, ukrepe pregrade, oplatu strukturnih tankova itd.). Izvedba obujmice za pričvršćenje cjevovoda na trup broda mora spriječiti poprečno pomicanje cijevi. Uzdužno pomicanje mora biti potpuno slobodno za toplinska i druga produljenja cjevovoda. Raspored i količina oslonaca i ovjesa ovisi o vlastitoj krutosti i o postizavanju željene krutosti svakog

pojednog cjevovoda. U pravilu, oslonce i ovjese treba uvijek postavljati u blizini montirane armature ili druge opreme ugrađene u cjevovod. Prilikom montaže se prakticira, da se između obujmice i vanjskog promjera cijevi postavi umetak od gume, olova ili parolita debljine 1 do 3 mm. Širina umetka mora biti veća za 5 do 10 mm od širine obujmice.



Slika 9-17 Oslonci i ovjesi u obliku obujmica

Na Slici 9-17 prikazani su tako zvani kruti oslonci i ovjesi. Oni su prikladni za većinu cjevovoda na brodu, a naročito za one koji nemaju veću razliku temperature u odnosu na trup broda. Kod zagrijanog cjevovoda (parovoda), kao i kod cjevovoda direktno priključenih na elastično fundirane mehanizme, izvedba oslonaca i ovjesa mora omogućiti, da se preuzeta težina dijela cjevovoda prenosi od obujmice na konstrukciju trupa broda posredstvom opruga. To su tako zvani opružni ili elastični oslonci i ovjesi. Njihovo pričvršćenje na konstruktivni element trupa broda mora biti izvedeno pomoću svornjaka i zglobova čime je omogućeno pomicanje cijevi u svim smjerovima uzrokovanim toplinskim produljenjima. Konstruktivna izvedba oslonca ili ovjesa mora omogućiti regulaciju napetosti opruga prilikom montaže cjevovoda u brod.

10. UPRAVLJANJE ARMATUROM CJEVOVODA

Zaporna armatura ugrađena u cjevovod mora prema potrebi prekinuti strujanje transportiranog medija ili ga usmjeriti u dva ili više pravaca. Tom osnovnom zadatku podešene su konstruktivne izvedbe raznih tipova armature. No bez obzira na tip grubo se može kazati, da se armatura sastoji od kućišta, zapornog organa smještenog unutar kućišta i uređaja za pokretanje zapornog organa iz zatvorenog u otvoreni položaj i obrnuto. Uređaj za pokretanje zapornog organa kraće se može nazvati pogon armature. Navedeni osnovni dijelovi armature međusobno se bitno razlikuju ovisno o tipu armature. Na primjer, zaporni organ kod klasičnog ventila bitno je različit po obliku i izvedbi od zapornog ventila kod zasuna, odnosno kod pipca. Razlike u obliku i izvedbi zapornih organa uvjetuju da im bude podešena i izvedba pogona armature.

Bilo koji sustav brodskog cjevovoda će normalno funkcionirati, ako posada prema potrebi upravlja sa pogonom njegove ugrađene armature. Upravljanje sa pogonom armature može biti lokalno i daljinsko, a određeno je zahtjevima i uvjetima rada sustava. Kod izbora načina upravljanja uzima se u obzir intenzivnost rada, mjesto ugradnje i povezanost funkcioniranja armature sa radom ugrađene opreme i uređaja. Osim toga u nizu slučajeva klasifikacijska društva u svojim pravilima postavljaju izričite zahtjeve za način upravljanja pogonom pojedine armature.

Lokalno upravljanje posada izvodi ručno i ono je konstruktivno najjednostavnije. Za lokalno ručno upravljanje pogonom brodske armature koriste se ručna kola, ručice, poluge, ključevi i patent-ključevi. Kao pojedinačni proizvodi moraju udovoljiti svim zahtjevima kojima mora udovoljavati armatura u cjelini, a osnovni zahtjevi su sljedeći:

- korozijska otpornost u uvjetima 98% relativne vlažnosti zraka i kod povremenog prskanja morskom vodom;
- otpornost na vibracije, šokove i udarce; i
- neznatna ili nikakva magnetičnost-

Polazeći od navedenih zahtjeva, za njihovu izradu najčešće se primjenjuju legure bakra, legure aluminija, sivi lijev, čelični lijev, čelik i plastične mase.

Najviše se koriste ručna kola. Ručice i poluge najčešće se primjenjuju kod zasuna. Ključevi se upotrebljavaju kod pipaca i u slučajevima paralelnog ručnog upravljanja, kada armatura ima servopogon za daljinsko upravljanje, ako kut zakretanja vretena nije veći od 70°. Patent-ključevi se koriste kod paralelnog ručnog upravljanja daljinski upravljane armature, ako je kut zakretanja veći od 70°.

Izvedbe i dimenzije ručnih kola, ručica, poluga, ključeva i patent-ključeva standardizirane su u nacionalnim standardima. No treba naglasiti, da je kod njih ograničena veličina sile za postizanje momenta zakretanja obzirom na mogućnosti čovjeka-poslužioca.

Konstruktivno rješenje armature uvijek je takvo da se zakretanjem ručnih kola, ručica itd. u smjeru kazaljke na satu vrši zatvaranje zapornog organa. Na vretenu armature izvan kućišta u neposrednoj blizini ručnog kola, ručice itd. mora biti ugrađen indikator, koji pokazuje položaj zapornog organa.

Danas postoje mogućnosti, da se daljinsko upravljanje izvodi mehaničkim, hidrauličkim i pneumatskim načinom, te pomoću elektromotora i elektromagneta. Od svih nabrojanih mogućnosti daljinskog upravljanja, treba izdvojiti mehanički način, jer se bitno razlikuje od ostalih. Daljinsko mehaničko upravljanje posada, u pravilu, izvodi ručno, pa ga je uputnije svrstati u grupu ručnih načina zajedno sa lokalnim upravljanjem. Osnovna razlika daljinskog mehaničkog upravljanja u odnosu na lokalno je da se čovjek poslužilac ne mora nalaziti u neposrednoj blizini armature radi otvaranja ili zatvaranja zapornog organa armature. Stoga je daljinsko mehaničko upravljanje pogodno u slučajevima kada je nezgodno ili nemoguće lokalno upravljanje zbog ograničenosti prostora i pristupa armaturi, te kada boravak čovjeka poslužioca, makar i na kratko vrijeme, nije dozvoljen na mjestu ugradnje armature. Klasifikacijska društva zahtijevaju daljinsko upravljanje i sa armaturom, kojoj nije moguće prići zbog požara ili prodora vode, ako se njezinim zatvaranjem ili otvaranjem smanjuje opasnost za sigurnost broda, putnika, posade i tereta. No, kod daljinskog mehaničkog upravljanja ipak se ne može ostvariti mogućnost centralnog upravljanja sa jednog mjesta za bilo koji sustav brodskog cjevovoda. Kod ostalih navedenih načina daljinskog upravljanja moguće je provesti upravljanje sustavom brodskog cjevovoda sa jednog mjesta na brodu.

Daljinsko mehaničko upravljanje u principu izvodi se na isti način kao i kod lokalnog ručnog upravljanja. Mehanička veza između vretena armature i ručnog kola ili ručice ostvarena je pomoću polužja i zglobova ili pomoću čelične užadi. Postoji realna mogućnost da otkáže mehanička veza između vretena i ručnog kola. Zbog toga, daljinski upravljana armatura u svom konstruktivnom rješenju mora imati mogućnost lokalnog upravljanja. U neposrednoj blizini ručnog kola ili ručice daljinskog mehaničkog upravljanja mora biti ugrađen indikator za pokazivanje položaja zapornog organa.

Ako su sustavi brodskih cjevovoda automatizirani, dakle kada je upotrjebljena daljinski upravljana armatura, mora biti predviđeno i paralelno ručno upravljanje sa armaturom značajnom za sigurnost broda. Primjenom paralelnog ručnog upravljanja osigurana je funkcionalnost sustava brodskog cjevovoda i u slučajevima kada daljinski upravljani pogoni armature prestanu raditi zbog otkazivanja napajanja ili iz bilo kojeg drugog razloga. Paralelno ručno upravljanje neophodno je također kod reguliranja daljinski upravljanih pogona u vrijeme ugrađivanja i ispitivanja na brodu.

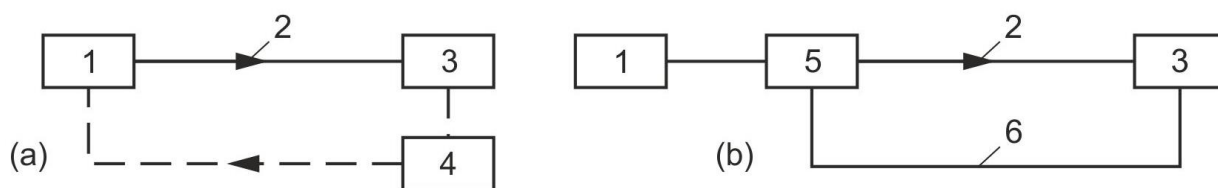
Paralelno ručno upravljanje sa daljinskim pogonom armature konstruktivno se izvodi kao stalno ugrađeno, stalno privješeno i skidivo privješeno. Čovjek-poslužilac manipulira sa uređajem za paralelno ručno upravljanje na isti način kao i kod lokalnog ručnog upravljanja posredstvom ručnih kola, ručica, poluga itd. Kod projektiranja uređaja za paralelno ručno upravljanje redovito treba uzeti u obzir ograničenje veličine sile na ručnom kolu, obzirom da se sa daljinski upravljanim servouređajima mogu postići neusporedivo veće sile potrebne za zatvaranje i otvaranje zapornog organa armature.

Stalno ugrađeni paralelni ručni pogon ukomponiran je u konstrukciju mehanizma za daljinski pogon armature. Stalno privješeni paralelni ručni pogon izvodi se kao reduktor sa pužnim prijenosom ili cilindričnim zupčanicima. Ugrađuje se na daljinski upravljani servouređaj kod armature sa

$D_u \geq 150\text{mm}$ upotrijebljene u cjevovodima sa visokim radnim tlakom transportiranog medija. Pužni reduktor, u pravilu, nije spojen na vreteno pogona armature, ako je u radi daljinski upravljani servouređaj. Za korištenje paralelnog ručnog upravljanja prethodno treba izvršiti spajanje reduktora i vretena. Reduktor sa cilindričnim zupčanicima u pravilu je stalno spojen sa vretenom pogona armature, pa ovdje nije poseban zahvat za prijelaz sa daljinskog na ručno upravljanje. Za smanjenje sile na ručnom kolu i eventualnu promjenu smjera okretanja ručnog kola koriste se dvo- i trostepeni cilindrični reduktori. Konstruktivne izvedbe ovih reduktora trebaju imati što manje gabaritne mjere i težinu. Stalno privješeno paralelno ručno upravljanje zahtjeva ugradnju reduktora na svaku armaturu, a to rezultira u priličnom povećanju težine ugrađene armature. Ovaj nedostatak uklonjen je kod primjene skidivo privješene paralelnog ručnog upravljanja, gdje se jedan reduktor može koristiti za veći broj armature. No, u tom slučaju je potrebno više vremena za prijelaz sa daljinskog na paralelno ručno upravljanje.

Ugradnjom odgovarajućeg servouređaja za pokretanje zapornog organa armature ostvarena je mogućnost korištenja ostalih načina daljinskog upravljanja. Sastavni dio servouređaja mora biti uređaj za kontrolu položaja zapornog organa, imenovan signalizator, koji daje signal u sustav daljinskog upravljanja, kada je zaporni organ u jednom od krajnjih položaja. Prema načinu djelovanja treba razlikovati pojedinačne (Slika 10-1a) i kontinuirane (Slika 10-1b) sustave daljinskog upravljanja.

Kod pojedinačnog sustava za rad servouređaja signal sa komandnog uređaja ili automatski signal drugih mehanizama osigurava daljinsku isporuku energije (pneumatske, hidraulične, električne) od izvora napajanja. Kao rezultat zaporni organ armature premješta se iz jednog u drugi krajnji položaj, kod čega mora biti osigurana neophodna nepropusnost. Izvršenje premještanja zapornog organa kontrolira i registrira signalizator. Pravilnost funkcioniranja servouređaja i sustava brodskog cjevovoda u cjelini nadzire operater na komandnom uređaju.

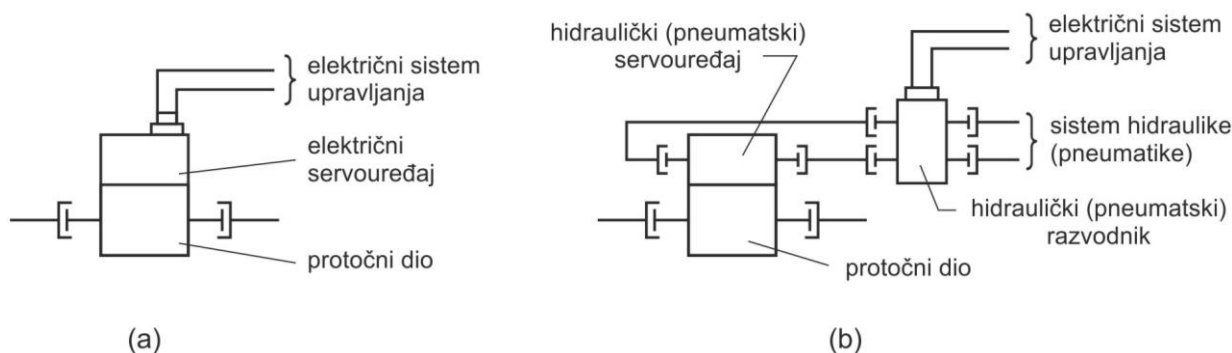


Legenda: 1- Komandni uređaj; 2- izravni signal; 3- servouređaj; 4- signalizator (davač); 5- davač isključivanja; 6- povratni signal.

Slika 10-1 Sustavi daljinskog upravljanja

Kod kontinuiranog sustava rad servouređaja reguliran je uklanjanjem napajanja energijom ili odvajanjem radnog medija servouređaja od izvora napajanja. To izravno obavlja signalizator krajnjih položaja zapornog organa. Ovdje moraju biti ispunjeni određeni zahtjevi u smislu zadržavanja povratnog signala, da bi bilo osigurano pomicanje dijelova servouređaja i zapornog organa do njihovih krajnjih položaja. Vrijeme zadržavanja povratnog signala ovisi o karakteristikama konstrukcije signalizatora.

Daljinski upravljana armatura konstruktivno može biti riješena sa električnim, elektrohidrauličkim i elektropneumatskim sustavom upravljanja, ovisno o njezinoj namjeni, mjestu ugradnje i ostalim tehničkim zahtjevima. No, bez obzira na konkretna rješenja izvedbe, sustavi upravljanja mogu se generalizirati u dvije osnovne principijelne sheme prema Slici 10-2.



Slika 10-2 Principijelne sheme sustava upravljanja

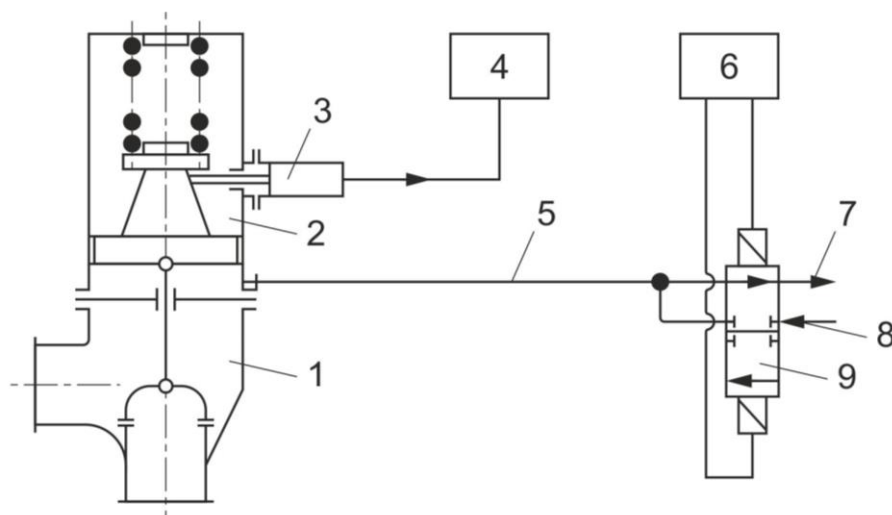
Na Slici 10-2a prikazana je principijelna shema sustava upravljanja kod armature sa ugrađenim elektroservouređajem. Za rad tog sustava potrebno je napajanje izvana sa električnom energijom. Na Slici 10-2b prikazana je principijelna shema sustava upravljanja kod armature sa ugrađenim hidrauličkim ili pneumatskim servouređajem. Za rad ovog sustava potrebno je napajanje izvana sa električnom i hidrauličkom ili pneumatskom energijom.

Konstruktivno rješenje daljinski upravljane armature, ovisno o strukturi sustava upravljanja, izvodi se na dva načina:

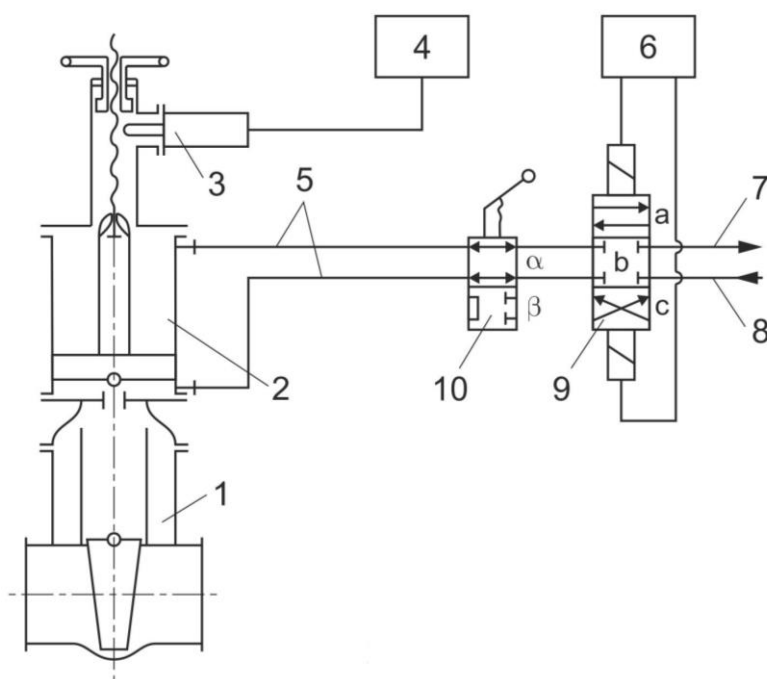
- kao blok, koji se sastoji od protočnog dijela, pogona zapornog organa, signalizatora i razvodnika, te
- kao blok, koji se sastoji od protočnog dijela, pogona zapornog organa i signalizatora, a razvodnici većeg broja armature grupirani su u odvojenu skupinu sustava.

Višestruke su mogućnosti konstruktivnih rješenja daljinski upravljane armature. Zajedničko se za svu daljinski upravljanu armaturu sa povratnim signalom, a naročito za onu koju se koristi u kontinuiranom sustavu upravljanja, da mora osigurati prognoziranje neispravnosti, istinitost dobivene informacije, trajnost i pouzdanost, te ograničenje broja propisane kontrole i remontnih radova.

Postoji niz izvedbi servouređaja za pogon zapornog organa kod daljinski upravljane armature, te njima odgovarajućih sustava upravljanja. Radi ilustracije, na Slikama 10-3 i 10-4 prikazano je funkcioniranje dvije karakteristične izvedbe hidrauličkog ili pneumatskog servouređaja.



Slika 10-3 Izvedba ventila u zatvorenom položaju sa jednoradnim opružnim servouređajem i shema upravljanja



Slika 10-4 Izvedba zasuna u zatvorenom položaju sa dvoradnim servouređajem i rješenjem za paralelno ručno upravljanje, te shema upravljanja

Slika 10-3 shematski prikazuje izvedbu ventila u zatvorenom položaju sa jednoradnim opružnim servouređajem i shema upravljanja. Elektromagnetski razvodnik (9) spojen je pomoću kabela na komandni pult (6), zatim sa tlačnim (8) i odvodnim (7) cjevovodima na brodski sustav hidraulike ili pneumatike, te sa cjevovodom (5) na servouređaj (2) ventila (1).

Za otvaranje ventila (1) operater na komandnom pultu (6) pritisne dugme „Otvaranje“. Gornji elektromagnet razvodnika (9) dobiva napon i prebacuje razvodnik u položaje gdje se tlačni

cjevovod (8) spaja sa cjevovodom (5), a odvodni cjevovod (7) je isključen. Radni medij u servouređaju (2) djeluje odozdo na površinu klipa i otvara ventil. Istovremeno kosina na gornjem dijelu klipa pomiče ticalo signalizatora (3) i premješta ga u krajnji položaj. Signalizator (3) daje signal na signalni pult (4) i na njemu se upali žaruljica „Otvoreno“. Dok je ventil otvoren prostor ispod klipa servouređaja je stalno pod tlakom radnog medija (cjevovod (5) je spojen sa tlačnim cjevovodom (8)).

Za zatvaranje ventila operater na komandnom pultu (6) pritisne dugme „Zatvaranje“. Isključuje se napon elektromagneta, dobiva ga donji, a on razvodnik (9) prebacuje u početni položaj. Cjevovod (5) se spaja sa odvodnim cjevovodom (7) , a tlačni cjevovod (8) je isključen. Opruga servouređaja istiskuje radni medij ispod klipa i zatvara ventil. Kosina na gornjem dijelu klipa pomiče ticalo (3) u suprotnom smjeru i žaruljica „Otvoreno“ se gasi. Kada se ventil (1) zatvori, ticalo signalizatora (3) dođe u drugi krajnji položaj i pali žaruljicu „Zatvoreno“ na signalnom pultu (4).

Armatura sa jednoradnim servouređajem sa oprugom može se koristiti samo kod pojedinačnih sustava daljinskog upravljanja.

Na slici 10-4 shematski je prikazana izvedba zasuna u zatvorenom položaju sa dvoradnim servouređajem i rješenjem za paralelno ručno upravljanje, te shema upravljanja. Elektromagnetski razvodnik (9) spojen je pomoću kabela na komandni pult (6), zatim sa tlačnim (8) i odvodnim (7) cjevovodima na brodski sustav hidraulike. Ako je razvodnik (9) u neutralnom položaju, a servouređaj u bilo kojem od krajnjih položaja, može doći do nedozvoljenog povećanja tlaka u cilindrima servouređaja (2) i u cjevovodima (5) uslijed promjene temperature. Zbog toga moraju biti predviđeni sigurnosni ventili sa preljevom između cilindara i u sustav odvoda (7).

Za otvaranje zasuna (1) operater na komandnom pultu (6) pritisne dugme „Otvaranje“. Donji elektromagnet razvodnika (9) dobiva napon i prebacuje razvodnik u položaj „a“ , gdje se tlačni cjevovod (8) spaja sa cjevovodom (5) na donji prostor cilindra servouređaja (2), a odvodni (7) posredstvom cjevovoda (5) na gornji prostor cilindra. Radni medij djeluje odozdo na klip servouređaja i otvara zasun (1). Klip servouređaja sa zapornim organom zasuna se podigne u krajnji gornji položaj. Tada konus na gornjem dijelu klipa pomakne ticalo signalizatora (3), koji daje signal na signalni pult (4) i žaruljica „Otvoreno“ se upali. Nakon toga operater tlakom na posebno dugme prebacuje razvodnik u neutralni položaj „b“. Veza između cjevovoda (5) i tlačnog (8) odnosno odvodnog (7) vanjskog cjevovoda je prekinuta. Oba prostora cilindra servouređaja nisu spojena na vanjski cjevovod i međusobno su razdvojeni , a zaporni organ zasuna ostaje u otvorenom položaju.

Za zatvaranje zasuna operater na komandnom pultu (6) pritisne dugme „Zatvaranje“. Isključuje se napon donjem elektromagnetu, dobiva ga gornji, te on premješta razvodnik u položaj „c“. Ovdje se gornji prostor cilindra servouređaja spaja sa tlačnim (8), a donji sa odvodnim cjevovodom (7). Daljnji rad servouređaja odvija se analogno kao kod otvaranja. Čim se zaporni organ počne zatvarati, ugasi se žaruljica „Otvoreno“ na signalnom pultu (4).

Sustav daljinskog upravljanja može otkazati iz bilo kojeg razloga. Za taj slučaj je u cjevovode (5) ugrađen rasteretni pipac (10), da bi se omogućilo ručno upravljanje sa zasunom. Rasteretni

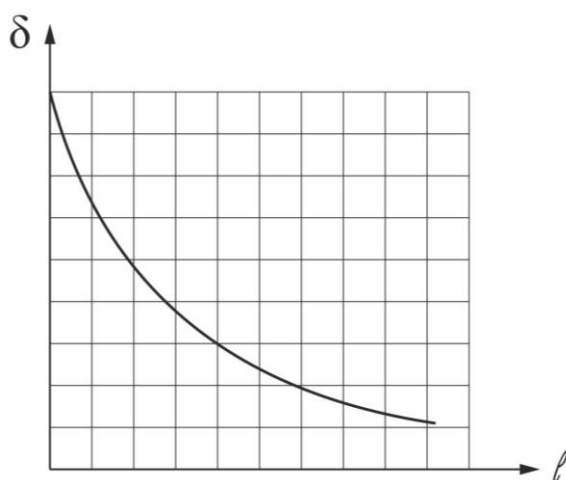
pipac (10) u položaju β odvaja razvodnik (9) od cjevovoda (5) i te cijevi međusobno spaja (gornji prostor cilindra se spaja sa donjim). Kod rada sa ručnim upravljanjem, klip servouređaja prebacuje radni medij iz jednog u drugi prostor cilindra. Ponovno daljinsko upravljanje bit će omogućeno, ako se rasteretni pipac (10) prebaci u položaj .

Armatura sa dvoradnim servouređajem upotrebljiva je kod pojedinačnih i kontinuiranih sustava daljinskog upravljanja.

Svaka armatura (ventil, zasun, pipac itd.) ima najmanje dva krajnja položaja- otvoreni i zatvoreni. Osiguranje signalizacije za oba položaja kod daljinskog upravljanja uzrokuje povećanje gabarita, težine i složenosti konstrukcije armature u cjelini, a također i krugova signalizacije. Zbog toga se gradi potreban opseg signalizacije , jer konačno nije nužno postojanje signala za opa položaja zapornog organa baš kod svake armature. Prema važnosti i smještaju armature unutar pojedinih cjevovoda i broskog trupa, opseg signalizacije treba biti sljedeći:

- za oplatno armaturu- u položaju zapornog organa kada je otvoren i hermetički zatvoren
- za prolaznu armaturu unutarnjih cjevovoda- o otvorenom i zatvorenom položaju zapornog organa;
- za distributivnu (razdiobnu) armaturu – o jednom od krajnjih položaja zapornog organa (otvoreno ili zatvoreno). Ovdje se kao izvor informacije može koristiti i stvarni dovod napajanja na elektromagnetski razvodnik.

Dijagram na slici 10-5 izrađen je na osnovi statističkih podataka iz eksploatacije. On pokazuje da je najveća učestalost otkazivanja δ daljinski upravljane armature u samom početku pomaka zapornog organa, tj. kod njegovog pokretanja. Kod daljeg pomicanja zapornog organa učestalost δ je znatno manja. Zbog toga je kod prolazne armature dovoljna signalizacija samo o otvorenom položaju zapornog organa. Nadalje, ovdje se može koristiti isti kanal za režime davanja i skidanja signala. Korištenje signalizacije samo o zatvorenom položaju naročito je provedivo kod armature malih nosivih otvora $D_u \leq 32\text{mm}$.



Slika 10-5 Učestalost otkazivanja daljinski upravljane armature u ovisnosti o pomaku zapornog organa

Radi eliminacije negativnog utjecaja pojedinih parametara na točnost pokazivanja signalizatora, izvedba armature treba biti robusna i bez gipkih elemenata u vezi između zapornog organa i signalizatora. Ticalo signalizatora treba imati neposredan kontakt sa konstruktivnim dijelom zapornog organa, bez nepotrebne preinake veličine pomaka i sa najmanjim mogućim brojem detalja koji naginju vibriranju.

Svaka ručno i daljinski mehanički upravljana armature mora imati indikator položaja zapornog organa. Razlog tome je da, u vrlo često lošim uvjetima vidljivosti, pogrešna manipulacija sa armaturom na brodu ne uzrokuje katastrofalnu zabunu, koja bi mogla onеспособiti rad uređaja, opreme i postrojenja ugrađenih u brod ili ugroziti sigurnost i egzistenciju broda kao cjeline. Postojanje indikatora za položaj zapornog organa armature zahtijevaju i sva klasifikacijska društva.

Kod daljinski upravljane armature lokalni indikatori su bespredmetni, osim kada je ugrađen uređaj za paralelno ručno upravljanje. Stoga se ovdje mora predvidjeti poseban sustav kontrole položaja zapornog organa, kao preduvjet za pravilno funkcioniranje daljinskog upravljanja sustavom broskog cjevovoda. Daljinska kontrola položaja zapornog organa armature ostvarena je mehaničkim vezom ili pretvaranjem energije pomaka zapornog organa u neku drugu formu. Mehaničkom vezom pomak zapornog organa može se prenijeti polužnim ili užetnim prijenosom, koji je nepogodan kod široke primjene daljinski upravljane armature. Prema tome, za kontrolu položaja zapornog organa većinom se koristi pretvaranje energije pomaka u neki drugi oblik energije pogodan za prijenos na udaljenost, a taj način imenovan je telemetrijska kontrola.

Do sada je više puta korišten termin signalizator, kada je bilo riječ o uređaju za daljinsku kontrolu položaja zapornog organa. Pod nazivom signalizator treba podrazumijevati komplet uređaja počevši od mjesta preuzimanja informacije na armaturi, pa zaključno do isporuke te informacije na signalnom pultu – signalne žaruljice. Dio tog uređaja sa nazivom davač ugrađuje se na samu armaturu radi primanja i transformiranja informacije u neki drugi oblik energije pogodan za prijenos na udaljenost.

U svrhu transformiranja informacije mogu se koristiti bilo koje fizikalne pojave, kod kojih su poznate ovisnosti između parametara kod pretvaranja energije. Kod davača se kao ulazna veličina može koristiti niz parametara izvedenih iz malog broja osnovnih, kao što su pomaci i sile. Izvedeni parametri kod zapornog organa armature mogu biti: erozija, trošenje, tlak, mehaničko naprezanje, deformacija, duljina debljina, nivo, vibracija, potrošnja, tlak medija, zakretni moment itd. Zadatak davača je da primljenu informaciju o položaju i stanju zapornog organa armature transformira u električni, hidraulički, pneumatski ili neki drugi energetske oblik pogodan za prijenos do udaljenog signalnog pulta ili kao komandni signal za izvršenje neke radnje.

U danas razvijenoj tehnici kontrole položaja zapornog organa armature najrasprostranjeniji se električni signalizatori i njima adekvatni davači. Prema režimu rada električni davači se dijele na parametarske i energetske. Parametarski su konstruktivno riješeni kao omski (R - varijabilno), kapacitivni (C- varijabilno), induktivno (L - varijabilno) i magnetno upravljani. U energetske davače ubrajaju se transformatorski, fotoelektrični, termoelektrični i piezoelektrični. Hidraulički,

pneumatski, radioaktivni i ultrazvučni davači uglavnom se koriste u specifičnim slučajevima, kada je teško ili nemoguće korištenje električne energije – na primjer na tankerima u prostorima gdje je prisutna opasnost od eksplozije.

Prema načinu primanja ulazne veličine, električni davači se dijele na kontaktne, bezkontaktne i davače na osnovi magnetno upravljanih kontakata. Kontaktni električni davači imaju neke izrazite prednosti, i to :

- relejni izlazni signal dovoljne snage, kojeg se treba pretvarati ili pojačavati dodatnom ugradnjom sekundarnih pribora;
- mogućnost upravljanja sa nekoliko galvanski razdvojenih električnih krugova; te
- mogućnost povećanja pouzdanosti primjenom rezervnih signala bez realnog povećanja gabarita i težina davača.

Nabrojene prednosti doprinijele su da se kontaktni davači najviše koriste kod brodske armature, bez obzira na njihovu relativno složenu konstruktivnu izvedbu. Osnovni nedostatak im je da imaju ograničen temperaturni režim rad (do 60 °C). Stoga se ne mogu koristiti kod armature za zagrijane transportirane medije (para, napojna voda, kondenzat, predgrijano ulje za loženje itd.), kao i na pojedinačnim mjestima energetske postrojenja. Tada se upotrebljavaju bezkontaktni davači. Davači na bazi magnetno upravljanih kontakata pogodni su za primjenu kod armature, koja ima veliki broj prebacivanja, te koja radi sa velikim ubrzanjima i sa neznatnim pomacima lančanih opterećenja.

Davači posredstvom ticala primaju podatak o ulaznoj veličini u obliku skokovitog ili isprekidanog, odnosno kontinuiranog ili analognog signala. I kod jednog i kod drugog oblika ostatni signal ili signal praznog hoda može biti jednak nuli ili će imati neku malu vrijednost. Za signalizaciju položaja zapornog organa armature većinom je dovoljno da ulazni signal davača ima isprekidani oblik. Analogni oblik ulaznog signala potreban je samo tada, ako je nužna stalna kontrola položaja zapornog organa između dva krajnja – na primjer kod zatvaranja zakretanjem velikih prolaznih otvora. Ukupan pomak ticala davača od jednog do drugog krajnjeg položaja naziva se radni hod davača.

Točka odavanja signala u davaču, za jedan odnosno drugi krajnji položaj, mijenja svoj položaj u toku eksploatacije zbog različitih uzroka, kao što su vibracije, trošenje, temperatura, vlažnost, šokovi itd. Područje rasturanja (disperzije) točaka odavanja signala naziva se zona nestabilnosti davača. Za osiguranje pouzdanog odavanja signala davača neophodno je, da se prekrije zona nestabilnosti kod reguliranja njegovog radnog hoda, tj. da ticalo ima dodatni pomak za veličinu zone nestabilnosti nakon stvarno radnog hoda. Kada se ticalo pomiče u suprotnom smjeru pojavljuje se analogna pojava u odnosu na istu točku odavanja signala, tako da se zona nestabilnosti povećava. Ove pojave imaju negativan efekt na točnost signalizacije i na automatski rad armature sa servouređajima i povratnim signalom. Naime, moguće je da se pladanj ventila već odvojio od sjedišta, a da signal „zatvoreno“ još uvijek postoji. Zbog toga se može dogoditi postojanje nepoželjnog nekontroliranog zazora kod zatvorenog položaja zapornog organa, odnosno pojave preranog otvaranja razvodnika za upravljanje kod armature sa povratnim signalom. Zona nestabilnosti kod pomaka današnjih izvedbi davača nalazi se unutar 0,4-0,5 mm. Toj vrijednost ponekad treba dodati i nestabilnost same armature, pa je tako još više smanjena

točnost signalizacije položaja zapornog organa. Stoga treba nastojati postići što manju zonu nestabilnosti davača, ali i što veću stabilnost same armature.

Kada je zaporni organ u zatvorenom položaju hermetičnost zatvaranja je jedan od osnovnih zahtjeva naročito kod najodgovornije armature. Međutim, opisana netočnost signalizacije davača položaja zapornog organa ne osigurava potpuno sigurno kontrolu hermetičnosti zatvaranja armature. Ovaj nedostatak pokazao se je kod informacije o zatvorenom položaju oplatne armature prilikom rada na automatizaciji sustava brodskih cjevovoda. Na primjer, na brtvene površine dospijevaju tvrde čestice dimenzijski manje ili jednake veličini nekontrolirane zone (zone nestabilnosti), mehanizam armature se uklini prije nego što zaporni organ dođe do sjedišta sa rasporom manjim ili jednakim nekontroliranoj zoni- u oba slučaja će se pojaviti signal „zatvoreno“, iako postoji raspor između brtvenih površina i sjedišta zapornog organa. Signal „zatvoreno“ pojaviti će se i u slučaju oštećenja brtvenih površina, iako je hermetičnost zatvaranja narušena.

Prema postojećim propisima hermetičnost zatvaranja mora se kontrolirati kod proizvođača armature i nakon montaže na brodu, ali ne i u toku eksploatacije. Međutim, tendencija u zahtjevima za povećanjem pouzdanosti, trajnosti i vremena između servisiranja armature, neminovno traži da se dodatno predvidi kontrola hermetičnosti zatvaranja, ali i signalizacija pojave propuštanje zapornog organa, ako je veća od dozvoljene u uvjetima eksploatacije sustava. Principi kontrole hermetičnosti mogu se objediniti u sljedeće grupe signalizacije: prema razini nakupljenog propuštanja, prema povećanom trošenju uslijed gubitka, prema tlaku unutar brtvenih površina i pomoću ultrazvuka. Uvođenje kontrole hermetičnosti zatvaranja zapornog organa osigurava potpuno istinitu informaciju o stanju armature. To omogućava glavnom operateru da centralnom komandnom pultu za automatsko upravljanje velikim sustavom cjevovoda donošenje rješenja u svakoj konkretnoj situaciji.

11. IZRADA, MONTAŽA I ISPITIVANJE CJEVOVODA

Cjevovodi se, kao dio opreme namijenjene za ugradnju u brod, najlakše mogu prilagoditi smještaju i rasporedu strojeva, uređaja i ostale opreme. Nadalje, sa pogodnom konfiguracijom trase jednog ili više cjevovoda moguće je postići daleko veći slobodan prostor za komuniciranje posade ili putnika, odnosno za smještaj tereta u pojedinim prostorijama unutar broda. Dakle, prilagođavanje trase cjevovoda drugim faktorima unutar broda kao mjera prisile prema cjevovodu je prvi osnovni razlog za neizbježnu potrebu formiranja koljena na elementima cjevovoda. Na svakom cjevovodu je i poželjna ugradnja koljena da bi se postigla njegova što veća fleksibilnosti i ujedno manja naprezanja u njemu zbog toplinskih dilatacija i deformacija trupa broda. Takav zaključak proizlazi iz razmatranja elastičnosti cjevovoda. To treba tretirati kao mjeru povoljnu za cjevovod koja se primjenjuje namjerno, što je drugi osnovni razlog za postojanje koljena na trasi cjevovoda. Kod brodskih cjevovoda koriste se koljena sa kutom između simetrala krakova jednakim ili većim od 90° . Vrlo su rijetki slučajevi kada taj kut treba biti manji od 90° . Jedan takav primjer je izvedba lire za kompenzaciju toplinskih produljenja.

Za sve materijale, koji se koriste za izradu brodskih cjevovoda, nisu jednaki postupci za mijenjanje pravca trase cjevovoda. Cijevi iz lijevanog željeza se ne mogu savijati, pa se promjena pravca trase postiže pomoću posebno lijevanih fazonskih umetaka. Cijevi od olova se vrlo malo koriste na brodu, a kod njih se koljeno može vrlo lako formirati rukom kod temperature okoline. Cijevi od termoplastike se mogu vrlo lako savijati rukom ako su predgrijane, dok se kod okolne temperature ne mogu savijati. Dakle, preostaju cijevi od čelika, bakra, legura bakra i legura aluminija, a od njih se izrađuje najveći broj brodskih cjevovoda. Tehnološki postupci za izradu koljena na tim cijevima su vrlo slični. Zbog toga ih se može u nastavku tretirati pod zbirnim nazivom – metalne cijevi.

U svakom brodogradilištu postoji specijalizirana radionica za izradu cjevovoda pod nazivom Cjevarska radionica. Ona u svom radu na izradi cjevovoda počinje od nacрта koje je primila od projektnog biroa brodogradilišta. Opseg njenih poslova bit će bitno različit ovisno o detaljnosti razrade nacрта, te da li se koristi model za smještaj svih cjevovoda u određenom prostoru na brodu. Ovdje će se ukratko razmatrati redoslijed rada, kada je dostavljena shema cjevovoda, jer je tada najveći opseg poslova u radionici. Prethodno na brodu moraju biti ugrađeni svi strojevi, uređaji i oprema za određeni sustav cjevovoda. Cjevarska radionica mora na samom brodu prema shemi odrediti za svaku armaturu najpovoljniji položaj da bi mogla pristupiti snimanju trase cjevovoda. Snimanje trase se vrši pomoću tanke žice promjera 3 do 5 mm tako, da je radnik na brodu savija u točan oblik - šablonu za svaki element cjevovoda. Tom prilikom mora voditi računa, da se element cjevovoda sa svojom duljinom i konfiguracijom može iz radionice unijeti kroz vrata i hodnike na brodu do mjesta montaže. Šablona od tanke žice služi za formiranje elemenata cjevovoda u radionici. Nakon toga slijedi postavljanje prirubnica na krajeve svakog elementa cjevovoda. Točan položaj prirubnice u odnosu na cijev potrebno je odrediti na mjestu montaže u brodu, jer se samo tako postiže što veća paralelnost brtvenih površina prirubnica na spoju dva susjedna elementa.

Konfiguracija elementa cjevovoda prema šablona može se postići sastavljanjem i stičnim zavarivanjem ravnih dijelova cijevi i koljena, koja se mogu nabaviti kod proizvođača cijevi. No,

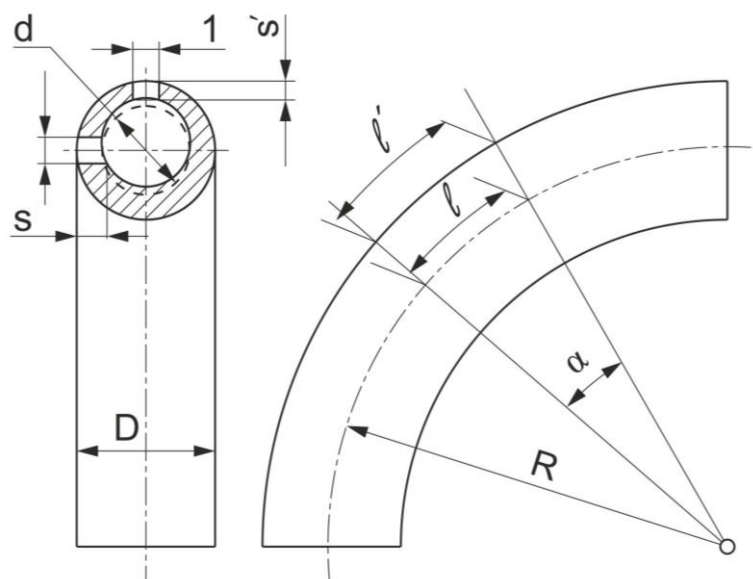
u praksi izrade brodskih cjevovoda to su zanemarivo rijetki slučajevi. Druga mogućnost je savijanje cijevi prema šablona, što se redovito i koristi u praksi. Savijanje cijevi se može izvesti na hladno ili uz prethodno zagrijavanje, što ovisi o veličini promjera i debljine stijenke. U radionici se cijev može saviti ručnim postupkom uz pomoć posebnih naprava, odnosno korištenjem specijalnih strojeva za savijanje. Ručni postupak sa korištenjem naprava je starija metoda savijanja cijevi, a primjenjuje je svaka radionica. Specijalne strojeve koriste samo bolje opremljene radionice.

Kod izrade koljena savijanjem materijal cijevi doživi trajnu plastičnu deformaciju, koja nije jednaka po čitavom poprečnom presjeku cijevi. Uski sloj materijala, smješten na polumjeru neutralne osi kod savijanja, neće doživjeti nikakvu deformaciju. Slojevi na polumjerima većim od polumjera neutralne osi bit će istegnuti, a na manjim polumjerima bit će stlačeni. Konačna posljedica nejednakih trajnih deformacija po poprečnom presjeku je promjena oblika poprečnog presjeka i istovremena promjena debljine stijenke. Za razliku od punih okruglih presjeka kod cijevi je potenciran efekt promjene oblika poprečnog presjeka.

Taj efekt se može smanjiti ili čak nestati ako se primjene neke posebne mjere. Za značajno smanjenje promjene oblika poprečnog presjeka vrlo dobro služi pijesak (ili kalofomi). Cijev napunjena sa pažljivo i dobro nabijenim fino granuliranim pijeskom ponaša se na mjestu savijanja kao materijal sa punim okruglim presjekom. Zbog toga se cijevi obavezno pune sa pijeskom (ili kalofomijem) kod ručnog i većine strojnih postupaka savijanja ukoliko se želi promjena oblika poprečnog presjeka smanjiti na minimum. No, treba naglasiti, da danas već postoje uređaji za strojno savijanje kod kojih se čak po želji može regulirati i usmjeriti promjena oblika poprečnog presjeka cijevi bez primjene bilo kakvog punjenja.

Kod standardnih postupaka savijanja smanjenje debljine stijenke je neminovno, pa zbog toga cijev mora imati povećanu debljinu stijenke. Smanjenje debljine stijenke moguće je odrediti uz pomoć Slike 11-1. Za tu svrhu se u stijenci ravne cijevi izdvoji uzdužni element jedinične širine i duljine l . Volumen tog uzdužnog elementa prije savijanja bit će na bilo kojem mjestu opsega:

$$V_s = 1 \cdot l \cdot s = l \cdot s \quad (163)$$



Slika 11-1 Smanjenje debljine stijenke uslijed savijanja

Nakon savijanja volumen tog elementa u zoni istezanja iznosi:

$$V'_s = 1 \cdot l' \cdot s' = \left(R + \frac{D}{2}\right) \cdot \alpha \cdot s' \quad (164)$$

dok u neutralnoj osi ostaje nepromijenjen. Kod savijanja volumen materijala se nije promijenio, pa mora biti:

$$V_s = l \cdot s = R \cdot \alpha \cdot s = V'_s = \left(R + \frac{D}{2}\right) \cdot \alpha \cdot s' \quad (165)$$

a odatle slijedi:

$$s' = s \cdot \frac{2R}{2R + D} \quad (166)$$

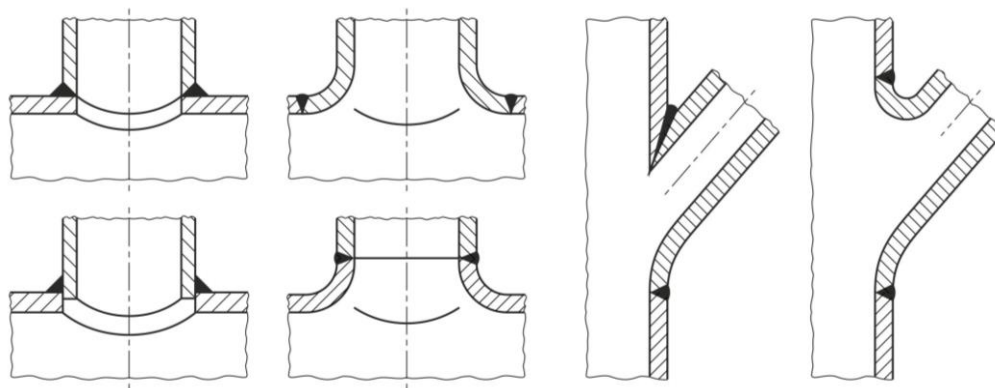
ili najveće relativno smanjenje stijenke:

$$\Delta s = \frac{s' - s}{s} \cdot 100 = \frac{D}{2R + D} \cdot 100\% \quad (167)$$

Eksperimentalno je dokazano, da se relativno smanjenje debljine stijenke izmjereno na savijenim cijevima vrlo dobro podudara sa izračunatim prema izrazu (167) kod svih $R \geq 3D$.

Relativno smanjenje debljine stijenke povećava se sa smanjenjem omjera R/D i kod $R/D=3$ iznosi cca. 15%. Ako je omjer $R/D < 3$ relativno smanjenje se naglo povećava pa zbog toga nije preporučljivo vršiti savijanje kod manjih promjera, u koliko se sa samim postupkom savijanja ne mogu postići povoljniji rezultati. Npr. Hrvatski registar brodova propisuje da kod cjevovoda sa radnim tlakom $> 0,79$ MPa i radnom temperaturom > 60 °C (330 K) taj omjer smije biti $R/D \geq 2.5$. Det Norske Veritas propisuje da smanjenje debljine stijenke uslijed savijanja ne smije biti veće od 7% bez obzira na radni tlak i temperaturu.

Nadalje, vrlo često postoji potreba da se izvede grananje trase brodskog cjevovoda, a postiže se posrednom ugradnjom odgovarajuće armature ili neposredno izravnim izvođenjem cijevi manjeg promjera i cijevi većeg promjera. U ovom drugom slučaju spajanje dviju cijevi izvodi se elektrolučnim ili autogenim postupkom zavarivanja na jedan od načina prikazanih na Slici 11-2. Kod ovakvog grananja cijev većeg promjera je oslabljena uslijed izrezivanja otvora. To oslabljenje se mora kompenzirati povećanjem debljine stijenke elementa cjevovoda gdje je izvedeno grananje.



Slika 11-2 Načini spajanja cijevi

Kod zavarenih spojeva na cjevovodu treba uvijek nastojati da šav bude stično zavaren. I to usprkos poteškoćama koje postoje kod zavarivanja korijena stičnih šavova. Razlog tome je mogućnost efikasne kontrole homogenosti tako zavarenog spoja pomoću snimanja radiografskim metodama. Svi važniji zavareni spojevi na cjevovodima moraju biti snimljeni sa jednom od radiografskih metoda radi utvrđivanja kvalitete zavarenog spoja i otklanjanja eventualnih grešaka u šavu. Npr. Hrvatski registar brodova zahtjeva da svi zavareni spojevi na cijevi glavnog parovoda promjera $D \geq 76$ mm moraju biti radiografski snimljeni bez obzira na radni tlak, ako je radna temperatura $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ (623 K). Isti je zahtjev i za sve druge brodske cjevovode, ako je im je radni tlak veći od $1,57\text{ MPa}$. Radiografski mora biti snimljena čitava duljina zavarenog spoja. Kod cijevi vanjskog promjera $32 < D < 76$ mm radiografskim snimanjem mora se kontrolirati najmanje 10% zavarenih spojeva.

Neminovna posljedica zavarivanja i hladnog savijanja je pojava zaostalih naprezanja u materijalu cijevi. Kod materijala sa smanjenim svojstvima žilavosti mogu se čak pojaviti pukotine u zavaru. Obje pojave ne smiju postojati kod konačno izrađenog elementa cjevovoda spremnog za montažu u brod. Zaostala naprezanja u materijalu cijevi mogu se otkloniti odgovarajućom toplinskom obradom- naponskim odžarivanjem ili normalizacijom. Povećana opasnost pojave pukotina u zavaru je kod cijevi od legiranog čelika, a može se izbjeći predgrijavanjem materijala cijevi kao pripreme za zavarivanje.

Klasifikacijska društva u svojim pravilima zahtijevaju, da se sve cijevi od legiranog čelika nakon zavarivanja moraju naponski odžariti a u pojedinim slučajevima i normalizirati. Za cijevi od ugljičnog čelika, bakra i legura bakra imaju istovjetan zahtjev, da se nakon hladnog savijanja i

elektrolučnog zavarivanja mora provesti naponsko odžarivanje, a nakon autogenog zavarivanja normalizacija. No međusobno se bitno razlikuju u propisivanju vrijednosti osnovnih parametara (radnog tlaka, radne temperature i vrste medija), kada mora biti primijenjen navedeni zahtjev za toplinsku obradu.

U pravilima klasifikacijskih društava propisani su i neki detalji za postavljanje trase pojedinih sustava cjevovoda, a kod određivanja i polaganje trase cjevovoda moraju biti zadovoljeni. U svojoj osnovi svrha svih tih zahtjeva je postizanje sigurnosti broda, putnika, posade i tereta. Evo nekih najvažnijih:

Prolazi cjevovoda kroz vodonepropusne pregrade mogu se postaviti na pregradu na udaljenosti od oplate većoj ili jednakoj $1/5$ širine broda. Ako se tom zahtjevu ne može udovoljiti kod nekog sustava cjevovoda, tada taj cjevovod mora biti dodatno opremljen tako, da ne postoji mogućnost prodora vode kroz oštećeni cjevovod u druge vodonepropusne prostore. Ukoliko cjevovode slatke i napojne vode treba polagati kroz tankove derivata nafte, i obratno, ukoliko cjevovode derivata nafte treba polagati kroz tankove slatke i napojne vode, tada se takav cjevovod mora provući kroz posebno izrađen naftonepropusan tunel kao konstruktivni dio tanka. U pravilu treba nastojati da što manje cjevovoda prolazi kroz skladište tereta, lančanike i ostale prostorije posebne namjere. Cjevovodi, koji prolaze kroz skladišta tereta i lančanike, moraju biti u tim prostorima efikasno zaštićeni od oštećenja. Kroz spremišta boje ili svjetiljki, kao i kroz prostorije za smještaj lako zapaljivih materijala, ne smije se polagati cjevovod pare. Kroz rashladne prostore mogu prolaziti samo oni cjevovodi, koji služe za njihov normalan rad. Eventualna opasnost smrzavanja vode u cjevovodu položenom u relativnoj blizini rashladnog prostora mora biti spriječena primjenom odgovarajuće izolacije.

Ne smije se polagati cjevovod koji radi pod tlakom iznad i iza električnih glavnih rasklopnih ploča, ploča za nuždu i punktova za upravljanje sa porivnim električnim strojevima. Bočno i sa prednje strane ploče najbliži takav cjevovod mora biti udaljen najmanje 1500 mm. Ukoliko se mora odstupiti od navedene udaljenosti, polaganje cjevovoda dozvoljeno je do udaljenosti 500 mm ali uz uvjet da svi spojevi na cjevovodu moraju biti obloženi specijalnim plaštem, ako su udaljeni manje od 1500 mm. Nije dozvoljeno polaganje cjevovoda kroz prostorije za specijalne elektro-uređaje, za akumulatore i za smještaj glavnog uređaja žiro kompasa. Izuzetak od ovog zahtjeva su samo oni cjevovodi, pomoću kojih se poslužuje neki od ugrađenih uređaja u tim prostorijama kao i protupožarni cjevovod sa CO₂.

Svaki element cjevovoda spreman za montažu mora biti tlačen vodom kod probnog tlaka. Svrha ovog ispitivanja je provjera na čvrstoću i nepropusnost svih zavarenih spojeva na elementu cjevovoda. Svaki sustav cjevovoda kao cjelina ili kao nekoliko dijelova cjeline mora biti ponovno tlačen sa probnim tlakom nakon montaže u brod. Svrha ovog drugog ispitivanja je provjera nepropusnosti svih rastavljivih spojeva na cjevovodu. Visina probnog tlaka za pojedinačno tlačenje elemenata cjevovoda redovito je veća od visine probnog tlaka za provjeru nepropusnosti rastavljivih spojeva. Radi eventualne uštede u troškovima izrade i montaže, pojedinačno tlačenje elemenata u radionici može se zamijeniti sa tlačenjem sustava nakon montaže. No, u tom slučaju se mora primijeniti visina probnog tlaka za pojedinačno tlačenje u radionici, a time rastavljivi spojevi moraju udovoljiti strožim zahtjevima u odnosu na njihovu nepropusnost.

Klasifikacijska društva u svojim pravilima zahtijevaju tlačjenje elemenata cjevovoda prije montaže sa probnim tlakom jednakim dvostrukom radnom tlaku. Izuzetci od tog zahtjeva su, da Hrvatski registar brodova propisuje za napojni cjevovod $2.5 \times p_r$, a American Bureau of Shipping $1.5 \times p_r$ za većinu cjevovoda. Visina probnog tlaka propisanog za tlačjenje montiranog cjevovoda na brodu iznosi $(1.5 - 2.5) \times p_r$, s time da ne smije biti manji od $0,34 - 0,49$ MPa. American Bureau of Shipping je i ovdje najblaži sa svojim zahtjevom za visinu probnog tlaka $(1,25-1,5) \times p_r$. No, treba naglasiti, da se kod oba probna tlaka moraju primjenjivati – ovisno o namjeni cjevovoda i o visini radnog tlaka. Tek nakon uspješno provedenog probnog tlačenja na brodu sastavljenog cjevovoda sa ugrađenog armaturom i opremom, sustav cjevovoda se može smatrati spremnim za eksploataciju.

12. ZAŠTITA CJEVOVODA I ARMATURE

Cijevi, ugrađena oprema i armatura izloženi su mogućim pojavama nekoliko vrsti eksploatacije. To su mehanička erozijska, kavitacijska i korozijska oštećenja. Mehanička oštećenja su najvjerojatnija na vanjskoj strani a erozijska i kavitacijska većinom se pojavljuju na unutarnjoj strani cjevovoda. Korozijska oštećenja su podjednako prisutna i na vanjskoj i na unutarnjoj strani cjevovoda, opreme i armature.

U grupu mehaničkih oštećenja treba ubrojiti lomove stijenke cijevi, opreme i armature, plastične deformacije cijevi od opterećenja poprečnim silama i momentima savijanja, te mjestimično djelomično ili potpuno spljoštavanje cijevi. Mehanička oštećenja brodskih cjevovoda najčešće su u prostorima za smještaj tereta i u lančanicima. U prostoru za teret kod krcanja čvrstih glomaznih tereta, odnosno u lančanicima kod ulaženja lanca, ugrađeni cjevovod udarce ili prevelika poprečna opterećenja. Isti efekt je moguć za vrijeme plovidbe broda po jako uzburkanom moru, kada neminovno dolazi do pomicanja lanca u lančanicima, odnosno tereta u teretnom prostoru. Ako dođe do mehaničkog opterećenja, mjesto oštećenja je redovito nepristupačno, pa popravaka nije izvodljiv upravo u momentima kada je najpotrebnije da oštećeni cjevovod normalno funkcionira.

Bilo koje od navedenih mehaničkih oštećenja može djelomično ili u potpunosti onesposobiti cjevovod za obavljanje njegove funkcije, a to može biti presudno za sigurnost broda. Prema tome, potrebno je jedan ili više cjevovoda zaštititi od mehaničkih oštećenja na svim onim mjestima unutar broskog trupa, gdje su takve potrebe vjerojatne i moguće. Zaštita se postiže izradom adekvatnih tunela od čeličnog lima odnosno mjestimičnim premošćivanjem sa čeličnim limom ili profilima pričvršćenim na konstruktivne elemente trupa broda, koji preuzimaju opterećenja opasna za cjevovod.

Erozijska oštećenja se pojavljuju na unutarnjem promjeru cijevi kroz koju protječe tekućina, smjesa tekućine i krutih čestica ili smjesa vodene pare i vode. Najveća oštećenja su na mjestima, gdje se vrši skretanje smjera strujanja, dakle najčešće u koljenima cijevi. Intenzitet oštećenja od erozijskog djelovanja tekućih ili krutih čestica veći je kod većih brzina strujanja transportiranog medija.

Izrazita erozijsko oštećenje pojavljuje se na izlaznom koljenu cijevi za izbacivanje pepela pomoću ejektorskog uređaja sa mlazom vode. Ovdje tvrde čestice pepela nošene strujom vode velike brzine erozijski djeluju na materijal stijenke koljena. Kao mjera zaštite u koljeno su ugrađeni posebni umetci od tvrdog lijevanog željeza, koji ima veću otpornost na eroziju od čelika. Konstruktivno rješenje ugradnje umetaka je takvo, da su lagano zamjenjivi, jer im je vijek trajanja kratak i pored veće otpornosti na eroziju.

U ostalim slučajevima smanjenje brzine strujanja je najefikasnija zaštita od erozijskih oštećenja. U novije vrijeme kao zaštita od erozijskog oštećenja primjenjuje se postupak oblaganja čeličnih cijevi iznutra sa plastičnim materijalima otpornim na eroziju. Ovaj način zaštite ipak treba smatrati samo kao uspješan pokušaj za produljenje vijeka trajanja cijevi, jer erozija oštećuje i plastičnu oblogu, ali joj je duži vijek trajanja.

Problem erozijskih oštećenja naročito je prisutan i na brtvenim površinama zapornih organa armature, gdje nije moguća primjena bilo kakve zaštitne obloge. U svijetu se danas provode

istraživanja u laboratorijskim uvjetima za određivanje otpornosti pojedinih materijala u odnosu na erozijska oštećenja. Ta laboratorijska istraživanja usmjerena su na određivanje otpornosti na eroziju onih materijala, koji se koriste za izradu dijelova brtvenih površina a to su razne vrste bronci. Kao medij primjenjuje se umjetna morska voda. Osnovni cilj istraživanja je da se pronađu legure takvog kemijskog sastava, koje imaju povećanu otpornost na erozijsko trošenje u odnosu na dosada upotrebljavane legure. U laboratorijskim uvjetima nastoji se što je moguće više imitirati stvarne uvjete rada a ispitivanja se provode samo za erozijsko trošenje.

Pojava kavitacijskih oštećenja prisutna je na unutarnjem promjeru cjevovoda, a posebno unutar armature i opreme na mjestima, gdje dolazi do naglih promjena tlaka odnosno čak do mjestimičnog velikog podtlaka. Karakter kavitacijskih oštećenja sličan je erozijskim oštećenjima. Nagle promjene tlaka unutar cjevovoda, opreme i armature posljedica su naglih promjena površina protočnih presjeka. Najefikasnija zaštita od kavitacijskih oštećenja je primjena takvih konstruktivnih rješenja, gdje su te nagle promjene površine svedene na minimum. Ovdje se također kao mjera zaštite može primijeniti i oblaganje plastičnim materijalima.

Za pojavu kavitacijskih oštećenja također se vrše laboratorijska istraživanja na raznim vrstama materijala radi određivanja količine trošenja kod točno definiranih režima ispitivanja. Svrha istraživanja je da se pronađe materijal sa najvećom otpornošću na kavitacijska oštećenja. Ispitivanja se provode na materijalima, koji se koriste za izradu dijelove brtvenih površina zapornih organa armature, uz upotrebu umjetne morske vode.

Erozijska i kavitacijska oštećenja će se pojaviti samo kod protjecanja transportiranog medija kroz cjevovod, opremu i armaturu. Prema tome, ove dvije pojave mogu se smatrati kao posljedica strujanja medija. Otuda se za njih u literaturi i koristi zajednički naziv „strujna korozija“. Pojava strujne korozije, tj. istovremenih oštećenja od erozije i kavitacije, laboratorijski je istražena na raznim vrstama bronci, koje se koriste za izradu dijelove brtvenih površina zapornih organa armature. Rezultati ispitivanja pokazuju, da su različite bronce različito otporne na strujnu koroziju. Na osnovi ovih rezultata može se izvršiti adekvatan izbor materijala za izradu pojedinih dijelova armature.

Kod korozijskih oštećenja treba razlikovati dvije međusobno bitno različite pojave. Prva je pojava korozije površine materijala uslijed kemijskih procesa, i to: oksidacije, te nagrizanja organskih odnosno anorganskih kiselina. Transportirani medij ovdje ima ulogu katalizatora odnosno nosioca kemijski agresivnih kiselina. Ova pojava se može imenovati kao opća ili površinska korozija. Druga je pojava korozije površine materijala uslijed elektrokemijskog djelovanja zbog postojanja galvanske struje. Transportirani medij, ovdje ima ulogu elektrolita između dva metala različitih potencijala a to je ustvari formiranje galvanskog članka. Ova pojava poznata je kao galvanska ili kontaktna korozija.

Opća ili površinska korozija podjednako oštećuje materijal cijevi, opreme i armature na unutarnjoj i vanjskoj strani cjevovoda. Njezin intenzitet ovisi o temperaturnim uvjetima, prisutnosti i vrsti medija koji djeluje kao katalizator, homogenosti materijala i stanja naprezanja konstruktivnog dijela cjevovoda. Opća korozija pojavljuje se podjednako na čitavoj nezaštićenoj površini materijala, ali brzina trošenja jako ovisi o homogenosti i uvjetima naprezanja materijala.

Površinu metala oksidira kisik iz okolnog zraka, a ulogu katalizatora ima slatka ili morska voda. Tako se na toj površini pojavljuje sloj oksida prisutne organske ili anorganske kiseline stvaraju soli sa kemijskom reakcijom sa površinom metala. Površinski sloj oksida ili soli ima sasvim drugačije fizikalne i kemijske osobine od osnovnog metala. Sa stanovišta čvrstoće materijala potpuno neupotrebljive. Površinski sloj oksida ili soli može biti jako kompaktan i elastičan ili lomljiv npr, kod olova je veoma kompaktan i elastičan, prati sve deformacije osnovnog materijala i ne otpada sa površine. Na taj način predstavlja zaštitu od korozije daljnjih slojeva osnovnog materijala. Zbog toga se olovo smatra kao materijal izrazito otporan na koroziju. Kod čelika je pak ovaj sloj jako lomljiv i krhak, ne može pratiti deformacije osnovnog materijala te se odvaja i otpada sa površine. Za čelik se zato kaže da je ne otporan na koroziju.

Za razne vrste čelike, koji se koriste za izradu brodskih cjevovoda, brzina ravnomjerne površinske korozije u mm/god prikazana je u tablici 11-1. Pomoću podataka u tablici moguće je, prema zahtijevanoj trajnosti određenog cjevovoda, prilično točno odrediti veličinu dodatka za koroziju „c“ u formulama za određivanje debljine stijenke cijevi. No, ako je struktura osnovnog materijala ne homogena, brzine u tablici 11-1 poprimaju mjestimično sasvim druge vrijednosti. Naime ,nehomogenost strukture osnovnog materijala uzrokovat će mjestimično mnogo brži razvoj korozijskog procesa. Na takvim mjestima bit će i veća dubina korozijskog oštećenja na površini nakon izvjesnog vremena eksploatacije.

Mjere zaštite cjevovoda, opreme i armature od oštećenja općom korozijom nisu uvijek jednake. One ovise o vrsti materijala, o vrsti medija, o tome da li treba zaštititi unutarnju ili vanjsku površinu i o mjestu ugradnje cjevovoda unutar trupa broda. No, bez obzira na nabrojeno, princip zaštite je u svim slučajevima jednak: površinu osnovnog materijala treba prekriti sa odgovarajućim zaštitnim slojem.

Vanjske površine cijevi , opreme i armature ugrađene unutar trupa broda na pretežno suhim mjestima zaštićuju se premazivanjem bojom. Na isti način se zaštićuju konstruktivni elementi trupa broda, ali kod cjevovoda obavezno treba uzeti u obzir radnu temperaturu. Ako se cjevovod ugrađuje u donje dijelove broda ili u dvodna, gdje je pretežno u kontaktu sa vodom, tada se sa vanjske strane zaštićuje postupkom pocinčavanja. Razlog tome je što cink dobro zaštićuje materijal čeličnih cijevi i od oštećenja galvanskom korozijom.

Unutarnje površine cjevovoda, opreme i armature zaštićuju se samo tada, ako postoji povećana opasnost od korozijskih oštećenja. Zaštita se izvodi prekrivanjem površine postupkom pocinčavanja, odnosno primjenom oblaganja plastičnim ili drugim materijalima otpornim na koroziju. Češće se primjenjuju postupci pocinčavanja, zbog svojstva cinka da dobro zaštićuje i od oštećenja galvanskom korozijom.

Pocinčavanje elemenata cjevovoda danas je moguće izvesti na dva načina. Prvi je tako zvani topli postupak, kod kojega se potpuno dovršeni elementi cjevovoda uranjaju u kadu sa rastopljenim cinkom. Drugi je takozvani hladni postupak kod kojega se na površinu potpuno dovršenog elementa cjevovoda nanosi tanki sloj cinka metodom metalizacije. Hladni postupak nije pogodan za prekrivanje unutarnjih površina elemenata cjevovoda zbog njihove nepristupačnosti. Kao metoda zaštite hladni postupak se je počeo primjenjivati neusporedivo kasnije od toplog postupka.

Oblaganje plastičnim ili drugim materijalima otpornim na koroziju moguće je izvesti na dva načina, i to:

- nanošenjem zaštitnog sloja plastičnog materijala na površinu cijevi, i
- ugrađivanjem cijevi od plastike ili olova u čeličnu cijev, pa je tako spriječen izravan kontakt čelika sa agresivnim kiselinama.

Za postizanje kvalitetnog i dugotrajnog prekrivanja površine metala sa zaštitnim slojem, potrebno se je strogo pridržavati određenih preduvjeta kod opisanih postupaka zaštite. U okviru pripreme za zaštitu od korozije površina metala mora biti temeljito odmašćena i očišćena do metalnog sjaja, jer jedino na takvu površinu dobro prijanjaju zaštitni antikorozni materijali. Nakon izvršene zaštite nije dozvoljeno nikakvo zavarivanje na elemente cjevovoda, jer će doći do izgaranja ili otapanja antikorozijskog zaštitnog sloja zbog lokalnog porasta temperature iznad njegove točke vrelišta ili tališta.

Galvanska i kontaktna korozija pojavljuje se uvijek na onim mjestima gdje postoje uvjeti za formiranje galvanskog članka. Pri tome to može biti i na unutarnjoj i na vanjskoj površini cjevovoda, opreme i armature. Kao posljedica galvanske korozije, na površini metala se pojavljuju mjestimična oštećenja za koja se obično koristi naziv „točkasta korozija“.

Svaki metal uronjen u elektrolit ima pozitivni ili negativni elektrokemijski potencijal prema potencijalu vodika. Radi ilustracije u tablici 11-2 navedeni su potencijali nekih elemenata prema vodik. Svojstva elektrolita nemaju sve tekućine, koje se transportiraju kroz brodske cjevovode. No može se ustvrditi, da morska voda ima svojstva elektrolita, a prisutna je kod većine brodskih cjevovoda bilo kao transportirani medij, bilo u kaljuži ili na njihovoj vanjskoj površini uslijed trošenja.

Ako su dva metala u međusobnom metalnom kontaktu i uronjena u elektrolit formirati će se galvanski članak. Poteći će električna struja od pozitivnog na negativni element, odnosno od manje negativnog na jače negativni element. Istovremeno se na površini negativne elektrode (katode) odvaja čestice materijala – kaže se da korodira. Međusobni metalni kontakt dva metala ne mora biti ostvaren unutar elektrolita, niti mora biti direktan.

Količina odvajanja čestica sa katode ovisi o jakosti galvanske struje, a ova ovisi o razlici potencijala između anode i katode. Prema tome, što je veća razlika potencijala između dva metala, brže će biti oštećena površina katode- kaže se da je veća brzina galvanske korozije. No, na brzinu galvanske korozije također ima utjecaja nehomogenost materijala, stanje naprezanja konstruktivnog dijela cjevovoda i omjer uronjenih površina spojenih legura.

Konačno, ako su u elektrolit uronjena tri metala sa različitim elektrokemijskim potencijalima, a međusobno su u metalnom kontaktu, galvanska struja će poteći između ona dva metala kod kojih je veća razlika u potencijalima. Ta pojava se upravo i koristi kod provođenja mjera zaštite od galvanske korozije.

U tablici 11-2 navedeni su elektrokemijski potencijali za kemijski čiste metale. Kod brodskih cjevovoda praktično se ne koriste kemijski čisti metali već njihove legure, a u malom broju slučajeva tehnički čisti metali. U svakoj leguri postoje najmanje 2, a redovito više elemenata, pa će njihova zajednička elektrokemijska svojstva biti nešto drugačija. Ovdje dolazi do izražaja

nehomogenost strukture materijala, koja može uzrokovati mjestimične različite elektrokemijske potencijale na površini legure.

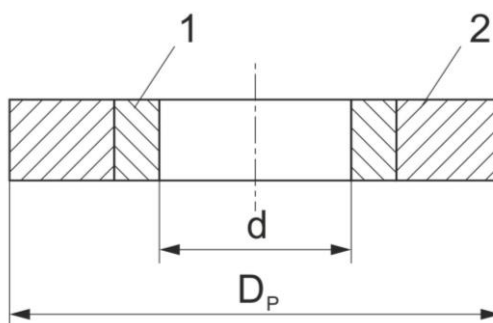
Na veličinu elektrokemijskog potencijala neke kovine ili legure veliki utjecaj ima i površinska ili opća korozija. U eksploataciji su gotovo uvijek istovremeno prisutne površinska i kontaktna korozija. Uslijed površinske korozije na površini metala se stvara sloj oksida ili soli sa bitno različitim vrijednostima potencijala, zbog čega se mijenja odnos toka galvanske struje, a time i galvanska korozija. Kod nekih je materijala (npr. olovo) sloj površinske korozije kompaktan, pa istovremeno služi kao zaštita od galvanske i od daljnjeg napredovanja površinske korozije. Kod drugih materijala (čelik, lijevano željezo) sloj površinske korozije brzo otpadne, pa se i dalje ne smetano mogu razvijati i površinska i galvanska korozija. Zbog navedenog lošeg svojstva čelika i lijevanog željeza, kao najviše korištenih materijala u brodskim cjevovodima, treba poduzimati posebne mjere radi njihove zaštite od galvanske korozije.

Veliki broj armatura za brodske cjevovode izrađuje se od legura bakra (bronca), jer su legure bakra izrazito otporne na korozijska oštećenja. Time je osiguran dugi vijek trajanja armature u eksploataciji. Međutim, takva armatura montirana u cjevovod prouzročiti će oštećenja od galvanske korozije svih čeličnih dijelova cjevovoda, uz neminovno prisustvo morske vode kao elektrolita. Stoga čelične dijelove treba adekvatno zaštititi. Najefikasnija zaštita je sprečavanje formiranja toka galvanske struje izbjegavanje metalnog kontakta dva raznorodna metala. No, to je nemoguće postići na svim mjestima. Zbog toga se kod brodskih cjevovoda primjenjuje nekoliko načina za zaštitu čeličnih cijevi i dijelova od galvanske korozije. Kod svih njih koriste se materijali sa negativnijim elektrokemijskim potencijalom od čelika. Zaštita se izvodi prekrivanjem površine čelika zaštitnim slojem ili ugradnjom posebnih elemenata, poznatih pod nazivom „protektori“. Zaštita prekrivanjem površine elemenata čeličnih cjevovoda izvodi se postupkom pocinčavanja. Za zaštitu površine čeličnih vijaka primjenjuje se i postupak kadmiziranja.

Djelotvornost zaštite prema galvanskoj koroziji postiže se, iako površina čelika nije potpuno prekrivena sa slojem zaštitnog materijala. Ovisno o upotrebljenom materijalu za zaštitu od galvanske korozije, vrsti transportiranog medija kao elektrolita i geometrijskoj formi površine koju treba zaštititi, djelotvornost zaštite je na površini većoj od površine samog zaštitnog materijala. Ova činjenica upravo i omogućava primjenu protektora. Na primjer, ispitivanjem je ustvrđeno da cink protektor zaštićuje ravnu otvorenu površinu čelika unutar polumjera 2,0-2,5 metra. Kod zatvorenih površina domet zaštite iznosi 8-10 najmanjih dimenzija površine prolaznog presjeka, što je kod cijevi 8-10 nazivnih otvora. Ovisno o konfiguraciji dijela cjevovoda, armature ili opreme, te mjestu ugradnje protektora, poželjno je da omjer površine protektora i površine koju treba zaštititi bude 1/50 do 1/500. Pod pojmom površine, ovdje treba podrazumijevati površine koje su u izravnom kontaktu sa elektrolitom.

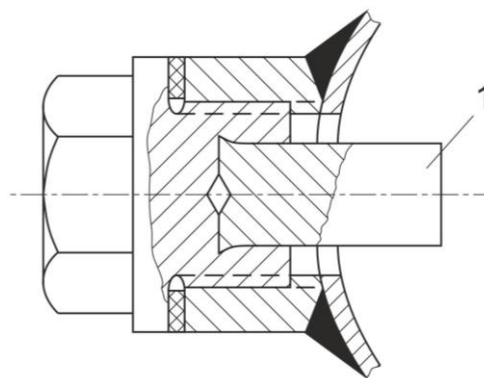
Dobri rezultati u zaštiti od galvanske korozije postižu se ugradnjom prstenastih umetaka od lijevanog željeza na prirubničkim spojevima cjevovoda rashladne morske vode većih promjera. Na mjestima ugradnje ovih protektora mora se postići nepropusnost spoja upotrebom brtve od mekanog materijala, a u pravilu mekana brtva je izolator. Zbog toga se koristi poseban vodič za prolaz galvanske struje radi uspostavljanja metalnog kontakta a pričvrsti se pomoću vijaka na vanjski primjer prirubnica i prstenastog umetka. Za istu namjenu i isto mjesto ugradnje koriste se

i nešto složeniji prstenasti protektori prema Slici 12-1. Ovdje se kao protektor (1) koristi cink, magnezij ili meki čelik, a njegov nosač (2) može biti izrađen od čelika ili mjedi.



Slika 12-1 Prstenasti protektor

Kod brodskih cjevovoda često se koriste i protektori tzv. vijčanog tipa prema slici 12-2. Konstrukcija ovog protektora se u principu ne razlikuje od složenih prstenastih protektora. Jedina razlika je što se protektor (1) ovdje izrađuje od cinka ili magnezija. Svi tipovi protektora zahtijevaju da se kod njihove montaže naročita pažnja posveti postizavanju ispravnog metalnog kontakta sa materijalom kojeg treba zaštititi. Trajnost prstenastih protektora prema slici 12-1 u izvedbi sa cinkom iznosi cca. 1-1,5 godina, a sa mekim čelikom cca. 2 god. Vijčani protektori prema Slici 12-2 u izvedbi sa cinkom imaju srednju trajnost približno 0,5-1 god.



Slika 12-2 Vijčani protektor

Na kraju treba podrobnije objasniti konstataciju da na brzinu procesa opće ili površinske, ali i galvanske ili kontaktne korozije ima veliki utjecaj stanje naprezanja konstruktivnog dijela cjevovoda. Ovdje prvenstveno treba obratiti pažnju na zaostala naprezanja nakon zavarivanja ili hladnog plastičnog oblikovanja materijala. Postojanje i veličina zaostalih naprezanja na pojedinim mjestima cjevovoda, u većini slučajeva su uzrok lokalnih naprezanja jednakih ili većih od granice plastičnosti u radnim uvjetima cjevovoda. Utvrđeno je, da takva lokalna naprezanja uzrokuju izrazito ubrzane korozijske procese na mjestima gdje postoje, pa se tako pojavljuju vrlo jaka mjestimična korozijska oštećenja nakon relativno kratkog vijeka upotrebe. Ovaj fenomen

poznat je pod nazivom „naponska korozija“. Jedina mogućnost od zaštite od naponske korozije je da se zaostala naprezanja svedu na najmanju moguću vrijednost primjenom odgovarajuće toplinske obrade.

Radi primjene adekvatne antikorozijske zaštite svaki projektant treba izvršiti procjenu korozijske otpornosti materijala. Procjena se može napraviti prema raspoloživim podacima u literaturi, koji su većinom rezultat laboratorijskih istraživanja. Laboratorijska istraživanja se u pravilu provode odvojeno za utjecaj svake vrste procesa oštećenja na različite materijale. Međutim, u uvjetima eksploatacije različite vrste procesa oštećenja dešavaju se istovremeno i sigurno je da međusobno utječu jedan na drugoga, pa se rezultati laboratorijskih istraživanja često ne podudaraju sa rezultatima iz eksploatacije. Stoga se ispitivanja na ispitnom stolu na uzorcima naravne veličine u stvarnim eksploatacijskim uvjetima mogu smatrati kao završna etapa za procjenu korozijske otpornosti materijala.

13. PREPORUČENA LITERATURA

1. E. P. Goehring: *Marine Piping Handbook*, Cornell Maritime Press, New York, 1944.
2. J. Crawford: *Marine and Offshore Pumping and Piping Systems*, Butterworths, 1981.
3. I. Marušić, *Cjevarstvo u brodogradnji*, Školska knjiga, Zagreb, 1983.
4. V. Koharić: *Uvod u projektiranje cjevovoda*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1989.
5. Z. Virag: *Mehanika fluida*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
6. A. Galović, *Termodinamika II*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
7. Croatian Register of Shipping; *Rules for the Classification of Ships, Part 8 – Piping*, 2015.