

Aleksandar Dj. Dedić

OSNOVI MAŠINSTVA

sa primerima rešenih zadataka

- I deo -

- Beograd, 2009 -

dr Aleksandar Dedić, docent Šumarskog fakulteta u Beogradu

OSNOVI MAŠINSTVA
- I deo -

Recezeni:

Tehnička obrada:
Aleksandar Dedić

Izdavač:

Za izdavača:

Tiraž:

Štampa:

Svako umnožavanje i kopiranje bez saglasnosti izdavača i autora nije dozvoljeno, i povlači zakonske sankcije.

PREDGOVOR

Udžbenik predstavlja prvi deo predmeta Osnovi mašinstva, koji držim studentima druge godine smera Prerada drveta. Podeljen je na četiri poglavlja i to: Tehnička termodinamika, Parni kotlovi, Pneumatika, Hidraulika. Cilj je bio da se studenti upoznaju sa: osnovnim termodinamičkim procesima, kružnim ciklusima, prostiranjem toplote, vodenom parom i vlažnim vazduhom, glavnim delovima i opremom parnog kotla, principom rada toplotne pumpe, vrstama ventilatora; proizvodnjom, skladištenjem, razvodom i distribucijom komprimovanog vazduha, kao primenom pneumatike i hidraulike u procesima prerade drveta. Udžbenik treba da posluži studentima da sagledaju energetske procese i transformacije u preradi drveta, koja su od posebnog značaja za formiranje profila inženjera prerade drveta, kao i da pruži osnove za predmete koje će studenti kasnije slušati, a pre svega: Hidrotermičku obradu drveta i Unutrašnji transport. Takođe, smatrao sam da će izdavanje Udžbenika olakšati studentima pripremu ispita iz predmeta Osnovi mašinstva. Studentima se svakako savetuje da prethodno ovladaju znanjima iz: Matematike, Tehničke fizike, Tehničke mehanike i Nacrtne geometrije.

Tokom rada na Udžbeniku uloženo je značajan napor kako bi se obimna i složena problematika sažela u nastavne jedinice u trajanju manje od jednog semestra, i prilagodila potrebama studenata Šumarskog fakulteta, imajući u vidu znanja koja su im potrebna za struku kojom će se baviti. Iza svakog poglavlja, a negde i potpoglavlja, dati su primeri rešenih zadataka koji treba da studentima pomognu pri praktičnom rešavanju konkretnih problema sa kojima se mogu sresti u inženjerskoj praksi.

Na kraju, želim da se zahvalim recenzentima na korisnim savetima i sugestijama, kao i svim čitaocima na eventualno uočenim greškama i dobronamernim primedbama, a u cilju poboljšanja kvaliteta ovog Udžbenika.

Autor

Sadržaj

I Tehnička termodinamika	6
1. Osnovni pojmovi i definicije	6
1.1 Predmet izučavanja i termodinamičke metode	6
1.2 Termodinamički pojmovi i osnove	5
1.3. Osnovni termodinamički procesi idealnog gasa	11
1.3.1. Politropski proces	11
1.3.2. Izobarski proces	12
1.3.3. Izohorski proces	13
1.3.4. Izotermni proces	13
1.3.5. Adijabatski proces	14
2. Kružni procesi	18
2.1 Karnoov ciklus	19
2.2 Otov kružni ciklus	20
2.3 Dizelov kružni ciklus	21
3. Prostiranje toplote	26
3.1 Osnovna razmatranja	26
3.2 Prostiranje toplote provodjenjem	20
3.2.1 Furijeov zakon	27
3.2.2 Specifični toplotni fluks za provodjenje toplote	28
3.3 Prelaženje toplote	29
3.4. Prolaz toplote - višeslojan cilindar	31
3.4.1 Specifični toplotni fluks za prolaz toplote	31
3.5 Zračenje toplote	32
4. Razmenjivači toplote	36
4.1 Rekuperativni razmenjivači toplote	36
4.2 Proračun razmenjivača toplote	38
5. Osnovna termodinamička svojstva tečnosti i pare	42
5.1 Fazni p-t dijagram. Trojna tačka	42
5.2 Vodena para. Fazni p-v dijagram	43
5.3 Veličine stanja vlažne pare	44
5.4 Pregrejana para	46
5.5 Termodinamički T-s i-s i dijagrami vodene pare	46
5.6. Promene stanja vodene pare	48
5.7 Isticanje iz mlaznika	50
5.8 Proces prigušivanja	53
6. Vlažan vazduh	60
6.1 Termodinamičke osobine vlažnog vazduha	60
6.2 Dijagrami za vlažan vazduh	62
6.2.1 i-x dijagram za vlažan vazduh	62
6.2.2 Psihometarski dijagram	64
6.3 Idealizovane termodinamičke promene stanja vlažnog vazduha	65
6.3.1 Proces izobarskog zagrevanja i hlađenja vlažnog vazduha	66
6.3.2. Izobarska-izentalpska promena stanja vlažnog vazduha	67
6.3.3 Proces izobarskog mešanja dve struje vlažnog vazduha	69
6.4 Merenje vlažnosti vazduha	70
6.4.1 Psihrometar	70
6.4.2 Higrometri na principu promene impedance	72

6.4.3 Higrometri sa dlakom	72
7. Toplotna pumpa	78
II Kotlovi	83
8. Goriva i priprema vode	83
8.1 Opšti pojmovi o gorivu	83
8.2 Podela goriva	84
8.2.1 Prirodna goriva	84
8.2.2 Veštačka goriva	85
8.3 Svojstva goriva	85
8.3.1 Elementarni sastav goriva	85
8.3.2 Toplotna moć goriva	86
8.4 Sagorevanje goriva	89
8.4.1 Potpuno sagorevanje goriva	89
8.4.2 Nepotpuno sagorevanje goriva	89
8.4.3 Temperatura paljenja goriva	89
8.4.4 Analiza vazduha potrebnog za sagorevanje goriva	89
8.4.5 Proces sagorevanja goriva	90
8.5 Priprema vode	90
8.5.1 Sastav vode za napajanje parnog kotla	90
8.5.2 Prečišćavanje vode za napajanje kotlova	91
8.6 Cirkulacija vode kod parnog kotla	94
8.7 Promaja kod parnog kotla	94
8.7.1 Prirodna promaja	95
8.7.2 Veštačka promaja	95
8.7.3 Promaja pomoću sisanja	95
9. Glavni delovi parnog kotla i njegovo funkcionisanje	97
9.1 Glavni delovi kotlovskog postrojenja	97
9.2 Opis rada kotlovskog postrojenja	98
9.3 Glavne karakteristike parnog kotla	100
9.3.1 Step en iskorišćenja parnog kotla	100
9.4 Tipovi konstrukcija kotlovskih ložišta	101
9.4.1 Zadatak kotlovskog ložišta	101
9.4.2 Ložišta sa mehaničkim loženjem	105
9.5 Tipovi i konstrukcije delova kotlovskog agregata	107
9.5.1 Zadatak delova kotlovskog agregata	107
9.5.2 Pregrejač pare	107
9.5.3 Zagrejač vode	108
9.5.4 Zagrejač vazduha	110
9.6 Tipovi i konstrukcije parnih kotlova	111
9.6.1 Kotlovi sa velikim sadržajem vode	111
9.6.2 Kotlovi sa malim sadržajem vode	114
9.7 Kotlovska armatura	115
9.7.1 Armatura parnog prostora	115
9.7.2 Armatura vodenog prostora	116
9.8 Toplovodni kotao na piljevinu	119
III Pneumatika	124
10.1 Uvod	124
10.2 Osnovne veličine pri strujanju vazduha	125
10.3 Kompresori	127
10.3.1 Klipni kompresori	128
10.3.2 Turbokompresori	131
10.3.3 Krilni kompresori	132
10.3.4 Vijčani kompresori	133

10.4 Rezervoar za vazduh	134
10.5 Cevovod i armatura	135
10.5.1 Priključci za cevi	137
10.5.2 Priključci za gumena creva	138
10.5.3 Priključci za plastične cevi	138
10.6 Prečišćavanje vazduha	139
10.6.1 Prečistač	140
10.6.2 Regulator pritiska	141
10.6.3 Zauljivač	141
10.6.4 Suvi i prečišćeni vazduh	142
10.6.5 Filter sa aktivnim ugljem	142
10.6.6 Gel-filter (adsorber)	143
10.7 Razvodnici	144
10.7.1 Označavanje razvodnika	144
10.7.2 Konstruktivna rešenja razvodnika	145
10.8 Ventili	146
10.8.1 Brzoispusni ventil	146
10.8.2 Nepovratni ventil	147
10.8.3 Prigušni ventil	148
10.9 Pneumatski motori	149
10.9.1 Rotirajući pneumatski motori	150
10.9.2 Pravolinijski pneumatski motori	151
10.10 Primeri primene pneumatike u drvenoj industriji	155
10.11 Klasifikacija i princip rada ventilatora	159
10.11.1 Radijalni ventilatori	159
10.11.2 Aksijalni ventilatori	160
10.12 Održavanje pneumatskih instalacija	162
10.13 Energetska efikasnost pneumatskih sistema	162
IV Hidraulika	172
11. 1 Osnovni princip hidrostatickog prenosa snage	172
11.2 Hidrauličke komponente	172
11.3 Hidrauličke pumpe i motori	173
11.4 Osnovni parametri rada hidrauličnih mašina	174
11.5 Hidraulične mašine	174
11.6 Hidraulični ventili	180
11.7 Razvodnici	183
11.8 Primena hidraulike u drvenoj industriji	186
11.9 Hidraulički sistemi i njihova regulacija	188
11.10 Održavanje hidrauličnih sistema	192
LITERATURA	195

Spisak korišćenih oznaka

$A \text{ (m}^2\text{)}$ – površina
 $c_p \text{ (J/kg} \cdot \text{K)}$ – masena (specifična) toplota pri const. pritisku
 $c_v \text{ (J/kg} \cdot \text{K)}$ – masena (specifična) toplota pri const. zapremini
 $F \text{ (N)}$ – sila
 $i \text{ (kJ/kg)}$ – specifična entalpija
 $i \text{ (-)}$ – kinematski prenosni odnos
 $k \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$ – koef. prolaza toplote
 $k \text{ (N/mm}^2\text{)}$ – specifični - jedinični deformacioni rad
 $k_r \text{ (daN/mm}^2\text{)}$ – specifični otpor rezanja
 $k \text{ (-)}$ – eksponent adijabate
 $L \text{ (J)}$ – zapreminski rad
 $l \text{ (J/kg)}$ – specifičan zapreminski rad
 $n \text{ (min}^{-1}\text{)}$ – br.obrta
 $n \text{ (-)}$ – eksponent politrope
 $M \text{ (Nm)}$ – moment sile
 $M \text{ (kg/kmol)}$ – molarna masa
 $m \text{ (kg)}$ – masa
 $P \text{ (W)}$ – snaga
 $Q \text{ (J)}$ – količina toplote
 $\dot{Q} \text{ (W)}$ – toplotni fluks
 $R \text{ (J/kg} \cdot \text{K)}$ – gasna konstanta
 $r \text{ (kJ/kg)}$ – toplota isparavanja (kondenzovanja) vode
 $S \text{ (kJ/K)}$ – entropija
 $S \text{ (kJ/kg} \cdot \text{K)}$ – specifična entropija
 $T \text{ (K)}$ – apsolutna temperatura
 $t \text{ (}^\circ\text{C)}$ – temperatura
 $t \text{ (s)}$ – vreme

Δu (J) – promena unutrašnje energije

V (m^3) – zapremina

$\dot{V}$ (m^3/s) – protok

v (m^3/kg) – specifi č na zapremina

α ($W/m^2 \cdot K$) – koeficijent prelaza toplote

δ (mm) – debljina

η (–) – stepen iskorišćenja (korisnog dejstva)

ε_g (–) – koeficijent grejanja

ε_h (–) – koeficijent hladjenja

λ (W/mK) – koeficient provodjenja toplote

ρ (kg/m^3) – gustina

φ (%) – relativna vlažnost vazduha

I TEHNIČKA TERMODINAMIKA

1. Osnovni pojmovi i definicije

1.1 Predmet izučavanja i termodinamičke metode

Reč termodinamika u svom izvornom značenju predstavlja nauku o energiji. Naziv potiče od starogrčkih reči *therme* - toplota i *dynamics* – onaj koji potiče od sile, što je nekada označavalo energiju. Iako se izdvojila kao posebna disciplina, može se reći da predstavlja deo klasične fizike. Predmet termodinamike je proučavanje svojstava energije, svih njenih oblika i zakonitosti transformacije energije u različitim fizičkim, hemijskim, tehničkim i tehnološkim procesima.

Koristeći deduktivne metode i bogat matematički aparat, termodinamika ne samo da je postala osnova savremene termoeenergetike, već su njeni pojmovi, metodi i zaključci koriste i u drugim disciplinama. Na primer, pojam entropije kao mere neuredjenosti nekog sistema (pojave) se proširio i na kibernetiku, telekomunikacije, biologiju i medicinu. Sa fenomenološkog stanovišta u termodinamici se proučavaju odnosi između makroskopskih veličina (energije, toplote, rada, temperature, pritiska, zapremine itd.). Zasniva se na malom broju aksioma (zakona termodinamike), koji sumiraju eksperimentalna i praktična iskustva i kojih ima ukupno četiri: nulti, prvi, drugi i treći.

Termodinamika se razvila u tri uzajamno povezane naučne discipline: opštu, hemijsku i tehničku termodinamiku.

U *opštoj termodinamici* se izučavaju teorijske osnove i principi, procesi pretvaranja energije u telima različitog agregatnog stanja, magnetne i električne pojave.

Hemijska termodinamika proučava pojave gde se procesi razmene energije ostvaruju promenom hemijskog sastava tela (sagorevanje, piroliza i sl).

Tehnička termodinamika opisuje i proučava procese uzajamnog pretvaranja toplote, kao i toplotne u mehaničku energiju i obratno, i predstavlja osnov za razumevanje rada: toplotnih mašina i uređaja (parnih kotlova i turbina, SUS motora, industrijskih peći, sušara, sistema daljinskog grejanja i sl.), rashladnih i klima uređaja, procesa prostiranja toplote i sl.

U okviru ovog kursa uglavnom će se izučavati tehnička termodinamika, mada će biti i dodirnih tačaka sa opštom i hemijskom termodinamikom.

1.2. Termodinamičke pojmovi i osnove

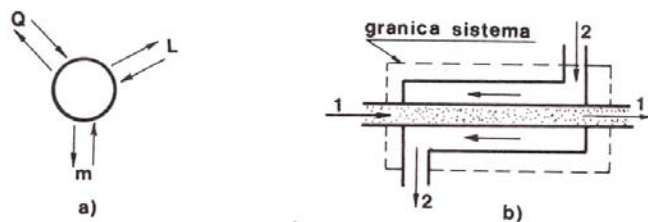
- Termodinamički sistem

Sva tela u nekom ograničenom delu prostora, koja su objekt proučavanja, a u uzajamnoj su vezi sa spoljnom sredinom nazivaju se *termodinamički sistem*.

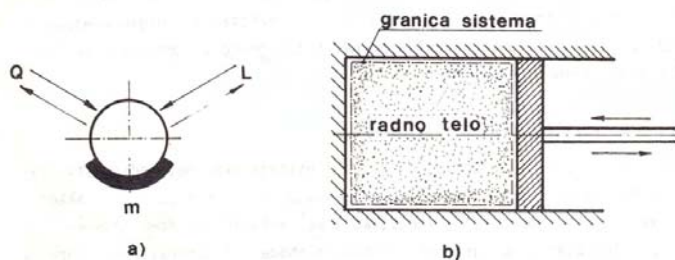
Otvoreni sistem onaj koji razmenjuje masu (supstancu) i energiju (toplotnu i mehaničku) sa svojom okolinom. Na slici 1a. je šematski prikazan otvoreni sistem. Lep primer otvorenog sistema bio bi razmenjivač toplote slika 1b.

Zatvoreni sistem je karakterističan po tome što nema razmene mase (protoka), ali je moguća razmena energije sa okolinom. Primer bi bili gubici toplote iz unutrašnjosti zatvorene prostorije koja se nalazi na višoj temperaturi, u okolni vazduh koji se nalazi na nižoj temperaturi.

Kod *poluizolovanih sistema* vrši se samo delimična razmena energije: ili samo toplotna energija – mehanički izolovan sistem (sl. 3a), ili samo mehanička energija – termički izolovan sistem (sl. 3b).



Slika 1: Otvoreni sistem: a)šematski prikaz, b)razmenjivač toplote



Slika 2: Zatvoreni sistem



Slika 3: Poluizolovan sistem: a) mehanički izolovan b) termički izolovan

- Radno telo u termodinamici

Radno telo u termodinamici je medijum koji obavlja termodinamički proces. To može biti: idealan gas, vodena para, vlažan vazduh ili komprimovan vazduh.

- Pojam idealnog gasa

Idealni gas predstavlja gas čiji se molekuli haotično kreću i imaju oblik pravilnih loptica beskonačno malog prečnika, ali konačne mase. Među molekulima (sem u momentima sudara) vladaju beskonačno male sile. Neki realni gasovi pri niskim pritiscima i visokim temperaturama se ponašaju približno idealnom gasu čime je njegovo uvođenje opravdano.

U praktičnom smislu to je gas čije je stanje daleko od stanja zasićenja.

- Veličine (parametri) stanja idealnog gasa.

To su fizičke veličine koje opisuju stanje idealnog gasa.

a) Temperatura

To je fizička veličina koja karakteriše toplotno stanje tela u odnosu na uslovno izabrano nulto stanje.

Apsolutna temperatura (T) je prema kinetičkoj teoriji gasova proporcionalna srednjoj kinetičkoj energiji translacionog kretanja velikog broja molekula na koji se mogu primeniti zakoni statističke mehanike. Apsolutna temperatura se izražava u Kelvinima a početak skale je apsolutna nula.

U Celzijusovoj skali, koja ima nesumljivu praktičnu primenu, stepen Celzijusa odgovara stepenu Kelvina, tj. temperaturna razlika od 1°C odgovara razlici od 1 K. Razlika je u tome što nula u Celzijusovoj skali odgovara 273,15 K tj. tačka topljenja leda pri normalnom atmosferskom pritisku od 101,325 kPa. Prema tome veza između temperature izražene u Kelvinima i Celzijusima je:

$$T(K) = 273,15 + t(^{\circ}C) \cong 273 + t(^{\circ}C)$$

Temperaturna razlika je uvek ista, bez obzira da li je izražena u Kelvinima ili stepenima Celzijusa, tj. $T_2 - T_1 = t_2 - t_1$

Postoji još i Farenhajtova i Reomirova skala. Tačka topljenja leda u Celzijusovoj, Farenhajtovoj i Reomirovoj skali je redom 0 °C, 32 °F i 0 °R a tačka ključanja vode 100 °C, 212 °F, 80 °R; pri $p = 101,325 \text{ kPa}$, pa je:

$$t(^{\circ}C) = 5/9 (t(^{\circ}F) - 32) = 5/4 t(^{\circ}R)$$

b) Pritisak

Apsolutni pritisak prema kinetičkoj teoriji gasova predstavlja zbir svih normalnih sila usled udara u pregradni zid molekula gasa sveden na jedinicu površine. Osnovna jedinica je Paskal (Pa).

Veza (Pa) sa ostalim jedinicama za pritisak data je u tabeli 1.1.

Tabela 1.1: Jedinice za pritisak

NAZIV	OZNAKA	Pa
1 bar	bar	10^5
1 milimetar vodenog stuba*	mmH ₂ O	9,81
1 milimetar živinog stuba**	mmHg, Torr	133,32
1 atmosfera	at	98100
1 fizička atmosfera	atm	101325

* pri 4 °C

** pri 0 °C

- Barometarski pritisak

To je atmosferski pritisak koji inače zavisi od temperature, vlažnosti i nadmorske visine. Za nominalnu vrednost se uzima 1 atm = 101,325 kPa

- Pojam nadpritiska i potpritiska

Razlika apsolutnog pritiska gasa i pritiska okoline (barometarskog pritiska) se naziva nadpritisk. Meri se manometrima i često se naziva i manometarski pritisak.

$$p_m = p - p_b$$

Ako je apsolutni pritisak nekog gasa u zatvorenom sudu manji od pritiska okoline razlika pritiska okoline i apsolutnog pritiska gasa naziva se potpritisk. Meri se vakuumetrima.

$$p_v = p_b - p$$

c) Specifična (jedinična) zapremina

To je zapremina svedena na jedinicu mase gasa koji tu zapreminu zauzima.

$$v = V/m \text{ (m}^3/\text{kg)}$$

- Oblici jednačine stanja idealnog gasa

Jednačina stanja idealnog gasa glasi:

$$pV = mRT \text{ (1)}$$

R - gasna konstanta koja zavisi od vrste gasa i predstavlja rad koji izvrši 1 kg gasa kad mu se temperatura promeni za 1 K pri konstantnom pritisku ($R = pV/mT$ (J/kgK)). Deljenjem jednačine sa (1) sa masom "m" dobijamo:

$$pv = RT \text{ (2)}$$

Ako se jednačina (2) pomnoži molarnom masom M (kg / kmol) dobijamo:

$$pV_M = MRT = R_u \cdot T / n$$

$$pV = nR_u \cdot T$$

$$n = m/M - \text{br. molova}$$

gde je: $V_M = vM$ - zapremina jednog kmola $V_M = 22,4 \text{ m}^3/\text{kmol} = 22,4 \text{ dm}^3/\text{mol}$

$R_u = M R$ - univerzalna gasna konstanta, $R_u = 8\,314 \text{ J/kmolK} = 8,314 \text{ J/molK}$

Prema jedn. (2) može se napisati:

$$p = \rho RT$$

gde je:

$\rho(\text{m}^3/\text{kg})$ - gustina gasa

- Entalpija

Entalpija (I) je veličina stanja i predstavlja termodinamički potencijal koji se sastoji iz termičkog potencijala (U) i spoljašnjeg mehaničkog potencijala (pV), izraženog preko veličine stanja materije:

$$I = U + pV \text{ (J)}$$

Nalazi veliku primenu kod vodene pare i pri analizi strujnih procesa.

- Entropija

Entropija (S) je veličina stanja koja povezuje apsolutnu temperaturu (T), takodje veličinu stanja, sa toplotom (Q) koja se odvodi ili dovodi izmedju dva stanja preko izraza:

$$Q = \int_{S_1}^{S_2} T \cdot dS$$

Kada S raste imamo dovodjene toplote, a kada opada odvodjenje.
Primenu nalazi kod formulacije Drugog zakona termodinamike i vodene pare.

- Smeša idealnih gasova

To su smeše gasova kod kojih između komponenata ne postoji hemijska reakcija, pa u tom slučaju važe svi zakoni gasova i jednačina stanja.

Svaki gas - komponenta smeše, stvara na zidove sudova pritisak, čija vrednost ne zavisi od prisustva drugih gasova u toj zapremini. Takav pritisak se naziva parcijalni pritisak gasa.

- Daltonov zakon

Pri konstantnoj temperaturi smeše, ukupan pritisak smeše gasova (koji hemijski međusobno ne reaguju) jednak je sumi parcijalnih pritisaka:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum_{k=1}^n p_k$$

gde je:

n - broj komponenata u datoj smeši.

- Relativna vlažnost

Relativna vlažnost (ϕ) je odnos parcijalnog pritiska vodene pare u vlažnom vazduhu (p_p) i parcijalnog pritiska vodene pare u zasićenom vlažnom vazduhu iste temperature (p_z).

$$\phi = p_p / p_z$$

Pritisak zasićenja (p_z) se odedjuje iz tablica ili preko analitičkog izraza u funkciji temperature. Tako je analitički izraz za pritisak zasićenja:

$$p_z = \frac{1}{10} \cdot e^{\left(75.0151 - \frac{7299,3}{T} - 8.593 \cdot \ln T + 0.0063064 \cdot T\right)} \quad (kPa)$$

- Prvi zakon termodinamike

Predstavlja oblik opšteg zakona o održanju energije koji je primenjen na toplotne promene stanja.

Najopštija matematička formulacija glasi:

$$Q_{12} = \Delta U + L_{12}$$

gde je:

$\Delta U = U_2 - U_1$ - promena unutrašnje energije između stanja 1 i 2.

Q_{12} - dovedena (odvedena) toplota radnom telu između stanja 1 i 2.

L_{12} - izvršen (uložen) zapreminski rad između stanja 1 i 2.

Dakle, jedan deo dovedene količine toplote troši se na promenu unutrašnje energije radnog tela a drugi na vršenje rada. Da bi se toplota odvela od tela potrebno je uložiti rad.

- Drugi zakon termodinamike

O uslovima koji moraju biti zadovoljeni pri transformaciji toplotne energije u rad govori drugi zakon termodinamike.

Načelna formulacija je da su svi termički procesi nepovratni. Samim tim promena entropije (ΔS) adijabatski (toplotno) izolovanog sistema koga sačinjavaju: radno telo, toplotni izvor (zagrejač) i toplotni ponor (hladnjak) ne može biti negativna.

Ekvivalentna formulacija bila bi da toplota ne može spontano prelaziti sa hladnijeg na toplije telo bez ulaganja rada ili drugih kompenzacija u sistemu. Takođe, sva toplota izvora ne može se pretvoriti u mehanički rad.

1.3 Osnovni termodinamički procesi idealnog gasa

1.3.1. Politropski proces

Objedinjuje sve osnovne procese (izobarski, izohorski, izotermni i adijabatski) tj. one procese pri kojima maseni toplotni kapacitet ima proizvoljnu, ali konstantnu vrednost tokom celog procesa.

Maseni toplotni kapacitet pri konstantnom pritisku (c_p) je količina toplote koju treba dovesti jedinici mase gasa da bi mu se temperatura povisila za 1 K pri const. pritisku.

Maseni toplotni kapacitet pri konstantnoj zapremini (c_v) je količina toplote koju treba dovesti jedinici mase gasa da bi mu se temperatura povisila za 1 K pri const. zapremini.

$$\frac{c_p}{c_v} = k - \text{eksponent adijabate}$$

$$c_p - c_v = R - \text{Majerova relacija}$$

Tabela 1.2 : Molarni toplotni kapacitet i odnos molarnih toplotnih kapaciteta $k = (Mc_p) / (Mc_v)$ idealnih gasova (prema kinetickoj teoriji gasova)

Idealni gas	Mc_v		Mc_p		k
	$\frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$	$\frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$	
Jednoatomni	12.5	3	20.8	5	1.67
Dvoatomni	20.8	5	29.1	7	1.40
Troatomni i višeatomni	29.1	7	37.4	9	1.28

Tabela 1.3 : Fizičke osobine nekih idealnih gasova

Gas	$M \cdot 10^3$	R	c_p	c_v	k
	$\frac{\text{kg}}{\text{mol}}$	$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	-
Amonijak	17	489	2.20	1.71	1.28
Argon	40	208	0.52	0.31	1.67
Azot	28	297	1.04	0.74	1.40
Kiseonik	32	260	0.91	0.65	1.40
Neon	20	416	1.04	0.62	1.67
Ugljen dioksid	44	189	0.85	0.66	1.28
Ugljen monoksid	28	297	1.04	0.74	1.40
Vazduh	29	287	1.00	0.72	1.40
Vodonik	2	4157	14.55	10.40	1.40

Jednačina politrope je :

$$pV^n = \text{const}$$

gde je :

n - eksponent politrope

Rad procesa razmene toplote i unutrašnje energije :

$$L = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \frac{1}{n-1} (p_1 V_1 - p_2 V_2) = \frac{mR}{n-1} (T_1 - T_2)$$

$$Q = mc(T_2 - T_1) = m \cdot c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1)$$

$$\Delta U = mc_v \cdot (T_2 - T_1) \text{ -isto za sve procese}$$

Indeks '1' označava početno a indeks '2' krajnje stanje gasa .

1.3.2 Izobarski proces (sl. 4)

$$p = \text{const} ; n = 0$$

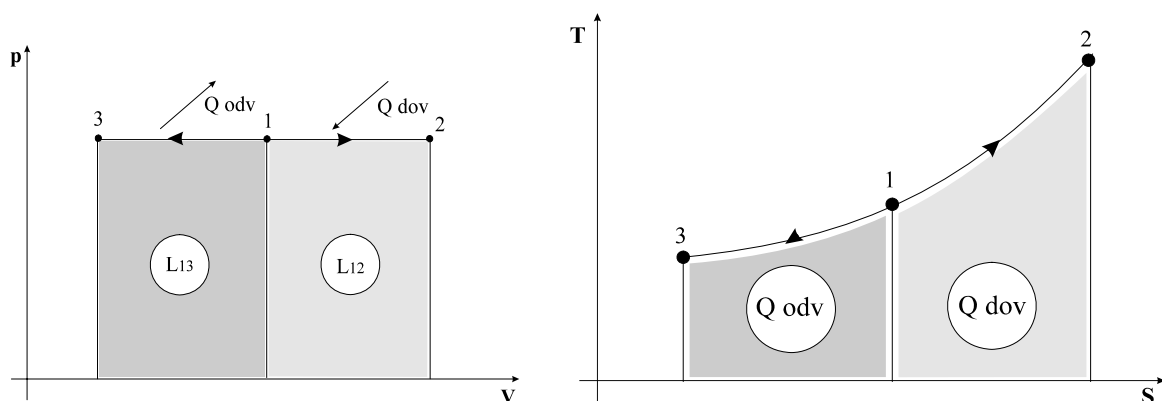
Iz jednačine stanja (1):

$$\frac{V}{T} = \text{const} ; \frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} \text{ - Gej - Lisakov zakon}$$

$$L = mR(T_2 - T_1)$$

$$Q = mc_p(T_2 - T_1)$$

$$\Delta U = Q - L = m \cdot (c_p - R) \cdot (T_2 - T_1) = mc_v(T_2 - T_1)$$



Slika 4: Izobarski proces u p-V i T-s dijagramu

Kako je $Q = \int T dS$ kada S raste imamo dovodjenje toplote (Q dov) , a kada opada odvodjenje (Q odv).

1.3.3 Izohorski proces (sl. 5)

$$V = \text{const}, n = \infty$$

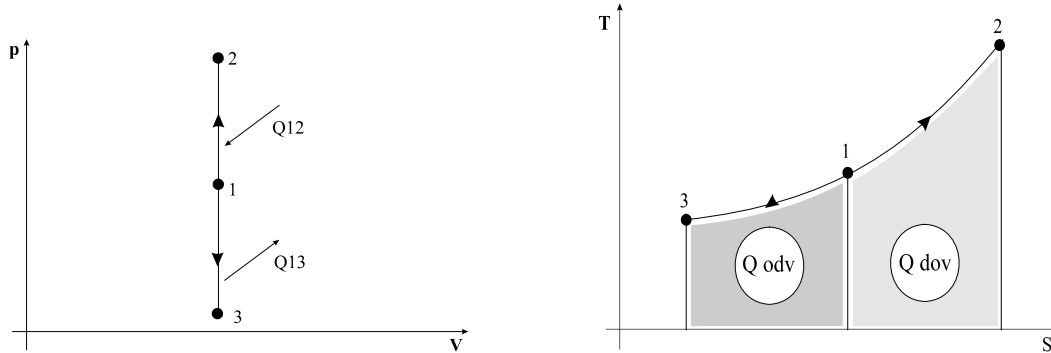
Iz jednačine stanja (1):

$$\frac{p}{T} = \text{const}; \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad - \text{Šarlov zakon}$$

Dovodena toplota ide na povećanje unutrašnje energije .

$$Q = \Delta U = mc_v(T_2 - T_1)$$

$$L = 0$$



Slika 5: Izohorski proces u p-V i T-s dijagramu

1.3.4 Izotermni proces (sl. 6)

$$T = \text{const}, n = 1$$

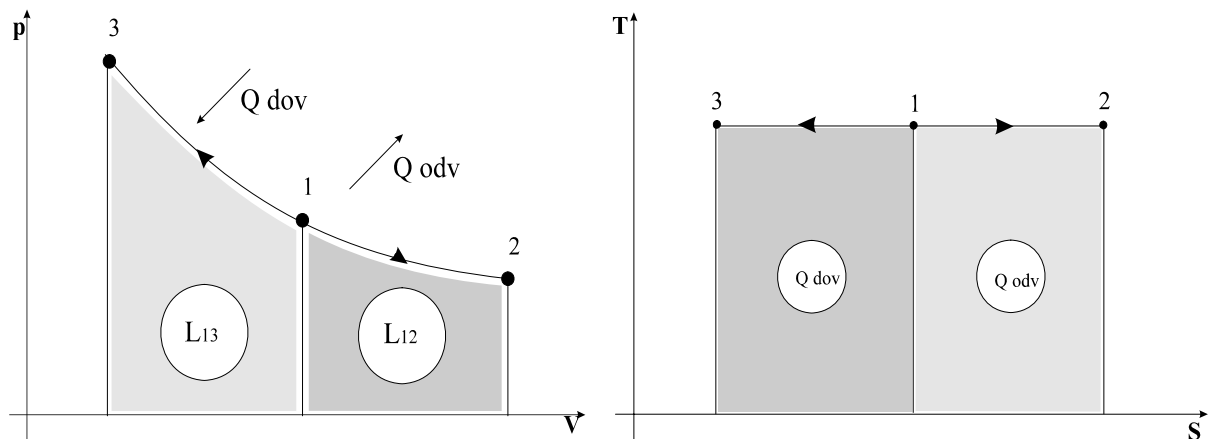
Iz jednačine stanja (1):

$$pV = \text{const} \rightarrow p_1V_1 = p_2V_2 \quad \text{Bojl - Mariotov zakon}$$

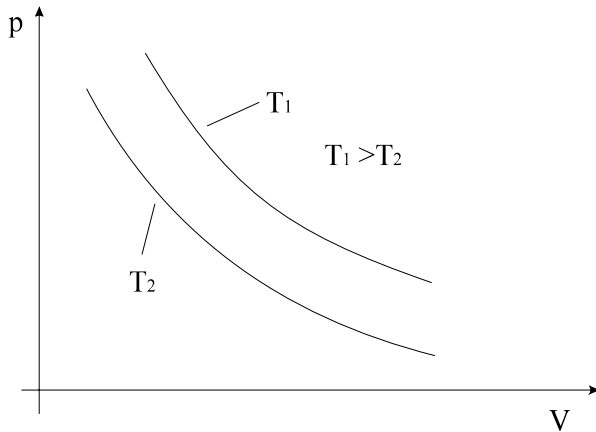
Sva dovedena toplota troši se na vršenje rada :

$$Q = L = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{V_1}^{V_2} mRT \frac{dV}{V} = mRT \ln \frac{V_2}{V_1} = p_1V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = mRT_1 \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$\Delta U = 0$$



Slika 6: Izotermni proces u p-V i T-s dijagramu



Slika 7: Izoterma više i niže temperature u p-V dijagramu

1.3.5 Adijabatski proces (sl. 8)

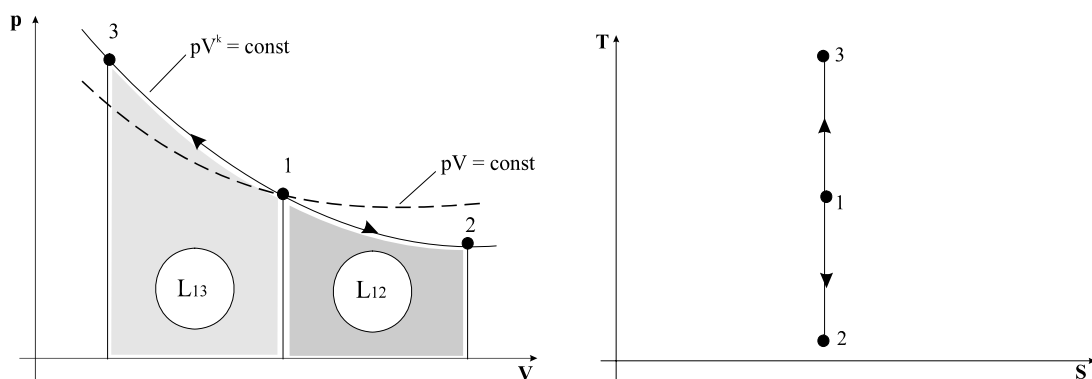
$Q = 0$, $n = k$, $k = 1,4$ – za dvoatomne gasove

$pV^k = \text{const}$ – jednačina adijabate

Rad se vrši na račun promene unutrašnje energije

$$L = -\Delta U = mc_v(T_1 - T_2) \text{ ili}$$

$$L = \frac{mR}{k-1}(T_1 - T_2) = \frac{1}{k-1}(p_1V_1 - p_2V_2)$$

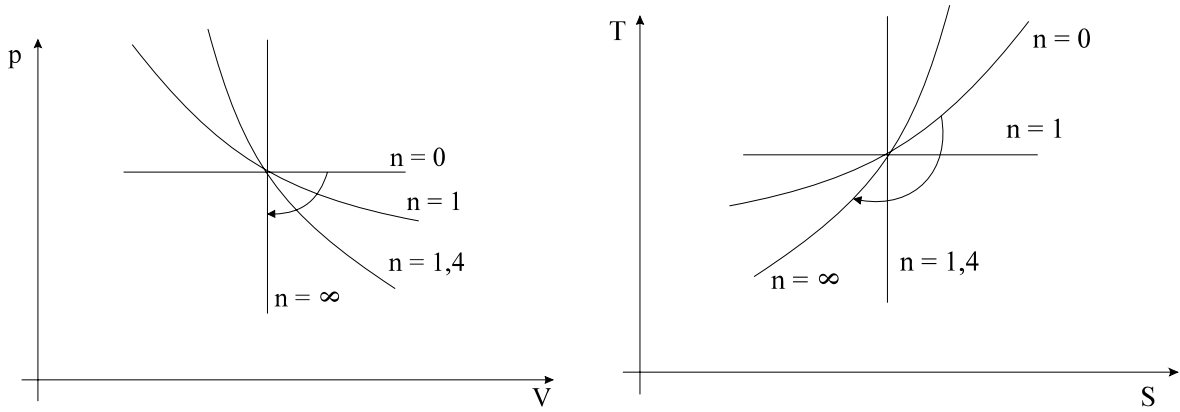


Slika 8: Adijabatski proces u p-V i T-s dijagramu

Sa slike 8. se iz P-V dijagrama vidi da je adijabata “strmija” od izoterme. To je jasno imajući u vidu i same jednačine adijabatskog i izotermnog procesa.

Kako je u početku ovog poglavlja to već istaknuto, politropski proces objedinjuje sve osnovne procese (izobarski, izohorski, izotermni i adijabatski). Stoga su dijagrami ovih procesa prikazni objedinjeno na slici 9.

Treba još objasniti dva pojma koji se često čuju u tehničkoj praksi, a to su: kompresija i ekspanzija. Kompresija ili sabijanje predstavlja proces pri kome se smanjuje zapremina radnog tela, a ekspanzija (širenje) predstavlja povećavanje zapremine radnog tela.



Slika 9: Politropski procesi u p-V i T-s dijagramu

- Primeri rešenih zadataka:

1. U rezervoaru const zapremine nalazi se vazduh pritiska 4 bara i temperature 10 °C. Za koliko se promeni pritisak vazduha ako se temperatura (izražena u °C) poveća za 50 %.

Rešenje:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \rightarrow p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 4 \cdot \frac{288}{283} = 4,07 \text{ bar}$$

$$t_2 = t_1 + 0,5t_1 = 10 + 0,5 \cdot 10 = 15^\circ \text{C} \rightarrow T_2 = t_2 + 273 = 288 \text{K}$$

$$\Delta p = p_2 - p_1 = 4,07 - 4 = 0,07 \text{ bar} = 700 \text{Pa}$$

Pritisak se promeni za 700Pa

2. Uporediti radove pri adijabatskom i politropskom procesu ($n=1.2$) koje vrši 1 kmol vodonika ($R=4157 \text{ J / kgK}$) izmedju temperature 20°C i 60°C.

Rešenje:

Masa vodonika bice :

$$m = \text{br. kmol} \cdot M = 1 \cdot 2 = 2 \text{kg}$$

gde je :

$$M = 2 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} - \text{molarna masa vodonika data u tablici 3.}$$

Sada je rad pri politropskom procesu :

$$L_p = \frac{mR}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{2 \cdot 4157}{1.2 - 1} (293 - 333) = -1662.8 \text{ kJ}$$

Rad pri adijabatskom procesu bice :

$$L_a = \frac{mR}{k-1} (T_1 - T_2) = \frac{2 \cdot 4157}{1.4 - 1} \cdot (-40) = -831.4 \text{ kJ}$$

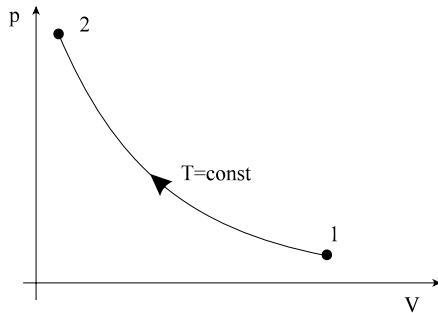
Dakle, rad pri adijabatskom procesu je duplo manji od politropskog kod koga je $n = 1,2$. Znak minus ukazuje da se radi o ulozenom radu.

3. Masa od 3 kg kiseonika ($R = 260 \text{ J/kgK}$) pritiska $p_1 = 1 \text{ bar}$ i temperature $t_1 = 20^\circ\text{C}$, sabija se izotermno do zapremine 0.43 m^3 .

1. Predstaviti proces u P-V dijagramu.
2. Do kog pritiska treba vršiti izotermno sabijanje, koju toplotu pri tom treba odvesti i naći rad u tom slučaju ?

Rešenje :

1.) Pogledati sliku 10.



Slika 10.

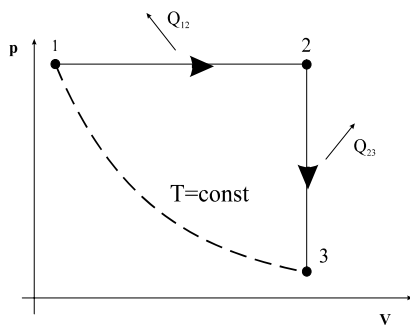
$$2.) V_1 = \frac{mRT_1}{p_1} = \frac{3 \cdot 260 \cdot 293}{10^5} = 2,3 \text{ m}^3$$

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \rightarrow p_2 = p_1 \cdot \frac{V_1}{V_2} = 1 \cdot \frac{2,3}{0,46} = 5 \text{ bar}$$

$$L = Q = mRT_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = 3 \cdot 260 \cdot 293 \cdot \ln \frac{1}{5} = -367821 \text{ J} \cong -368 \text{ kJ}$$

4. U cilindru prečnika 60 cm nalazi se 0.31 m^3 vazduha čija je temperatura 37°C , a pritisak 0.423 bar . Na koju temperaturu mora da se zagreje vazduh pri stalnom pritisku da bi se klip koji se kreće bez trenja pomerio za 40 cm ? Koji pritisak se uspostavi u cilindru ako se klip utvrdi u tom položaju, a temperatura opet opadne na 37°C ? Izračunati izvršeni rad, ukupnu promenu unutrašnje energije i razmenjenu količinu toplote, i prikazati proces u p-V dijagramu. Gasna konstanta je $R = 287 \text{ J/kgK}$, a specifična toplota pri const. pritisku $1 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$, a pri const. zapremini $0.72 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$.

Rešenje:



Slika 11.

Zapremina u stanju 2 :

$$V_2 = V_1 + \frac{D^2 \pi}{4} \cdot h = 0.31 + \frac{0.6^2 \pi}{4} = 0.423 m^3$$

Koriscenjem jedn. izobare za proces 1 - 2 dobija se :

$$T_2 = T_1 \cdot \frac{V_2}{V_1} = 310 \cdot \frac{0.423}{0.31} = 423 K$$

Pritisak u stanju 3 određen je jedn. izohore 2 - 3 :

$$p_3 = p_2 \cdot \frac{T_3}{T_2}$$

Kako je usled izobarskih procesa 1 - 2 pritisak $p_1 = p_2$, a tačke 1 i 3 leže na istoj izotermi imamo tako da je $T_1 = T_3$ pa se predhodna jednakost može napisati kao :

$$p_3 = p_1 \cdot \frac{T_1}{T_2} = 0.423 \cdot \frac{310}{423} = 0.31 \text{ bar}$$

Ukupan rad i razmenjena količina toplote dobija se sabiranjem za pojedinačne delove ciklusa :

$$L_{13} = L_{12} + L_{23} = L_{12} = p_1 (V_2 - V_1) = 0.423 \cdot 10^5 \cdot (0.423 - 0.31) = 4780 J$$

$$\Delta u = \Delta u_{12} + \Delta u_{23} = m \cdot c_v (T_2 - T_1) + m \cdot c_v (T_3 - T_2) = m \cdot c_v (T_3 - T_1) = 0$$

$$Q_{13} = Q_{12} + Q_{23} = m \cdot C_p (T_2 - T_1) + m \cdot c_v (T_3 - T_2) = 3 \cdot 10^{-4} \cdot [10^3 \cdot (423 - 310) + 0.72 \cdot 10^3 (310 - 423)] = 9.5 J$$

5. Količini od 1,5 kg vodonika se dovede pri izohorskom procesu 3237 kJ toplote, a zatim se pri izobarskoj kompresiji zapremina smanji za 40%. Početni parametri vodonika su : $p_1 = 0.8 \text{ bar}$ i $t_1 = 10^\circ \text{C}$. Predstaviti proces u P-V dijagramu i izračunati rad, promenu unutrašnje energije i količinu razmenjene toplote. Za vodonik je : $c_v = 10.4 \text{ kJ/kgK}$, $R = 4157 \text{ J/kgK}$

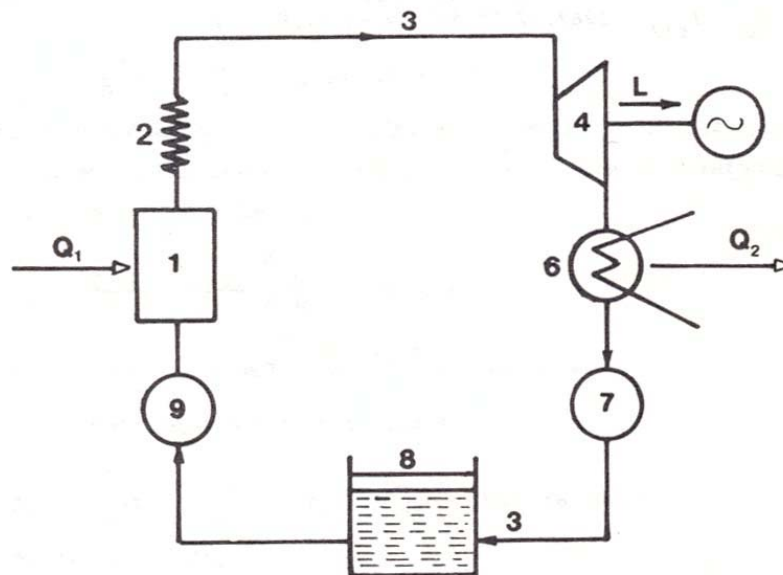
Rešenje:

$$L = -1223.4 kJ, \Delta U = 176.3 kJ, Q = -1048 kJ$$

2 . Kružni procesi. Karnoov, Otov i Dizelov ciklus

Kružni proces je onaj kod koga se na račun razmenjene količine toplote *stalno* dobija koristan rad.

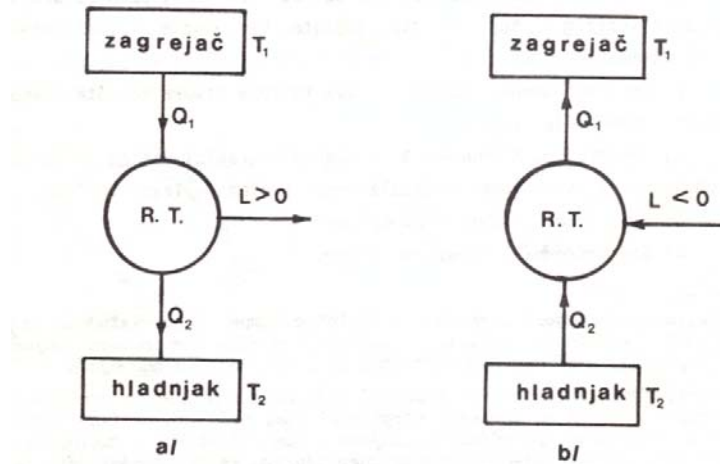
Primer jednog kružnog procesa kod jednog toplotnog postrojenja dat je na slici 12. U kotlu (1) toplota produkata sagorevanja se predaje (dovodi) radnom telu – vodi. Voda se zagreva, isparava, pregreva u pregrejaču pare (2), a zatim vodovima (3) odlazi u parnu turbinu (4), gde se širi (ekspandira), čime se odbija korisna mehanička energija (L). Tako dobijena energija se dalje predaje nekoj radnoj mašini, na primer generatoru električne energije (5). Iskorišćena para se zatim odvodi u kondenzator (6), gde se pri stalnom vakuumu, rashladnom vodom odvodi toplota Q_2 i kondenzuje para. Kondenzovana para se zatim pumpom (7) prebacuje u napojni rezervoar (8), a odatle se napojnom pumpom (9) ponovo vraća u kotao, čime se započeti ciklus završava.



Slika 12: Toplotno postrojenje

Preko termodinamičkog modela (tzv. toplotne mašine) može se prikazati rad bilo koje realne mašine (postrojenja). U pogledu smera odvijanja procesa mogu da nastanu dva različita slučaja:

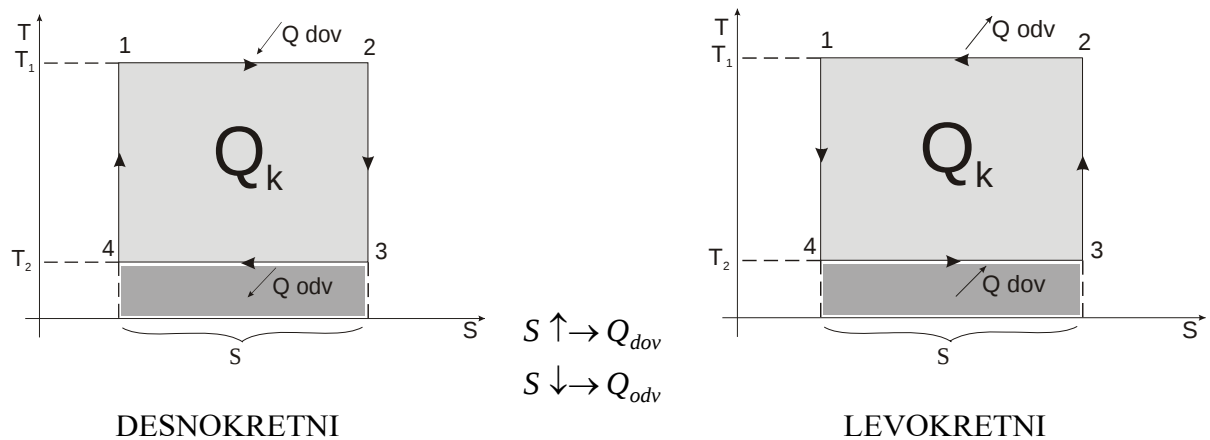
- Količina toplote Q_1 se od zagrejača predaje radnom telu, koje vrši rad nad okolnom sredinom, pri čemu se neiskorišćena toplota Q_2 predaju hladnjaku, što je slučaj kod *toplotnog motora* (sl. 13a).
- Količina toplote Q_2 se odvodi od hladnjaka utroškom rada i predaje se količina toplote Q_1 zagrejaču, čime se održava niska temperatura hladnjaka, što odgovara *mašinama za hladjenje* (sl. 13b); ili se pak podizanjem toplote u hladnjaku na višu temperaturu, uz utrošak rada, i njenim dovodjenjem zagrejaču održava potrebna viša temperatura zagrejača, što je potrebno kod *toplotnih pumpi* (sl. 13b).



Slika 13: Princip rada: a) toplotnog motora, b) rashladne mašine (ili toplotne pumpe)

2.1. Karnoov ciklus

Sastoji se iz dve izoterme i dve adijabate. Ima najveći stepen iskorišćenja jer su mu svi procesi povratni. Zato predstavlja samo idealizaciju onoga šta se dešava kod realnih toplotnih motora i u mašinama za hladjenje.



Slika 14: Karnoov ciklus

Stepen iskorišćenja ciklusa odnosi se na desnokretni ciklus prisutan kod toplotnih motora .

$$\eta_{tc} = \frac{\text{korisno}}{\text{uloženo}} = \frac{Q_k}{Q_{dov}} = \frac{Q_{dov} - |Q_{odv}|}{Q_{dov}} = \frac{T_1 \cdot \Delta S - |T_2 \cdot \Delta S|}{T_1 \cdot \Delta S} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$0 < \eta_{tc} < 1$$

Zanimljivo je ukazati, kao što vidimo, da η_{tc} zavisi samo od temperature zagrejača (toplotnog izvora) T_1 , i hladnjaka (toplotnog ponora) T_2 .

Takodje treba ukazati i na primenu II zakona termodinamike koji nam prema promeni entropije (S) određuje kada imamo dovodjenje, a kada odvodjenje toplote. Naime kada S opada imamo odvodjenje, a kada raste dovodjenje toplote (sl. 14).

Levokretni predstavlja idealizaciju realnih procesa u mašinama za hladjenje ili toplotnim pumpama.

Efektivnost ciklusa mašina za hladjenje izražava se **koeficijentom hladjenja**,

$$\varepsilon_{hc} = \frac{\text{korisno}}{\text{uloženo}} = \frac{Q_{dov}}{Q_k} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

a efektivnost ciklusa toplotnih pumpi **koeficijentom grejanja**.

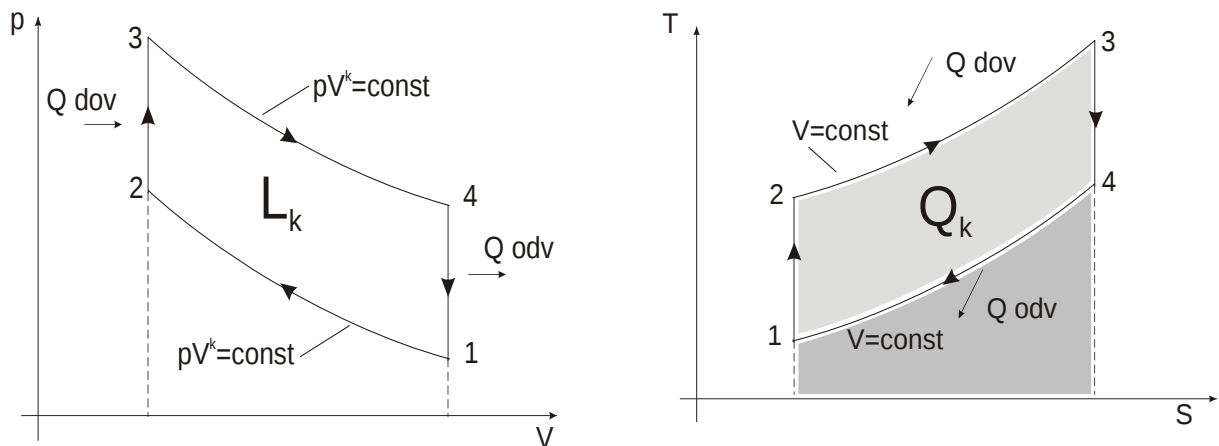
$$\varepsilon_{gc} = \frac{\text{korisno}}{\text{uloženo}} = \frac{|Q_{odv}|}{Q_k} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = 1 + \varepsilon_{hc}$$

2.2. Otov kružni ciklus

Ovaj termodinamički kružni ciklus prisutan je kod benzinskih motora sa unutrašnjim sagorevanjem. Ciklus je prikazan na slici 15 i to u p-v i T-s koordinatnom sistemu.

Pošto se radi o desnokretnom ciklusu koji je prisutan kod toplotnih mašina, stepen iskorišćenja ciklusa biće:

$$\eta = \frac{L_K}{Q_{dov}}$$



Slika 15: Otov kružni ciklus

Osnovni termodinamički procesi u samom ciklusu su sledeći:

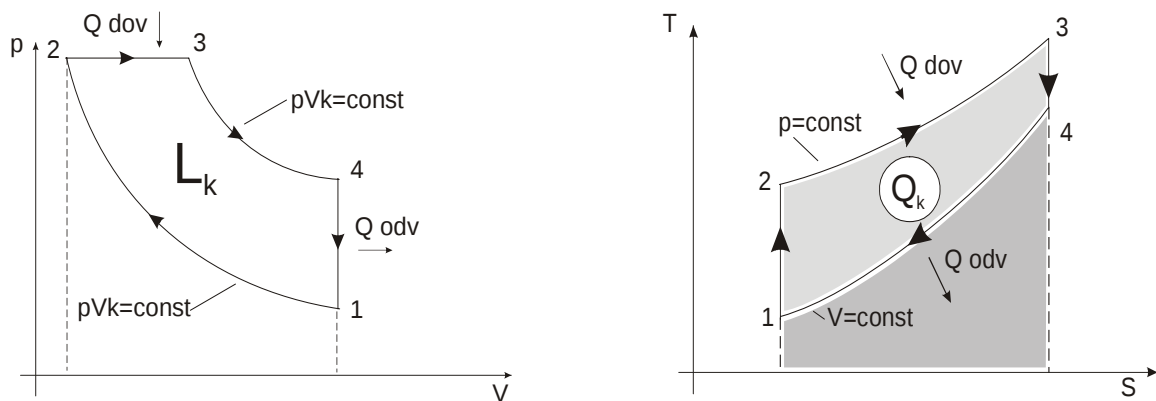
- 1-2 adijabatska kompresija (sabijanje smeše goriva-benzina i vazduha putem klipa u cilindru)

- 2-3 izohorsko dovodjenje toplote (paljenje smeše putem inicijalne varnice iz svećice, malo pre dolaženja klipa u gornju mrtvu tačku)
- 3-4 adijabatska ekspanzija (sagorevanjem smeše klip se potiskuje ka donjoj mrtvoj tački, jedini proces kojim se dobija rad u ciklusu)
- 4-1 izohorsko odvodjenje toplote (u tački 4 otvaranje izduvnog ventila i izbacivanje produkata sagorevanja, a u tački 1 otvaranje usisnog ventila nakon zatvaranja izduvnog i uzimanje smeše benzina i vazduha iz karburatora).

2.3 Dizelov kružni ciklus

Termodinamički ciklus prisutan kod motora koji koriste dizel gorivo. Ciklus je prikazan na slici i to u p-v i T-s koordinatnom sistemu (slika 16). stepen iskorišćenja ciklusa biće:

$$\eta = \frac{L_K}{Q_{dov}}$$



Slika 16: Dizelov kružni ciklus

Kao što vidimo kada poredimo ovaj ciklus sa Otovim ciklusom, jedinu razliku predstavlja deo proces 2-3, gde kod Dizelov ciklusa imamo izobarsko dovodjenje toplote. Zapravo za razliku od benzinskog motora gde imamo paljenje smeše benzina i vazduha putem inicijalne varnice, ovde dolazi do samopaljenja dizel goriva koje se ubrizgava posredstvom pumpe u cilindar u kome je prethodno sabijen vazduh na visoki pritisak. Dizel je na ovaj način primenio ciklus koji će se sve više približiti idealnom Karnoovom ciklusu.

Primeri rešenih zadataka

1. Gasu koji obavlja desnokretni Karnoov ciklus dovedena je toplota od 250 kJ . Termički stepen iskorišćenja ciklusa 0.46 . Koliki je ostvareni rad i odvedena toplota ?

Rešenje :

$$\eta_{tc} = \frac{L_k}{Q_{dov}} \rightarrow L_k = \eta_{tc} \cdot Q_{dov} = 0.46 \cdot 250 = 115 \text{ kJ}$$

$$|Q_{odv}| = Q_{dov} - L_k = 250 - 115 = 135 \text{ kJ}$$

2. U sušari za drvo agens sušenja (vlažni vazduh) se greje toplotnom pumpom , pri čemu se hladnjak pumpe nalazi u vodi temperature $t_2 = 4^\circ\text{C}$, a temperatura koju dostiže grejač je $t_1 = 60^\circ\text{C}$. Koliki je koeficijent grejanja ako smatramo da pumpa radi po Karnoovom ciklusu ?

Rešenje :

$$\varepsilon_g = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{333}{333 - 277} = 5.94 = \frac{|Q_{odv}|}{L_k}$$

Znači pumpom se predaje toplota vazduhu 5.94 puta veća od uloženog rada . Drugim rečima, utroškom električne energije od 1 kWh , dobija se 5.94 kWh toplote za grejanje , no treba imati u vidu da je ovo samo idealizacija levokretnog Rankin - Klauzisonovog ciklusa koji se dešava u toplotnoj pumpi .

3. Odrediti koristan rad i stepen iskorišćenja Otovog ciklusa koji se odigrava sa 1 kg vazduha (idealni gas) za koga je $c_v = 0.72 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$, a temperature na početku i kraju adijabatske kompresije redom $T_1 = 303 \text{ K}$ i $T_2 = 765 \text{ K}$; dok su temperature na početku i na kraju adijabatske ekspanzije $T_3 = 1225 \text{ K}$ i $T_4 = 598 \text{ K}$ respektivno .

Rešenje :

Za izohorske procese dovedena i odvedena toplota biće (slika 15) :

$$Q_{dov} = Q_{23} = m c_v \cdot (T_3 - T_2) = 1 \cdot 0.72 \cdot (1225 - 765) = 331.2 \text{ kJ}$$

$$Q_{odv} = Q_{41} = m c_v \cdot (T_1 - T_4) = 1 \cdot 0.72 \cdot (303 - 598) = -212.4 \text{ kJ}$$

$$L_k = Q_{dov} - |Q_{odv}| = 331.2 - 212.4 = 118.8 \text{ kJ}$$

$$\eta_t = \frac{L_k}{Q_{dov}} = \frac{118.8}{331.2} = 0.359 \text{ odnosno } 35.9\%$$

4. 1m^3 vazduha početnog stanja: $p_1 = 1\text{bar}$ i $t_1 = 17^\circ\text{C}$ izvodi Otov ciklus. Pritisak posle adijabatskog sabijanja iznosi $p_2 = 12\text{bar}$. Količina dovedene toplote ciklusu iznosi 1500kJ. Masene količine toplote pri stalnom pritisku i zapremini su: $c_p = 1\text{kJ/kgK}$ i $c_v = 0.72\text{kJ/kgK}$ a gasna konstanta $R = 287\text{kJ/kgK}$. Naći:

- 1) Osnovne veličine stanja u karakterističnim tačkama
- 2) Količinu odvedene toplote
- 3) Koristan rad
- 4) Termički stepen iskorišćenja ciklusa

Rešenje:

stanje 2:

$$1) p_1 \cdot V_1 = m \cdot R \cdot T_1 \rightarrow m = \frac{p_1 \cdot V_1}{R \cdot T_1} = \frac{10^5 \cdot 1}{287 \cdot 290} = 1.2 \text{ kg}$$

$$v_1 = \frac{V_1}{m} = \frac{1}{1.2} = 0.833 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$p_1 \cdot v_1^k = p_2 \cdot v_2^k \rightarrow v_2 = v_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1/k} = 0.833 \cdot \left(\frac{1}{12} \right)^{1/1.4} = 0.141 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$T_2 = \frac{p_2 \cdot v_2}{R} = \frac{12 \cdot 10^5 \cdot 0.141}{287} = 588.6 \text{ K}$$

stanje 3:

$$v_3 = v_2$$

$$T_3 = T_2 + \frac{Q_{23}}{m \cdot c_v} = 2324.7 \text{ K}$$

$$p_3 = \frac{R \cdot T_3}{v_3} = 3947878 \text{ Pa} = 39.48 \text{ bar}$$

stanje 4:

$$v_4 = v_1$$

$$p_4 = p_3 \cdot \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^k = 3.28 \text{ bar}$$

$$T_4 = \frac{p_4 \cdot v_4}{R} = 953.1 \text{ K}$$

Veličine stanja prikazane su u sledećoj tabeli:

stanje	p (bar)	v (m ³ /kg)	T (K)
1	1	0.833	290
2	12	0.141	588.6
3	39.48	0.141	2324.7
4	3.28	0.833	953.1

$$2) Q_{41} = m \cdot c_v \cdot (T_1 - T_4) = -573 \text{ kJ}$$

$$3) L_k = Q_{23} - |Q_{41}| = 927 \text{ kJ}$$

$$4) \eta_t = \frac{L_k}{Q_{23}} = 0.618 \text{ ili } 61.8\%$$

5. Odrediti razmenjenu količinu toplote, koristan rad i stepen iskorišćenja teoretskog Dizelovog ciklusa koji se odvija sa 1 kg vazduha (idealni gas) za koga je $c_v = 0.72 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$, temperature na početku i na kraju adijabatske kompresije redom $T_1 = 301 \text{ K}$ i $T_2 = 889 \text{ K}$; dok su temperature na početku i kraju adijabatske ekspanzije $T_3 = 1300 \text{ K}$ i $T_4 = 681 \text{ K}$ respektivno.

Rešenje :

Za razliku od Otovog ciklusa različit je deo 2-3 (slika 16) na kome dolazi do samopaljenja usled ubrizgavanja goriva u komprimovan vazduh u cilindru.

Dovedena toplota pri izobarskom procesu biće (slika 16) :

$$Q_{dov} = Q_{23} = mc_p = (T_3 - T_2) = 1 \cdot 1.01 \cdot (1300 - 889) = 415.1 \text{ kJ}$$

$$c_p = k \cdot c_v = 1.4 \cdot 0.72 = 1.01 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

Toplota se odvodi pri izohorskom procesu i to :

$$Q_{odv} = Q_{41} = mc_v (T_1 - T_4) = 1 \cdot 0.72 \cdot (301 - 681) = -273.6 \text{ kJ}$$

Koristan rad ciklusa :

$$L_k = Q_{dov} - |Q_{odv}| = 415.1 - 273.6 = 141.5 \text{ kJ}$$

Termodinamički stepen iskoriscenja

$$\eta_t = \frac{L_k}{Q_{dov}} = \frac{141.5}{415.1} = 0.341 \text{ tj. } 34.1\%$$

6. Za Dizelov kružni ciklus odrediti parametre stanja u karakterističnim tačkama, koristan rad, termički stepen iskorišćenja i količinu odvedene i dovedene toplote. Dato je: $p_1=1\text{bar}$, $t_1=17^\circ\text{C}$, stepen kompresije $\varepsilon=12.5$, stepen predširenja $\rho=2$. Radno telo je vazduh.

Rešenje:

stanje 1:

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} = 0.832 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

stanje 2:

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} \rightarrow v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = 0.066 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = 796.5 \text{ K}$$

$$p_2 = \frac{R \cdot T_2}{v_2} = 34.6 \text{ bar}$$

stanje 3:

$$\rho = \frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2} = 2 \rightarrow v_3 = v_2 \cdot \rho = 0.132 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$T_3 = T_2 \cdot \rho = 1593 \text{ K}$$

$$p_3 = p_2 = 34.6 \text{ bar}$$

stanje 4:

$$v_4 = v_1 = 0.832 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$p_4 = p_3 \cdot \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^k = 2.63 \text{ bar}$$

$$T_4 = T_1 \cdot \frac{p_4}{p_1} = 762.3 \text{ K}$$

Dovedena toplota u izobarskom procesu biće:

$$q_d = c_p \cdot (T_3 - T_2) = 796.5 \text{ kJ / kg}$$

Odvedena toplota u izohorskom procesu je:

$$q_o = c_v \cdot (T_1 - T_4) = -340 \text{ kJ / kg}$$

Koristan rad:

$$l_k = q_d - |q_o| = 456.5 \text{ kJ}$$

Termički stepen iskorišćenja:

$$\eta_t = \frac{l_k}{q_d} = 0.573 \quad \text{ili} \quad 57.3\%$$

3. PROSTIRANJE TOPLOTE

3.1 Osnovna razmatranja

U prirodi i svakodnevnoj praksi imamo dosta česte primere prostiranja toplote. Na primer: Sunce zagreva vazduh, vodu i zemlju i daje toplotu neophodnu za živi svet na Zemlji; kad spremamo jelo na ringli šporeta to je jedan vid prostiranja toplote, kad ga pečemo u rerni drugi, a kad ga podgrevamo u mikrotalasnoj pećnici treći; ili kad grejemo stambene objekte jedan deo toplote kao gubitak stalno odlazi kroz zidove. S toga izučavanje teorije *prostiranja toplote* omogućava da se prostiranje u tehničkoj praksi smanji ili poveća, u zavisnosti od potrebe, i reši niz problema u različitim oblastima tehničke prakse.

Postoje 3 osnovna načina prostiranja toplote:

- provodjenje (kondukcija)
- prelaženje (konvekcija)
- zračenje (radijacija)

Provodjenje toplote se odvija u mikro razmerama sa jednog molekula na drugi. Molekuli toplijeg dela tela zbog svog haotičnog kretanja sudaraju se sa susednim ('hladnijim') molekulima i predaju im deo svoje kinetičke energije. Taj proces se postepeno rasprostire na čitavom telo, što se manifestuje izjednačavanjem temperature po celoj zapremini. Karakteristično je za čvrsta tela, mada je svojstveno i za tečnu i gasovitu fazu.

Prelaženje toplote je molarni vid prostiranja toplote tj. da bi do njega došlo neophodno je kretanje dela mase (mola) fluida (tečnosti ili gasa). Makroskopskim pomeranjem u prostoru različito zagrejani delovi fluida prenose određenu količinu toplotne energije. Konvekcija može biti prouzrokovana prirodnim strujanjem fluida (npr. duvanje vetra, talasi i morske struje, strujanje vode izazvano gravitacijom i sl.) i tada govorimo o **prirodnoj** konvekciji, a može biti i **prinudna** i to kada je strujanje izazvano veštačkim putem (ventilatorom, kompresorom, pumpom, fenom i sl.)

Zračenje (radijacija) predstavlja specifični vid prostiranja toplote. Toplotna energija se pretvara u energiju zračenja – energiju elektromagnetnih talasa, koji se prostiru kroz prostor (čak i vakuum) i kada naidju na drugu materiju ponovo se pretvaraju u toplotnu energiju.

U praksi se najčešće pojavljuju prva dva načina zajedno i onda govorimo o kombinovanom načinu prostiranja toplote - **prolaženjem** (provodjenje + prelaženje) mada se mogu pojaviti i sva tri osnovna vida prostiranja toplote zajedno.

3.2 Prostiranje toplote provodjenjem

U opštem slučaju temperatura je različita u pojedinim tačkama tela i menja se u toku vremena tj.:

$$T = f (x, y, z, \tau) \quad (1)$$

gde su:

x, y, z – koordinate razmatrane tačke

τ – vreme

Funkcija (1) definiše temperatursko polje u razmatranom telu. Temperatursko polje daje vrednosti temperatura svih tačaka pomenutog tela u datom trenutku vremena.

Ukoliko temperatura tela zavisi i od koordinata i od vremena, takvo temperatursko polje je **nestacionarno**, a njemu odgovara nestacionarno provodjenje toplote. Kada je temperatura tela funkcija samo koordinata i ne menja se u toku vremena tj.:

$$T = f(x, y, z); \quad \frac{\partial T}{\partial \tau} = 0,$$

onda je temperatursko polje **stacionarno**.

Temperatura može da bude funkcija jedne, dve ili sve tri koordinate, pa se odgovarajuće temperatursko polje naziva: jedno, dvo ili trodimenzionalno.

Sve tačke tela koje imaju istu temperaturu obrazuju površinu jednakih temperatura, koja se naziva **izotermska površina**.

3.2.1 Furijeov zakon

Prema Furijeovom zakonu količina toplote dQ koja se prostire kroz elementarnu površinu dA neke izotermske površine, za interval vremena $d\tau$ je:

$$dQ = -\lambda \cdot \text{grad } T \cdot dA \cdot d\tau \quad (\text{J}) \quad (2)$$

gde je:

λ (W/(mK))- toplotna provodnost.

Toplotna provodnost (λ) je fizička veličina koja zavisi od vrste materijala (Tabela 3.1). Znak minus na desnoj strani jednačine (2) pokazuje da temperatura opada u pravcu prostiranja toplote.

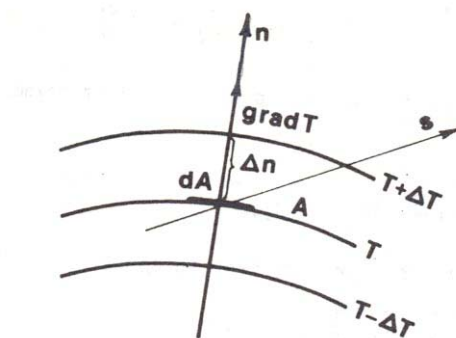
U tehničkoj praksi se umesto količine toplote često sračunava količina toplote u jedinici vremena i ona se naziva **toplotni protok** ili **toplotni fluks**. Imajući u vidu (2) elementarni toplotni protok je:

$$d\dot{Q} = \frac{dQ}{d\tau} = -\lambda \cdot \text{grad } T \cdot dA,$$

dok je specifični toplotni fluks:

$$\dot{q} = \frac{d\dot{Q}}{dA} = -\lambda \cdot \text{grad } T = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}.$$

Gradijent temperature je vektor normalan na izotermsku površinu, usmeren u stranu porasta temperature i brojno je jednak parcijalnom izvodu temperature po normali (slika 17).



Slika 17: Gradijent temperature

Tabela 3.1: Termička provodnost nekih tehničkih materijala i slojeva

redni broj	materijal	termička provodnost λ (W/mK)
1	ter papir	0.19
2	iverica	0.12
3	mineralna vuna	0.046
4	gipsana ploča	0.213
5	vazdušni sloj	0.3
6	drveni kosi bokovi	0.141
7	plastična pena	0.038
8	puna opeka	0.42
9	šamot	1.02
10	šperploča	0.14
11	izolaciona vlaknatica	0.141
12	azbestno-cementni sloj	0.088
13	PVC-folija	0.19
14	čelik	58.5
15	liveno gvoždje	50
16	mesing	117.5
17	cementni malter	1.2
18	krečni malter	0.7

Najbolji provodnici toplote su metali, kod kojih je $\lambda = 20 \div 420 \text{ W/(mK)}$. Kod metala λ opada sa temperaturom. Materijali sa $\lambda < 0,25 \text{ W/(mK)}$ se primenjuju za toplotnu izolaciju.

Kod tečnosti toplotna provodnost se smanjuje sa porastom temperature i u proseku iznosi $0,07 \div 0,7 \text{ W/(mK)}$.

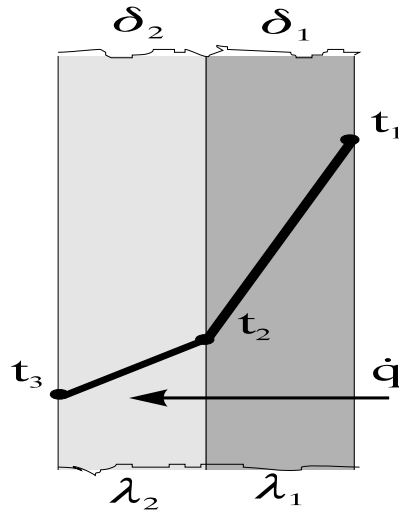
Najlošije provode toplotu gasovi. Toplotna provodnost gasova praktično ne zavisi od pritiska, a raste sa porastom temperature. On se kreće u granicama $0,006 \div 0,6 \text{ W/(mK)}$, pri čemu se gornja granica odnosi na gasove na početku Periodnog sistema elemenata (vodonik i helijum). Na primer za vazduh pri 0°C je $\lambda = 0,024 \text{ W/(mK)}$.

3.2.2 Specifični toplotni fluks za provodjenje toplote

a) Za **ravan zid** sastavljen od n-slojeva:

$$\dot{q} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} = \frac{\Delta t}{R_{uk}} = k \cdot \Delta t \quad (3)$$

Na slici 18 prikazano je provodjenje kroz dvoslojni zid.

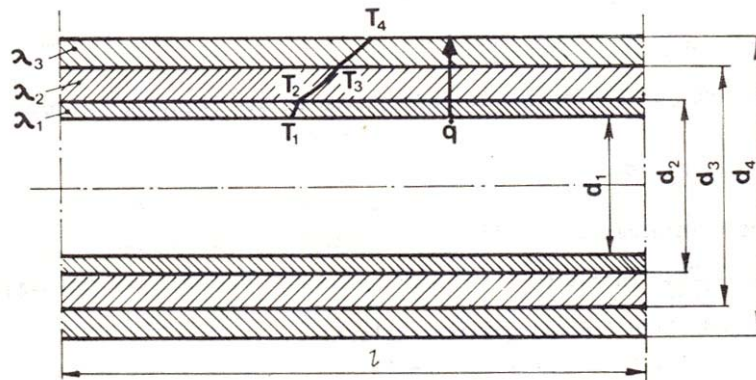


Slika 18: Provodjenje toplote kroz dvoslojan ravan zid

b) Za **cilindar** sastavljen od n-slojeva.

$$\dot{q} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} = \frac{\Delta t}{R_{uk}} = k \cdot \Delta t \quad (4)$$

Na slici 19 prikazano je provodjenje toplote kroz troslojan cilindar.



Slika 19: Provodjenje toplote kroz troslojan cilindar

3.3 Prelaženje toplote

Kako je to već napomenuto u uvodnom delu, prelaženje (konvekcija) postoji samo kod tečnosti ili gasova (fluida) koji se pomeraju u prostoru. Ako fluid temperature t_f struji (sl. 20) pored granične površine-zida temperature t_z ($t_f > t_z$) količina toplote koja predje sa fluida na zid (ili obrnuto kada je $t_z > t_f$) biće:

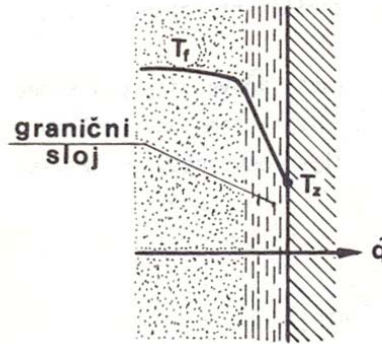
$$Q = \alpha \cdot A \cdot (t_f - t_z) \cdot \tau \quad (5)$$

gde su:

α (W/(mK)) – koeficijent prelaza toplote

A (m²) – površina kroz koju se prostire toplota

τ (s) – vreme prostiranja toplote



Slika 20: Prelaz toplote u graničnom sloju

I ovde je pogodno izraziti specifični toplotni fluks kao:

a) Za **ravan zid**

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{t_f - t_z}{\frac{1}{\alpha}} \quad (6)$$

b) Za **cilindar**

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{l} = \frac{t_f - t_z}{\frac{1}{\pi \cdot d \cdot \alpha}} \quad (7)$$

Koeficijent prelaza toplote (α) je brojno jednak specifičnom toplotnom protoku, pri jediničnoj razlici temperatura. Treba istaći da koeficijent α nije konstantan već zavisi od niza faktora:

- uzroka strujanja,
- temperature fluida,
- režima strujanja (laminarni ili turbulentni),
- fizičkih svojstava fluida,
- oblika i dimenzija zida.

Koeficijent (α) se određuje primenom teorije sličnosti procesa koja sadrži analitičke i eksperimentalne metode istraživanja.

3.4 Prolaženje toplote

Kako je već napomenuto u uvodnom delu, u praksi se najčešće sreće kombinovani način prostiranja toplote – prolaženjem. Predstavlja prostiranje kondukcijom i konvekcijom između dva fluida različitih temperatura, koji su međusobno razdvojeni zidom proizvoljnog oblika.

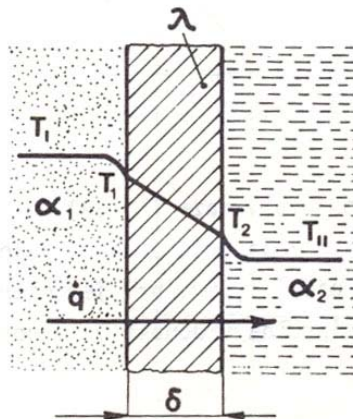
U termotehnici ima mnogo primera ovakvog prostiranja toplote: od produkata sagorevanja kroz zidove kotla na vodu, sa tople vode (ili pare) kroz zidove grejnog tela – radijatora na okolni vazduh itd. U ovim slučajevima zid treba da ima visoku termičku provodnost (λ). Međutim, pri prostiranju toplote iz zagrejane prostorije (stana, proizvodne hale, sušare, parionice i sl.) ka spolja treba smanjiti toplotne gubitke. To se postiže postavljanjem izolacionog materijala, sa malim λ .

3.4.1 Specifični toplotni fluks za prolaz toplote

a) Ravan zid sastavljen od n-slojeva

$$q = \frac{t_I - t_{II}}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{\Delta t}{R_{uk}} = k \cdot \Delta t \quad (8)$$

Na slici 21. prikazan je prolaz toplote kroz jednoslojan ravan zid.

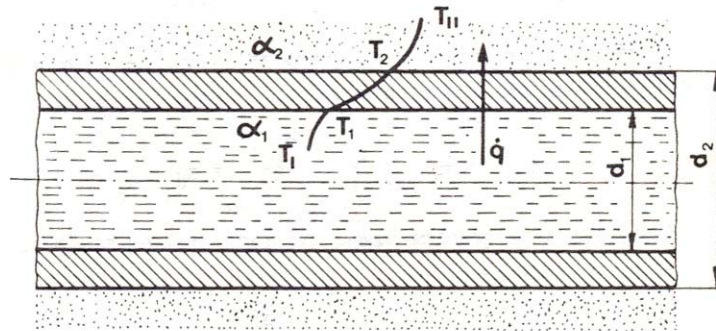


Slika 21: Prolaz toplote kroz ravan zid

b) Cilindar sastavljen od n-slojeva

$$q = \frac{t_I - t_{II}}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot \pi \cdot d_1} + \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot \pi \cdot d_2}} = \frac{\Delta t}{R_{uk}} = k \cdot \Delta t \quad (9)$$

Na slici 22. prikazan je prolaz toplote kroz jednoslojan cilindar.



Slika 22: Prolaz toplote kroz cilindar

- Ukupni toplotni protok (fluks)

a) Za ravan zid

$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot A$$

gde su za $\dot{q}$ uzeti izrazi iz 3) i 8)

b) Za cilindričan zid

$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot l$$

gde su za $\dot{q}$ uzeti izrazi iz 4) i 9)

- Količina toplote predata prostiranjem

$$Q = \dot{Q} \cdot \tau$$

3.5 Zračenje toplote

Svako telo čija je temperatura iznad apsolutne nule, može da emituje u okolni prostor elektromagnetne talase različite dužine. Elektromagnetni talasi, kao što je poznato, predstavljaju oscilovanje električnog i magnetnog polja.

Zračenje tela zavisi od njegove prirode, temperature i stanja površine. Toplotno zračenje određeno je samo temperaturom i optičkim svojstvima tela koje zrači.

Od ukupne energije koja se dozrači na površinu nekog tela (E), jedan deo će biti apsorbovan (E_a), drugi odbijen – reflektovan (E_r), a treći će proći kroz to telo (E_d), tj.:

$$E_a + E_r + E_d = E$$

Ako sada podelimo ovu jednačinu sa E dobija se:

$$\frac{E_a}{E} + \frac{E_r}{E} + \frac{E_d}{E} = 1 \quad (10)$$

odnosno:

$$a + r + d = 1$$

gde su:

a – koeficijent apsorpcije (deo dozračene energije koji telo upija)

r - koeficijent refleksije (deo dozračene energije koji se odbija od tela)

d - koeficijent dijametrije (deo dozračene energije koji prolazi kroz telo)

Izraz (10) predstavlja jednačinu toplotnog balansa energije zračenja.

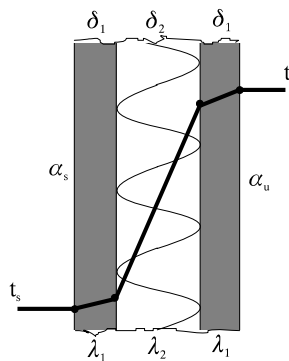
- Ako je $a=1$ (tj. $r=d=0$) telo apsorbuje svu dozračenu energiju. Takvo telo naziva se *apsolutno crno telo*. U prirodi takvih tela nema, a najpribližniji svojstvima apsolutno crnog tela je čadj (gar) kod koga je $a=0,9\div 0,96$.
- Kada je $r=1$ ($a=d=0$) telo odbija (reflektuje) svu energiju zračenja. Ukoliko se energija odbija u svim pravcima, takva površina tela se naziva *apsolutno bela*.
- Na kraju, kada je $d=1$ ($a=r=0$) telo propušta svu dozračenu energiju i naziva se *apsolutno prozračnim telom*.

U prirodi ne postoje apsolutno crna, bela i prozračna tela. Realna tela imaju koeficijente a, r, d manje od jedinice.

- Primeri rešenih zadataka

1. Odrediti koeficijent prolaza toplote, otpor provodjenju toplote, jedinični protok, kao i količinu toplote koja za vreme od 3 h prodje kroz zid sačinjen od 2 sloja iverice dimenzija 500 x 250 x 1.5 cm ($\lambda_1 = 0.12 \frac{W}{mK}$) i jednog sloja mineralne vune dimenzija 500 x 250 x 8 cm ($\lambda_2 = 0.046 \frac{W}{mK}$). Koeficijent prelaza toplote prema unutrašnjem i spoljnjem vazduhu su redom $\alpha_u = 10 \frac{W}{m^2K}$ i $\alpha_s = 25 \frac{W}{m^2K}$, a razlike temperature izmedju umutrašnjeg vazduha i okoline 20°C

Rešenje :



Slika 23

Koeficijent prolaza toplote dobićemo iz izraza za otpor prolazu toplote koji je zbir otpora usled provodjenja i prelaženja.

$$R_{\text{prolaza}} = R_{\text{un.pr.}} + R_{\text{prov.}} + R_{\text{sp.pr.}}$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_u} + \frac{2\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_s} = \frac{1}{10} + \frac{2 \cdot 0.015}{0.12} + \frac{0.08}{0.046} + \frac{1}{25} = 2.13 \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}}$$

$$k = \frac{1}{2.13} = 0.47 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Otpor provodjenju toplote:

$$R_{\text{prov.}} = \frac{1}{k} - \frac{1}{\alpha_u} - \frac{1}{\alpha_s} = 2.13 - \frac{1}{10} - \frac{1}{25} = 1.99 \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}}$$

ili:

$$R_{\text{prov.}} = \frac{2\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} = 1.99 \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}}$$

Jediničan protok toplote je:

$$\dot{q} = k \cdot \Delta t = 0.47 \cdot 20 = 9.4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Ukupan toplotni protok biće:

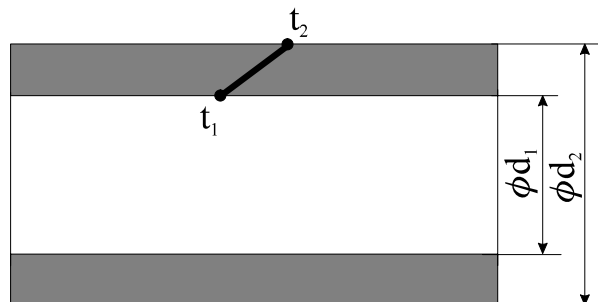
$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot A = 9.4 \cdot 5 \cdot 2.5 = 117.5 \text{ W}$$

a količina toplote:

$$Q = \dot{Q} \cdot \tau = 117.5 \cdot 3 \cdot 3600 = 1269000 \text{ J} = 1269 \text{ kJ}$$

2. Odrediti temperaturu spoljašnje površine mesingane cevi ($\lambda = 117.5 \text{ W/mK}$) čiji je spoljašnji prečnik 100 mm, debljina zida cevi 5 mm, ako je temperatura unutrašnjeg zida 230°C . Količina toplote koja se u toku 1 h preda provodjenjem sa unutrašnje na spoljašnju površinu cevi po 1 m dužnom 5.5 GJ.

Rešenje:



Slika 24

Jedini č ni protok bice :

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{l \cdot \tau} = \frac{5.5 \cdot 10^9}{1 \cdot 3600} = 1527778 \frac{W}{m}$$

$$d_1 = d_2 - 2\delta = 100 - 2 \cdot 5 = 90mm$$

$$\dot{q} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}$$

$$t_2 = t_1 - \frac{\dot{q}}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} = 230 - \frac{1527778}{2\pi \cdot 117.5} \ln \frac{100}{90} = 12^\circ C$$

3. Parovodom se transportuje vodena para iz parnog kotla za potrebe grejanja pogona, sušare i parionice. Ako su: unutrašnji prečnik parovoda 120mm , debljina zida cevi od čelika 8 mm ($\lambda_w = 58.5 \text{ W/mK}$), debljina izolacije od mineralne vune 20 mm ($\lambda_{mv} = 0.046 \text{ W/mK}$), koeficijent prelaza toplote sa pare na unutrašnji zid cevi ($\alpha_u = 1300 \text{ W/m}^2 \text{ K}$), koeficijent prelaza sa izolacije na okolni vazduh ($\alpha_s = 15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$). Potrebno je odrediti otpor toplotnom prolazu i koeficijent prolaza toplote .

Rešenje :

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{d_u \pi \alpha_u} + \frac{1}{2\pi\lambda_w} \ln \frac{d_s}{d_u} + \frac{1}{2\pi\lambda_{mv}} \ln \frac{d_{mv}}{d_s} + \frac{1}{d_{mv} \pi \alpha_s} =$$

$$= \frac{1}{0.12 \cdot 3.14 \cdot 1300} + \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 58.5} \ln \frac{136}{120} + \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 0.046} \ln \frac{176}{136} + \frac{1}{0.176 \cdot 3.14 \cdot 15} = 1.015 \frac{mK}{W}$$

predhodno je sra č unato :

$$d_s = d_u + 2\delta_u = 120 + 2 \cdot 8 = 136mm$$

$$d_{mv} = d_s + 2\delta_{mv} = 136 + 2 \cdot 20 = 176mm$$

koeficijent prolaza toplote :

$$k = \frac{1}{R} = \frac{1}{1.015} = 0.985 \frac{W}{mK}$$

4. Razmenjivači toplote

Primeri razmene toplote veoma su česti u svakodnevnom životu. Prisutni kod svih grejnih i rashladnih sistema i uređaja: kotlovskih postrojenja, daljinskog grejanja, sušara, klima uređaja, frižidera, zamrzivača i sl. Takodje, razmena toplote između dva fluida prisutna je i prilikom mešanja dvokomponentnih boja i lakova, gde se komponente pre mešanja nalaze na različitim temperaturama.

Uređaji u kojima se razmenjuje toplota između dva fluida pri čemu se jedan fluid hladi, a drugi greje nazivaju se **razmenjivači toplote**. Kada se razmena toplote obavlja u svrhu grejanja, fluid na višoj temperaturi se naziva grejni fluid (fluid kojim se greje), a onaj na nižoj temperaturi se naziva grejani fluid (fluid koji se greje). U obrnutom slučaju, kada je cilj razmene toplote hlađenje, onaj fluid kojim se hladi naziva se rashladni fluid, a onaj koji se hladi – hladjeni fluid.

Najčešća konstrukcija razmenjivača toplote je takva da su grejni i grejani fluid tokom rada fizički odvojeni grejnom (rashladnom) površinom, kroz koju prolazi toplota od toplijeg ka hladnijem fluidu. Međutim, mogu postojati i takvi razmenjivači gde preko iste grejne površine struje naizmenično oba fluida. Kada preko grejne površine struji topliji fluid, ona akumulira izvesnu količinu toplote koju odaje onda kada preko nje struji hladniji fluid. Zajedničko za obe navedene vrste razmenjivača toplote je da se toplota u njima razmenjuje posredstvom grejne površine. Razlika je u tome što je kod prve grupe razmena toplote *stacionarna*, jer su fluidi razdvojeni preko grejne površine čija se temperatura praktično ne menja. Kod drugih koji se nazivaju i regeneratori, grejna površina se naizmenično greje i hladi u toku razmene toplote, što čini ovakvu razmenu toplote *nestacionarnom*.

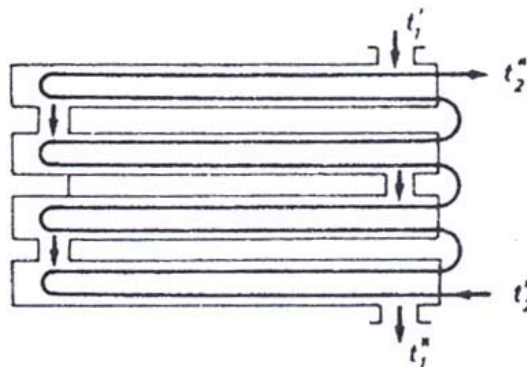
U sledećem poglavlju biće govora o samo prvoj spomenutoj vrsti razmenjivača, *rekuperativnim*, kod kojih su fluidi prilikom razmene razdvojeni grejnom površinom.

4.1 Rekuperativni razmenjivači toplote

Kod rekuperativnih razmenjivača toplote prilikom njene razmene fluidi se najčešće kreću jedan u odnosu na drugi, odnosno protiču kroz razmenjivač toplote. Pravac i smer kretanja jednog fluida u odnosu na drugi definiše i podelu ovih razmenjivača i to na:

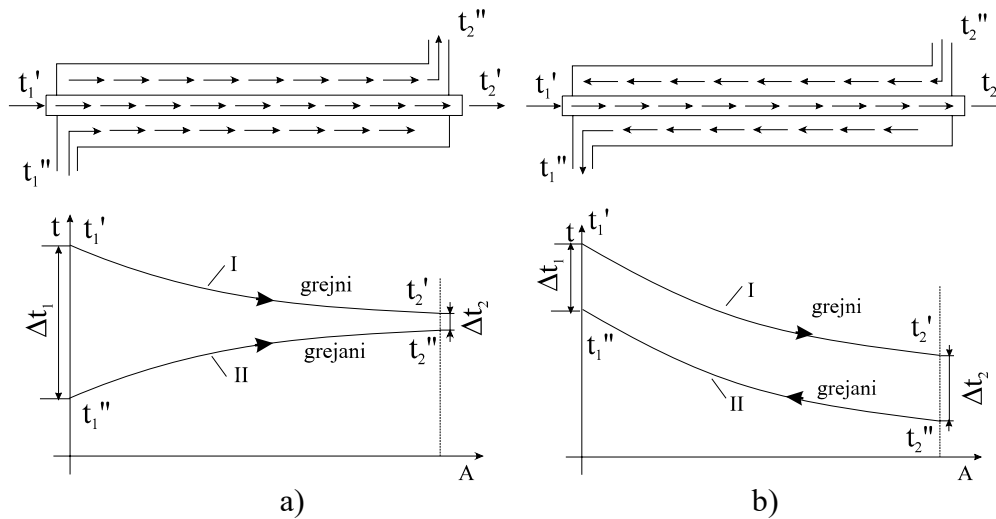
1. razmenjivače sa paralelnim (istosmernim) tokom
2. razmenjivače sa suprotnosmernim tokom
3. razmenjivače sa unakrsnim tokom

Skica razmenjivača toplote sa unakrsnim tokom kod koga se pravci kretanja fluida međusobno upravni data je na slici 25.



Slika 25: Razmenjivač toplote sa unakrsnim tokom

Skica razmenjivači sa istosmernim i suprotnosmernim tokom, sa promenama temperatura duž grejne površine, data je na slici 26.



Slika 26: Razmenjivači toplote sa: a) istosmernim, b) suprotnosmernim tokom

Sa slike 26. se vidi da je oznakom I označen grejni, a oznakom II grejani fluid. U označavanju temperatura oznaka ' je za grejni, a '' za grejani fluid. Isto tako indeks 1 u označava temperature na ulazu u razmenjivač, a indeks 2 temperature na izlazu iz razmenjivača (kod suprotnosmernog razmenjivača se ovo označavanje vrši prema grejnom fluidu).

Uvedimo oznaku $\dot{W}$ koja predstavlja toplotni kapacitet fluida u jedinici vremena:

$$\dot{W} = \dot{m} \cdot \bar{c} = \rho \cdot \dot{V} \cdot \bar{c}$$

gde je:

$\bar{c} \left(\frac{J}{kgK} \right)$ - srednji specifični toplotni kapacitet fluida, jer fluid može znatno promeniti temperaturu od ulaza do izlaza iz razmenjivača.

Kako istu količinu toplote u jedinici vremena grejni fluid predaje grejanom, razmenjeni toplotni fluks između ova dva fluida iskazuje se jednačinom:

$$\begin{aligned} \dot{Q}' &= \dot{Q}'' \\ \dot{W}' \cdot \Delta t' &= \dot{W}'' \cdot \Delta t'' \\ \dot{m}' \cdot \bar{c}' \cdot (t_1' - t_2') &= \dot{m}'' \cdot \bar{c}'' \cdot [\pm(t_1'' - t_2'')] \end{aligned} \quad (1)$$

u kojoj je predznak ispred razlike temperatura u poslednjem izrazu + za suprotnosmerni, a – za istosmerni razmenjivač.

Prilikom proračuna i izbora razmenjivača toplote u praksi obično nastupaju dva slučaja:

- da su poznate: temperature fluida na ulazu i izlazu iz razmenjivača, toplotni kapaciteti fluida i koeficijent prolaza toplote kroz zid površine koje razdvaja grejni i grejani fluid; a da se pri tom traži grejna površina, ili
- da su poznate: grejna površina, pomenuti toplotni ekvivalenti fluida i zida, temperature na ulazu u razmenjivač; a da se traži razmenjena toplota i temperature na izlazu iz razmenjivača.

4.2 Proračun razmenjivača toplote

Kod prvog pomenutog slučaja proračuna razmenjivača toplote, kada određujemo grejnu površinu, koristi se obrazac za već spomenuti razmenjeni toplotni fluks između fluida u obliku:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta t_{sr}, \quad (2)$$

pa je grejna površina:

$$A = \frac{\dot{Q}}{k \cdot \Delta t_{sr}} \quad (3)$$

gde su:

$k \left(\frac{W}{m^2 K} \right)$ - koeficijent prolaza toplote kroz grejnu površinu

$\Delta t_{sr} (^{\circ}C)$ - srednja logaritamska temperatura

Srednja logaritamska temperatura izračunava se kao (sl. 26):

$$\Delta t_{sr} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{(t_1' - t_1'') - (t_2' - t_2'')}{\ln \frac{t_1' - t_1''}{t_2' - t_2''}} \quad (4)$$

gde su:

Δt_1 - razlika temperatura na ulazu u razmenjivač

Δt_2 - razlika temperatura na izlazu iz razmenjivača

Pomenuti obrazac koristi se i za slučaj istosmernog i suprotnosmernog razmenjivača, samo se kod suprotnosmernog ulaz i izlaz iz razmenjivača gleda prema grejnom fluidu. S toga su i vrednosti za Δt_{sr} različite, a samim tim i grejne površine razmenjivača koji treba da ostvari isti toplotni učinak.

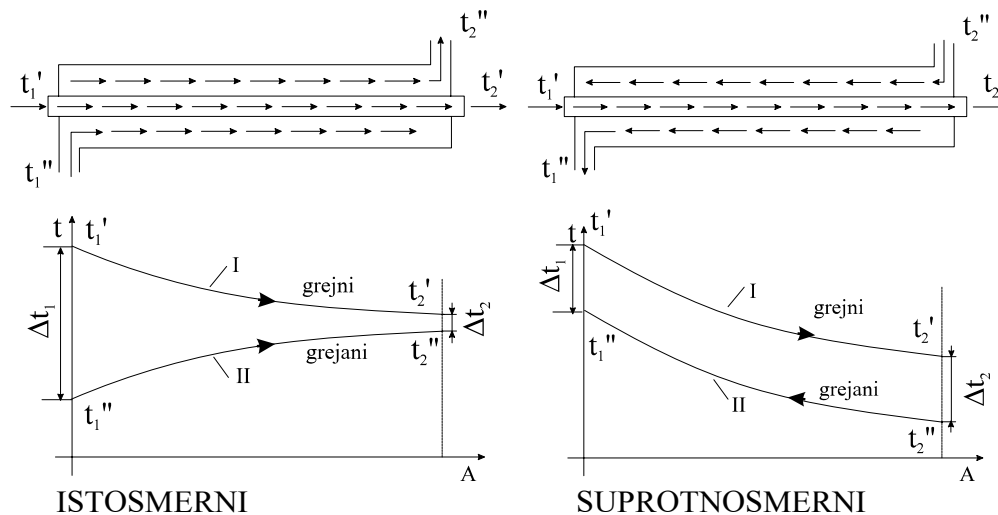
U slučaju razmenjivača sa unakrsnim tokom fluida, određuje se srednja logaritamska temperatura kao u slučaju razmenjivača sa suprotnosmernim tokom, pa se ta vrednost množi sa popravnim koeficijentom koji se nalazi u grafikonima. Grafikoni dobijeni na osnovu komplikovanih proračuna nalaze se u literaturi (Kozić i dr., 2004).

Za drugi pomenuti slučaj proračuna kada se traži, pad temperature na izlazu iz razmenjivača Δt_2 , pretpostavi se neka vrednost koja je približna vrednosti za Δt_1 pa se imajući u vidu izraze (1), (2) i (4) vrše iteracije sve dok se ne postigne željena tačnost.

Kod razmenjivača kod kojih preko iste grejne površine struje naizmenično oba fluida, obično je dat zakon promene temperature grejne površine (videti zadatak 2.), pa se onda lako sračunavaju razlike temperatura između fluida koji struji i grejne površine na ulazu i izlazu iz razmenjivača, a samim tim i srednja logaritamska temperatura.

- Primeri rešenih zadataka:

1. U razmenjivaču toplote sa paralelnim tokom površine $A_p=3\text{m}^2$ voda se zagreva od 8°C do 98°C . Zagrevanje se ostvaruje produktima sagorevanja koji se od temperature 350°C ohlade na 150°C . Koeficijent prolaza toplote je $k=800\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$. Koliki je protok vode i površina razmenjivača sa suprotnosmernim tokom koji bi razmenio istu količinu toplote ?



Slika 27

I - Produkt sagorevanja

II - voda

Δt_1 - razlika temperatura na ulazu

Δt_2 - razlika temperatura na izlazu

Srednja logaritamska razlika temperature je:

$$\Delta t_{sr} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

Za razmenjivač sa istosmernim tokom biće:

$$\Delta t_{sr_i} = \frac{(t_1' - t_1'') - (t_2' - t_2'')}{\ln \frac{t_1' - t_1''}{t_2' - t_2''}} = \frac{(350 - 8) - (150 - 98)}{\ln \frac{350 - 8}{150 - 98}} = 154^\circ\text{C}$$

Razmenjeni toplotni fluks između fluida je:

$$\Phi = \dot{Q} = k \cdot A_p \cdot \Delta t_{sr_i} = 800 \cdot 3 \cdot 154 = 369512 \text{ W} \cong 369.5 \text{ kW}$$

On se može napisati i u obliku :

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \bar{c} \cdot \Delta t \rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{Q}}{\bar{c} \cdot \Delta t} = \frac{369512}{4190 \cdot 90} = 0.98 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

gde je:

$\bar{c}$ - srednja specifična toplota vode

Za suprotnosmerni razmenjivač srednja logaritamska razlika temperature biće:

$$\Delta t_{sr_i} = \frac{(t_1' - t_1'') - (t_2' - t_2'')}{\ln \frac{t_1' - t_1''}{t_2' - t_2''}} = \frac{(350 - 98) - (150 - 8)}{\ln \frac{350 - 98}{150 - 8}} = 191.8^\circ \text{C}$$

A njegova površina :

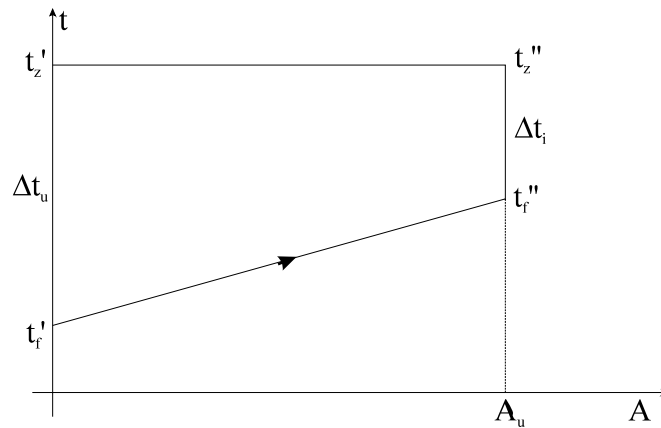
$$A_s = \frac{\dot{Q}}{k \cdot \Delta t_{sr_s}} = \frac{369512}{800 \cdot 191.8} = 2.41 \text{ m}^2 < A_p = 3 \text{ m}^2$$

Ovo navodi na zaključak da su razmenjivači sa suprotnosmernim tokom racionalniji sa gledišta uštede materijala.

2. Temperatura čvrste površine nekog razmenjivača toplote iza koje se kondenzuje vodena para je konstantna i iznosi $t_z = 120^\circ \text{C}$. Temperatura fluida duž grejne površine razmenjivača menja se po zakonu $t_f = t_f' + bA$, gde su: $t_f' = 20^\circ \text{C}$ - temperatura fluida na ulazu u razmenjivač, $b = 160^\circ \text{C} / \text{m}^2$ - koeficijent, A - površina sa koje toplote prelazi na fluid. Ako se za vreme $\tau = 3 \text{ h}$ - sa ukupne površine razmenjivača toplote $A_u = 0.5 \text{ m}^2$ predaje $Q = 108 \text{ MJ}$ toplote, odrediti srednji koeficijent prelaza toplote sa grejne površine na fluid.

Rešenje:

Kako je temperatura čvrste površine razmenjivača konstanta, znači da su temperature na ulazu i izlazu iz nje jednake tj. $t_z' = t_z''$.



Slika 28

Temperatura fluida na ulazu u razmenjivac je $t_f' = 20^\circ C$, a na izlazu :

$$t_f'' = t_f' + b \cdot A_u = 20 + 160 \cdot 0.5 = 100^\circ C$$

Razlika temperatura površine i fluida na ulazu je :

$$\Delta t_u = t_z' - t_f' = 120 - 20 = 100^\circ C$$

a na izlazu :

$$\Delta t_i = t_z'' - t_f'' = 120 - 100 = 20^\circ C$$

Sada se za srednju logaritamsku razliku dobija :

$$\Delta t_{SR} = \frac{\Delta t_u - \Delta t_i}{\ln \frac{\Delta t_u}{\Delta t_i}} = \frac{100 - 20}{\ln \frac{100}{20}} = 49.7^\circ C$$

Srednji koeficijent prelaza toplote sa grejne površine na fluid se dobija iz izraza :

$$Q = \dot{q} \cdot \tau \cdot A_u = \bar{\alpha} \cdot \Delta t_{SR} \cdot \tau \cdot A_u$$

$$\bar{\alpha} = \frac{Q}{A_u \cdot \Delta t_{SR} \cdot \tau} = \frac{108 \cdot 10^6}{0.5 \cdot 49.7 \cdot 3 \cdot 3600} = 402.4 \frac{W}{m^2 K}$$

5. Osnovna termodinamička svojstva tečnosti i pare

5.1 Fazni p-t dijagram. Trojna tačka

Zavisno od spoljnih uslova (pritiska i temperature) supstancija može da bude u gasovitom, tečnom ili čvrstom *agregatnom stanju (fazi)*, ili da se istovremeno nalazi u dva, pa čak i tri stanja¹.

U mikro razmerama različite faze se odlikuju "različitim stepenima kolektivizacije molekula iste vrste". U *gasovitoj fazi* molekuli su, u proseku, relativno daleko jedni od drugih, kreću se haotično, slabe su međumolekulske sile, pa je mala verovatnoća da mogu da se grupišu. Hlađenjem gasa pri konstantnom pritisku, zapremina i temperatura gasa se smanjuju, interakcija između molekula je snažnija i pri određenoj gustini supstancija prelazi u *tečnu fazu*. Daljim hlađenjem tečnosti pri stalnom pritisku temperatura se smanjuje i supstancija prelazi u *čvrstu fazu*, gde su molekuli (atomi) u strogo definisanom rasporedu.

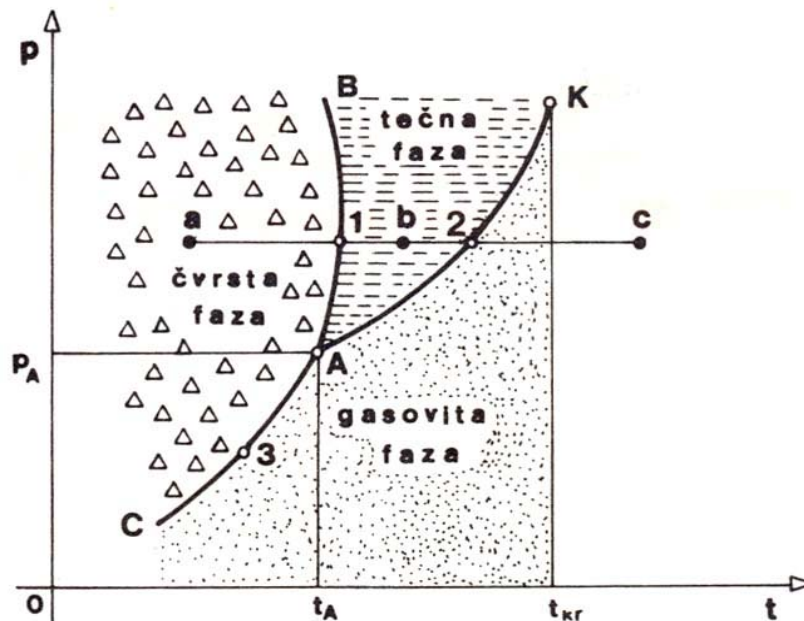
Transformacija supstancije iz jedne u drugu fazu naziva se *faznim prelazom (pretvaranjem)*. Proces prelaza supstancije iz čvrstog u tečno stanje je poznat kao *topljenje*, iz tečnog u gasovito - *isparavanje*, a iz čvrstog u gasovito - *sublimacija*. Obrnuti procesi se zovu, respektivno: *očvršćavanje (kristalizacija)*, *kondenzovanje i desublimacija*.

Za prikazivanje faznih prelaza veoma je pogodan t,p dijagram. Na njemu su označene tri oblasti: levo od krive B-A-C je čvrsto stanje, desno od krive C-A-K je gasovito stanje, a između krivih A-B i A-K je oblast tečnog stanja.

Ako se čvrstom telu stanja "a" dovodi toplota pri stalnom pritisku, to će proces a-1 odgovarati zagrevanju čvrstog tela do temperature topljenja. Tačka "1" predstavlja granicu između čvrste i tečne faze na pritisku $p=p_a=Const$. U tački "1" treba dovesti tačno određenu količinu toplote, da bi se jedinica mase prevela u tečnu fazu. Ta toplota se naziva *latentna (skrivena) toplota*. Tom prilikom temperatura se ne menja, sve dotle dok i poslednji delić supstancije ne pređe u tečno stanje. Proces 1-b-1 odgovara zagrevanju tečnosti do temperature ključanja, a tačka "2" predstavlja granicu između tečne i gasovite faze, pri datom pritisku. U tački "2" nastaje isparavanje tečnosti pri konstantnoj temperaturi. Daljim dovođenjem toplote (proces 2-c) nastaje pregrevanje gasovite faze.

Pri pritisku $p < p_A$ čvrsta faza direktno prelazi u gasovitu - nastaje sublimacija. Tačka "3" predstavlja dvofazno stanje u kome su čvrsta i gasovita faza u ravnoteži. Kao što se vidi, krive A-B, A-K i A-C predstavljaju ustvari geometrijska mesta faznih prelaza pri različitim pritiscima. One se nazivaju *krive napona*. Svakoј tački koja leži na krivoј napona odgovara dvofazno stanje.

¹ Ovdе se razmatraju tri klasična agregatna stanja, mada se u savremenoј fizici smatra da postoje još četiri stanja: plazma, neutronske stanje, epiplazma i fizički vakuum.



Slika 29: Fazni p-t dijagram

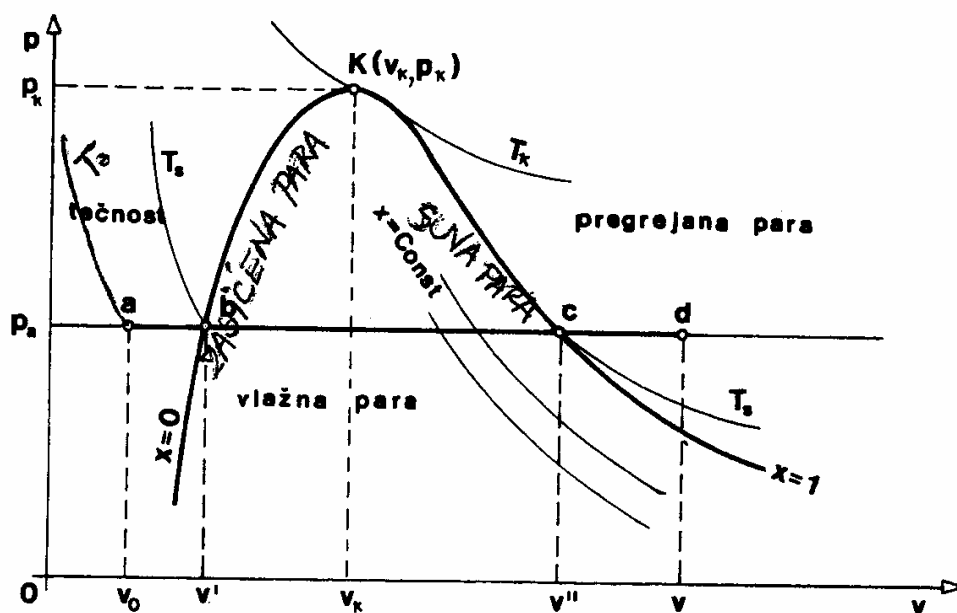
Krive napona se seku u jednoj tački A, koja se naziva *trojna tačka*. U toj tački supstancija može da bude i u čvrstom i u tečnom i u gasovitom stanju, to jest sve tri faze se nalaze u ravnoteži. Trojna tačka ima tačno određene parametre. Za vodu su: $p_A = 610,8 \text{ Pa}$, $v_A = 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$, $T_A = 273,16 \text{ K}$. Kriva napona A-K ili tzv. kriva zasićenja je ograničena i završava se *kritičnom tačkom* K. U oblasti gde je $p > p_k$ ili $t > t_k$ nema faznog prelaza iz tečnog u gasovito stanje (ili obrnuto). Supstancija je homogena, a između tečne i gasovite faze nema principijelne razlike.

5.2 Vodena para. Fazni p-v dijagram

Vodena para ima značajnu primenu u termotehnici: koristi se kao radno telo u parnim motorima ili kao grejni fluid u različitim toplotnim aparatima i uređajima. Vodena para se dobija procesom isparavanja vode, na određenom pritisku, u specijalnim zatvorenim sudovima - parnim kotlovima.

Isparavanje se vrši i pri prirodnim uslovima, ali samo sa slobodne površine tečnosti (vetrenje). Posmatrano u mikro razmerama molekuli tečnosti se kreću haotično, različitim brzinama. Tečnost napuštaju samo oni molekuli čija je kinetička energija dovoljno velika da savlada međumolekulske sile. Poseban oblik isparavanja je ključanje. *Ključanje* je intenzivno stvaranje pare i na slobodnoj površini tečnosti i unutar same površine tečnosti. Isparavanje je najbrže na zidovima suda, gde se vrši zagrevanje. Tu se obrazuju mehuri pare, koji se penju ka slobodnoj površini tečnosti povećavajući svoju zapreminu, raspadaju se, a para iz njih prelazi u prostor iznad tečnosti.

Razmotrimo isparavanje vode u faznom p-v dijagramu (slika 30).



Slika 30: Fazni p-v dijagram

Zagrevanjem napojne vode temperature t_0 (stanje "a") u parnom kotlu, pri konstantnom pritisku ($p = \text{Const}$), temperatura vode raste do temperature ključanja t_s (pri tom pritisku), koja se naziva *temperatura zasićenja*. Temperatura ključanja zavisi od prirodne supstancije, pri čemu se povećanjem pritiska i t_s povećava. Pritisak koji odgovara temperaturi t_s naziva se *pritisak zasićenja* p_s . Geometrijsko mesto svih tačaka ključanja (početaka isparavanja) predstavlja donju graničnu krivu - kriva b-K. Para koja se stvara u procesu ključanja i nalazi se u ravnoteži sa tečnošću naziva se *zasićena para*. Proces isparavanja koji je počeo u stanju "b" teče, uz *stalan pritisak i stalnu temperaturu* do stanja "c". Tom prolikom sistem je dvofazni - smeša tečnosti i pare, tzv. *vlažna para*. Na završetku isparavanja (tačka c), para više ne sadrži tečnost. Takva para je poznata pod imenom *suvo zasićena vodena para*. Geometrijsko mesto tačaka završetka isparavanja (kriva b-K) naziva se gornja granična kriva. Donja i gornja granična kriva se seku u kritičnoj tački K, gde se tečna faza direktno pretvara u gasovitu.

Stanje vlažne pare, u zasićenom području, određeno je pritiskom (ili temperaturom) i količinom suve pare u mešavini, to jest *stepenom suvoće*

$$x = m_p / m_p + m_v \text{ (kg pare/ kg smeše).}$$

Na donjoj graničnoj krivoj je samo tečna faza ($m_p=0$, $x=0$), a na gornjoj graničnoj krivoj samo suva para ($m_v=0$, $x=1$). Daljim dovodenjem toplote suva para se pregreva do temperature t (tačka d) i po svojim svojstvima približava idealnom gasu.

5.3 Veličine stanja vlažne pare

Veličine stanja ključale vode i suve pare u zavisnosti od pritiska ili temperature date su u tablicama za vodenu paru. Tablice ustvari predstavljaju sintezu radova velikog

broja fizičara i inženjera raznih zemalja. Veličine stanja vode koja ključa (stabje na donjoj graničnoj krivoj, $x=0$) označene su sa "prim" ('), a suvo-zasićene pare (stanje na gornjoj graničnoj krivoj, $x=1$) sa "sekund" ("). Pritisak i temperatura se označavaju bez indeksa, jer se ne menjaju u toku procesa isparavanja.

Unutrašnja energija u stanju ključanja je

$$u' = i' - pv',$$

a unutrašnja energija suvo-zasićene pare

$$u'' = i'' - pv''.$$

Toplota faze (latentna toplota isparavanja) r (J/kg), dobija se iz prvog zakona termodinamike

$$dq = di - vdp \quad (dp=0),$$

pa pošto je $p=\text{Const}$, posle integracije prethodnog izraza dobija se

$$q = r = i'' - i' = T_s(s'' - s') = u'' - u' + p(v'' - v').$$

Ili, napisano kraće

$$r = \rho + \psi,$$

gde je

$$\begin{aligned} \rho &= u'' - u' - \text{unutrašnja toplota faze (isparavanja),} \\ \psi &= p(v'' - v') - \text{spoljašnja toplota faze (isparavanja).} \end{aligned}$$

Dakle, toplota faze se troši na povećanje unutrašnje energije i manji deo na spoljašnji rad širenja.

Vlažna para je, videli smo, smeša pare i vode koja ključa. Na primer, 1 kg vlažne pare ima x kg suve pare i $(1-x)$ kg vode koja ključa. Prema tome, *veličine stanja vlažne pare* predstavljaju zbir odgovarajućih veličina stanja suve pare pomnoženih stepenom suvoće x i odgovarajućih veličina stanja vode u stanju ključanja, pomnoženih stepenom vlažnosti $(1-x)$. Tako će redom biti:

- specifična zapremina

$$v_x = xv'' + (1-x)v' = v' + x(v'' - v'),$$

- entalpija

$$i_x = xs'' + (1-x)i' = i' + x(i'' - i') = i' + xr,$$

- entropija

$$s_x = xs'' + (1 - x)s' = s' + (s'' - s') = s' + x r/T_s,$$

- unutrašnja energija

$$u_x = xu'' + (1 - x)u' = u' + x(u'' - u') = u' + x\rho.$$

U oblasti vlažne pare, tj. za $0 < x < 1$, postoji čitav snop krivih sa različitim vrednostima stepena suvoće. Stepenn suvoće može da se odredi iz izraza:

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'}$$

5.4 Pregrejana para

Proces pregrevanja pare sastoji se u povećanju temperature suve pare ($T > T_s$) pri konstantnom pritisku, dovođenjem toplote u pregrejaču pare. Tom prilikom se povećava i specifična zapremina ($v > v''$). Dakle, para koja pri datom pritisku ima temperaturu ili specifičnu zapreminu veću od odgovarajućih parametara suvo-zasićene pare je *pregrejana*.

Osnovne veličine stanja pregrejane pare: p i t se određuju merenjem, a specifična zapremina v se izračunava iz jednačine stanja pregrejane pare. Van der Waals-ova jednačina ne daje zadovoljavajuće rezultate, pa je niz autora predložio poluempirijske jednačine stanja pregrejane pare: Linde, Tumlriz-Linde, Mollier, Vukalović i drugi. Međutim, zbog složenosti one imaju malu direktnu praktičnu primenu. Zato su sastavljene tablice pregrejane vodene pare na bazi izmerenih veličina (p i t) i jednačine stanja, u kojima su date vrednosti v , i , s u funkciji pritiska i temperature za vodu i pregrejanu vodenu paru. Najveću primenu imaju tablice po Vukaloviću i tablica po Mollieru.

Količina toplote potrebna da bi se 1 kg pare pri $p = \text{Const}$ pregrejao od temperature t_s do temperature t , tzv. *toplota pregrevanja*, prema prvom zakonu termodinamike je

$$a_p = u - u'' + p(v - v'') = i - i''.$$

Unutrašnja energija pregrejane pare je

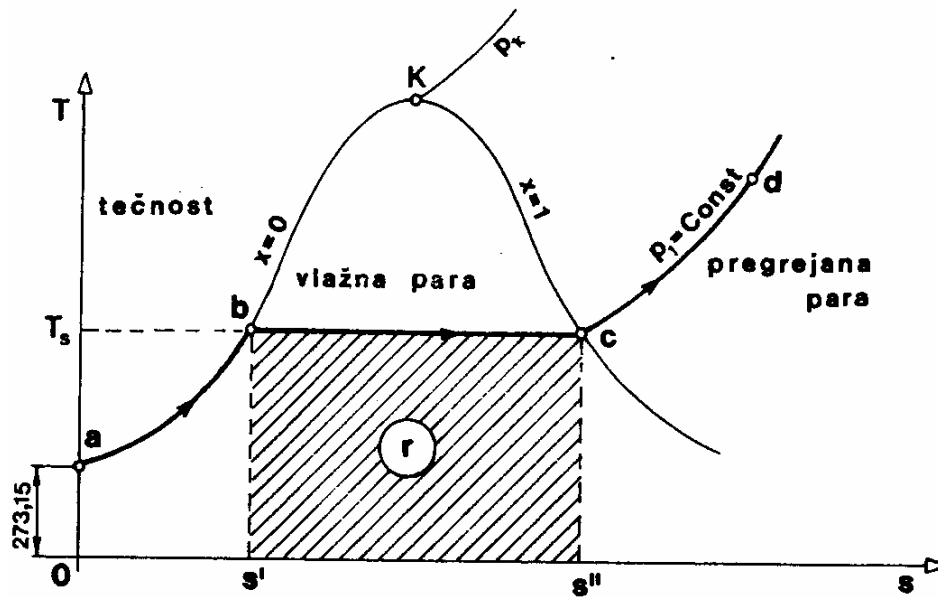
$$u = i - p = u'' + q_p - p(v - v'').$$

5.5 Termodinamički T-s i-s i dijagrami vodene pare

Dijagram T-s (sl. 31) ima veliki značaj i praktičnu primenu pri analizi i proučavanju promene stanja vodene pare i ostalih stvarnih gasova i para.

Entropija vode pri temperaturi 0° je približno jednaka nuli ($s_0' \approx 0$). Dakle, polazno stanje tečnosti je predstavljeno tačkom a (0; 273,15). Stanje ključale tečnosti pri pritisku p_1 je prikazano tačkom b, koja je određena temperaturom ključanja pri datom pritisku i vrednošću entropije ključale vode. Linija a-b predstavlja proces izobarskog zagrevanja

tečnosti do ključanja. Proces isparavanja protiče pri konstantnom pritisku i temperaturi i prikazan je horizontalnom linijom b-c. Tačka c označava kraj isparavanja i određena je vrednošću entropije suvo-zasićene vodene pare. Proces izobarskog pregrevanja je prikazan linijom c-d. Tačka d je definisana temperaturom T i entropijom pregrejanе pare u datom stanju. Linija a-b-c-d predstavlja proces izobarskog dobijanja pregrejanе pare u datom stanju, od vode pritiska p_1 , temperature 0°C .



Slika 31: Fazni T-s dijagram

Iz izraza

$$s'' - s' = r / T_s$$

se vidi da $(s'' - s') \rightarrow 0$ kada $r \rightarrow 0$, pa je u kritičkoj tački K: $s' = s''$. Povlačeći kritičnu izobaru p_{kr} , mogu se na s,T dijagramu, kao i na v,p dijagramu, označiti različite faze vodene pare.

Još veću praktičnu primenu ima i-s dijagram (sl. 32), zahvaljujući kome se mnogi zadaci jednostavno rešavaju. To je, ustvari, grafička ilustracija jednačine stanja vodene pare. Na apscisnoj osi se nanosi specifična entropija s (J/(kg·K)), a na ordinati specifična entalpija i (J/kg). Na osnovu tabličkih podataka (s' , s'' , i' , i'') konstruisane su granične krive: A-K i B-K. U oblasti vlažne pare, unutar graničnih krivih, povučene su linije konstantnog stepena suvoće ($x = \text{Const}$). U toj oblasti izobare ($p = \text{Const}$) i izoterme ($T = \text{Const}$) se poklapaju: to su prave linije koje tangiraju donju graničnu krivu i koje se lepezasto šire idući od donje prema gornjoj graničnoj krivoj. Da su to zaista prave linije jednostavno se pokazuje. U oblasti vlažne pare je

$$i_x = i' + rx \quad i \quad s_x = s' + r/T_s x,$$

odakle se, posle eliminacije rx dobija

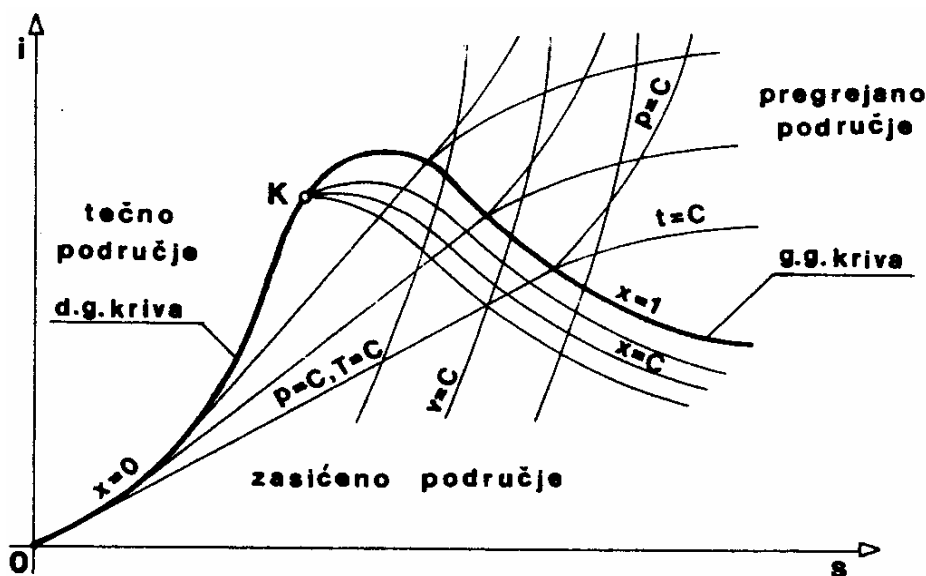
$$i_x = T_s s_x + i' - T_s s'.$$

Za $p = \text{Const}$ je $i' - T_s s' = b = \text{Const}$, pa je

$$i_x = T_s s_x + b,$$

što je u i - s dijagramu prava linija sa koeficijentom pravca T_s .

U oblasti pregrejane pare izobare i izoterme su krive linije koje se razdvajaju: izobare se penju na više, a izoterme, s blagim nagibom, na desno. Na dijagramu su iscrtane i odgovarajuće izohore ($V = \text{Const}$).



Slika 32: Fazni i - s dijagram

Korišćenjem i - s dijagrama moguće je odrediti sve one veličine stanja, koje se određuju i tablicama (v , p , T , s , i , x), sa nešto manjom tačnošću, ali je prednost dijagrama u mogućnosti da se neki problemi rešavaju direktno na njemu.

5.6. Promene stanja vodene pare

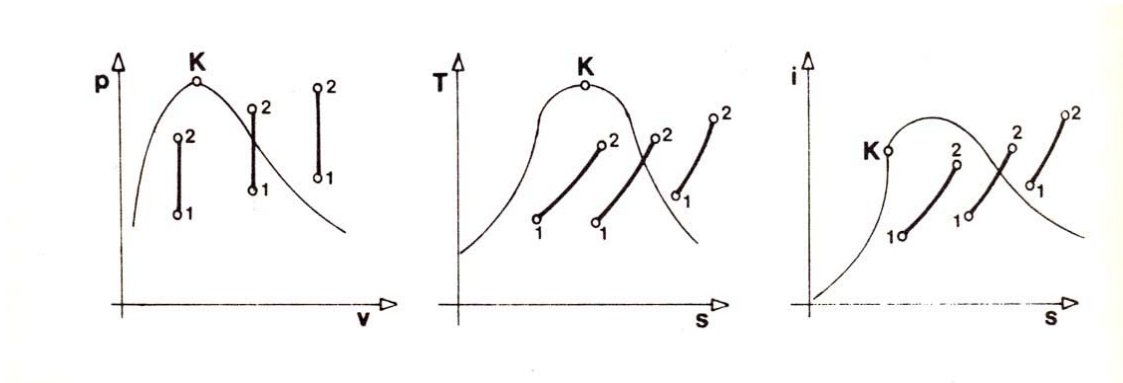
Kao i kod idealnog gasa, u procesima promene stanja vodene pare, potrebno je odrediti nepoznate veličine stanja, kao i količinu toplote, apsolutni i tehnički rad i promenu unutrašnje energije i entropiju. Problemi iz oblasti promene stanja vodene pare mogu se rešavati analitički, primenom tablica za vodenu paru ili grafički, pomoću T - s i i - s dijagrama. Grafički metod je jednostavan i istovremeno dovoljno tačan. U tom slučaju u dijagramu se povlači ("prati") linija procesa i određuju veličine stanja u početku i na kraju procesa, a zatim i ostale termodinamičke veličine.

Sve promene stanja su prikazane redom u p - v ; T - s i i - s dijagramu i napisani izrazi za razmenjenu količinu toplote i apsolutni rad. Posebno su izdvojene promene stanja u oblasti vlažne pare (a), u oblasti vlažne i pregrejane pare (b) i u oblasti pregrejane pare (c). Promena unutrašnje energije za bilo koji proces je:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = i_2 - i_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1).$$

Izohorska promena stanja (sl. 33)

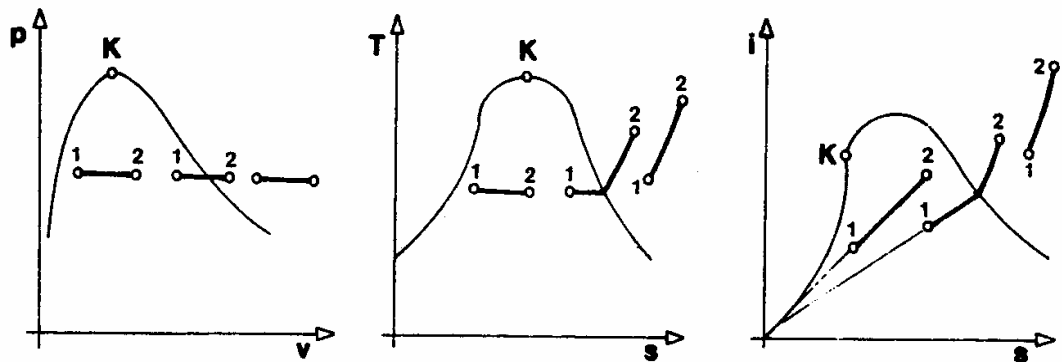
$$q_{12} = u_2 - u_1 = i_2 - i_1 - v(p_2 - p_1), \quad l_{12} = 0, \quad l_{t12} = v(p_1 - p_2)$$



Slika 33: Izohorska promena stanja

Izobarska promena stanja (sl. 34)

$$q_{12} = i_2 - i_1 = u_2 - u_1 + p(v_2 - v_1), \quad l_{12} = p(v_2 - v_1), \quad l_{t12} = 0.$$



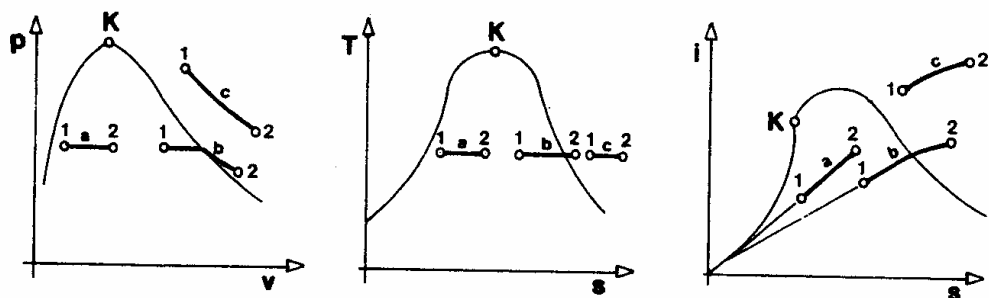
Slika 34: Izobarska promena stanja

Izotermna promena stanja (sl. 35)

$$q_{12} = T(s_2 - s_1) \quad l_{12} = q_{12} - (u_2 - u_1) \quad l_{t12} = q_{12} - (i_2 - i_1)$$

ili

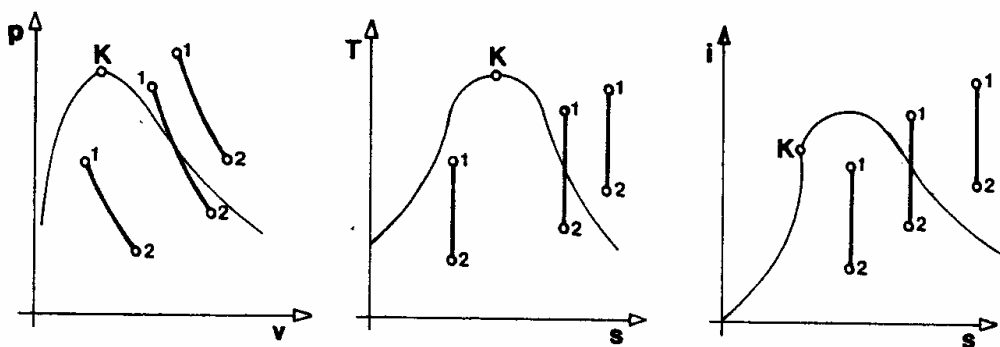
- (a) $l_{12} = p(v_2 - v_1), \quad l_{t12} = 0$
- (b) $l_{12} = p(v_2 - v_1) + \int_{v_1}^{v_2} p \, dv, \quad l_{t12} = - \int_{p_1}^{p_2} v \, dp$
- (c) $l_{12} = \int_{v_1}^{v_2} p \, dv, \quad l_{t12} = - \int_{p_1}^{p_2} v \, dp.$



Slika 35: Izotermska promena stanja

Izentropska promena stanja (sl. 36)

$$q_{12} = 0 \quad l_{12} = u_1 - u_2 \quad l_{t12} = i_1 - i_2.$$



Slika 36: Izentropska promena stanja

5.7 Isticanje iz mlaznika

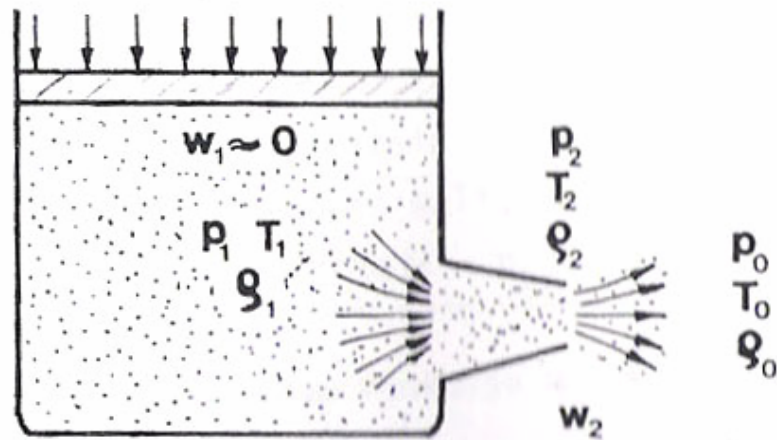
Razmatra se proces izentropskog ($s = \text{Const}$) isticanja iz mlaznika, koji je spojen sa rezervoarom velike zapremine (sl. 37). Pretpostavlja se velika zapremina rezervoara, pa nema veće promene pritiska u njemu pri isticanju gasa.

Parametri gasa (p , T , ρ , w) u rezervoaru, označeni su indeksom "1", na izlazu iz mlaznika indeksom "2", a parametri okoline indeksom "0". Brzina isticanja gasa iz mlaznika w_2 određuje se korišćenjem Ojlerove jednačine kretanja fluida:

$$w_2 = \sqrt{2l_0 + w_1^2}$$

Brzina strujanja na ulazu u mlaznik w_1 zanemarljivo je mala u odnosu na w_2 , pa je:

$$w_2 = \sqrt{2l_0}.$$



Slika 37: Isticanje iz rezervoara

Zapreminski protok gasa je

$$V = Aw_2,$$

a maseni

$$m = \rho_2 V = A\rho_2 w_2 = Aw_2/v_2.$$

iz jednačine izentropije $p v^k = \text{Const}$ je

$$1/v_2 = 1/v_1 (p_2/p_1)^{1/k},$$

pa se zamenom dobija

$$m = A/v_1 (p_2/p_1)^{1/k} w_2,$$

ili, posle zamene biće

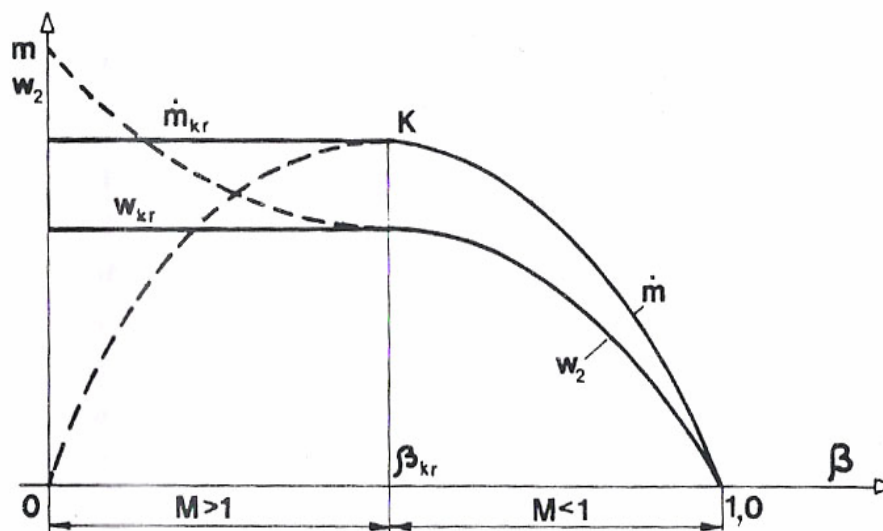
$$m = A\sqrt{2k/k-1} p_1/v_1 (\beta^{2/k} - \beta^{k+1/k}),$$

gde je uvedena smena $\beta = p_2/p_1$.

Zavisnost brzine isticanja (w_2) i masenog protoka (m) u funkciji odnosa pritiska $\beta = p_2/p_1$ data je na sledećoj slici 38.

Za $\beta=1$ ($p_1 = p_2$) je, očevidno, $w_2=0$ i $m=0$. Smanjenjem β , brzina isticanja (w_2) i maseni protok (m) rastu, dostižući respektivno maksimalne vrednosti pri određenom $\beta=\beta_{kr}$. Daljim smanjenjem koeficijenta β , brzina isticanja se - prema izrazu za w_2 - poveća do maksimalne vrednosti, a maseni protok - prema izrazu za m - smanjuje do nule (za $\beta=0$). Ti delovi krivih, za $0 \leq \beta \leq \beta_{kr}$, označeni su na slici isprekidanom linijom. Isprekidanom, jer se u ovom području teorijske krive, dobijene na osnovu formula za w_2 i m potpuno razilaze sa krivim koje su eksperimentalno određene! U celom ovom intervalu, brzina isticanja i maseni protok ostaju konstantni (pune linije na slici), to jest

smanjenje izlaznog pritiska uopšte ne utiče na brzinu isticanja i maseni protok. Ovaj fenomen je najpre objašnjen Sen-Venanovom hipotezom (1839.) koja se docnije pokazala ispravnom: pri ^kstrujanju gasa kroz mlaznik, ma koliko pritisak okoline bio mali, ne može da se dobije pritisak gasa niži od kritičnog pritiska isticanja - p_{kr} , koji odgovara maksimalnom protoku.



Slika 38: Zavisnost brzine isticanja (w_2) i masenog protoka ($\dot{m}$) u funkciji odnosa pritiska $\beta = p_2/p_1$

Izraz za kritični brzinu isticanja biće

$$w_{kr} = \sqrt{kRT_{kr}} = \sqrt{k p_{kr} v_{kr}}.$$

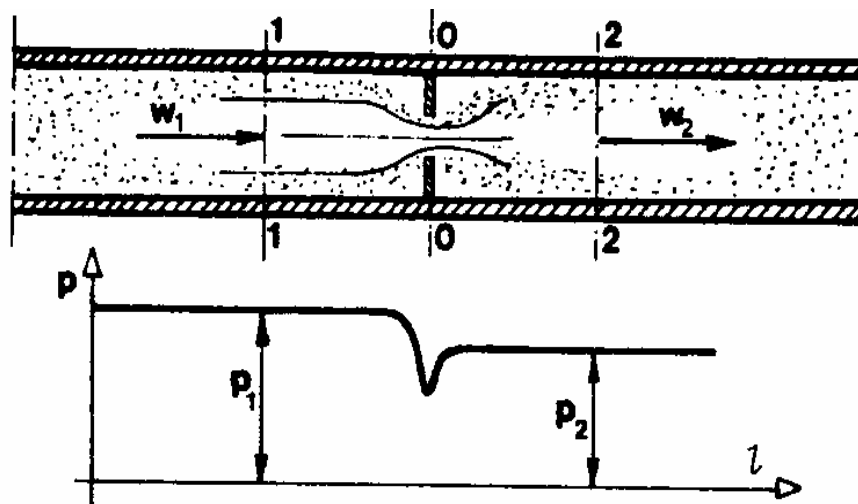
Upoređujući ovaj izraz sa izrazom $a = \sqrt{kRT}$ zaključuje se da je brzina strujanja u kritičnom preseku jednaka brzini zvuka

$$w_{kr} = a.$$

Time se, ustvari i objašnjavaju "nelogičnosti" u zavisnosti $m = m(\beta)$. Bilo koji slabi poremećaj, pa i promena pritiska, prostire se u stišljivoj sredini brzinom zvuka. Ako se, dakle, u nekom trenutku izlazni pritisak p_2 smanji, talas razređenja se prostire u smeru suprotno strujanju, relativnom brzinom $a - w$. Neka je pritisak sredine u koju gas ističe $p_0 = p_2 = p_{kr}$, a brzina isticanja respektivno jednaka brzini zvuka. Daljim smanjenjem pritiska sredine ispod p_{kr} , talas razređenja ne može da se prostire duž mlaznika, jer je relativna brzina jednaka nuli ($w - a = 0$). Ili, kako se O. Reynolds slikovito izrazio: u tom slučaju fluid koji struji u mlazniku "nije saznao" da se pritisak na izlazu smanjuje. Dakle, *nema preraspodele pritiska duž mlaznika i brzina isticanja ostaje prvobitna, jednak lokalnoj brzini zvuka na izlazu iz mlaznik.*

5.8 Proces prigušivanja

U praksi su česti slučajevi da struja gasa nailazi na naglo suženje poprečnog preseka (npr. ventil u sistemu grejanja). Na tom mestu brzina strujanja gasa w odjednom poraste, a pritisak opadne (sl. 39). Isti pritisak se ponovo ne uspostavlja, jer deo energije se nepovratno izgubio na vrtložno strujanje. Pad pritiska $\Delta p = p_1 - p_2$ je utoliko veći ukoliko je veći odnos A_1/A_0 . Ovakav proces pri kome se smanjuje pritisak usled strujanja gasa kroz suženi presek, naziva se *prigušivanje*.



Slika 39: Prigušenje sa padom pritiska

Pretpostavljajući da nema razmene toplote sa okolinom (adijabatsko strujanje) i pošto je $l_1 = 0$, $z_1 = z_2$, prvi zakon termodinamike postaje

$$i_1 + 1/2 w_1^2 = i_2 + 1/2 w_2^2.$$

Promena kinetičke energije može da bude znatna, ali je relativno mala u poređenju sa promenom entalpije, pa se može zanemariti, te prethodni izraz postaje

$$i_1 = i_2.$$

Dakle, pri procesu prigušivanja gasa *entalpija ostje konstantna*. Za idealne gasove je

$$di = c_p dT,$$

pa pošto je $di = 0$ i $c_p \neq 0$, biće

$$dT = di/c_p = 0, \quad T = \text{Const.}$$

Proces prigušivanja idealnih gasova je znači istovremeno i *izotermni proces* ($T = \text{Const.}$).

Proces prigušivanja je tipično nepovratan, praćen porastom entropije, čija se promena izračunava kao i u slučaju povratnog izotermnog procesa, jer je entropija veličina stanja:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = R \ln p_1/p_2.$$

Interesantno je da se pri procesu prigušivanja realni gasovi ponašaju drugačije od idealnih. Naime, temperatura gasa nije konstantna, već se povećava ili smanjuje, što zavisi od početnih parametara i vrste gasa. Na ovu su pojavu prvi ukazali Džul i Tomson (1852.), pa se po njima naziva *efekat Džula-Tomsona*. Ova važna i zanimljiva osobina realnih gasova omogućila je široku primenu procesa prigušivanja u tehnici niskih temperatura.

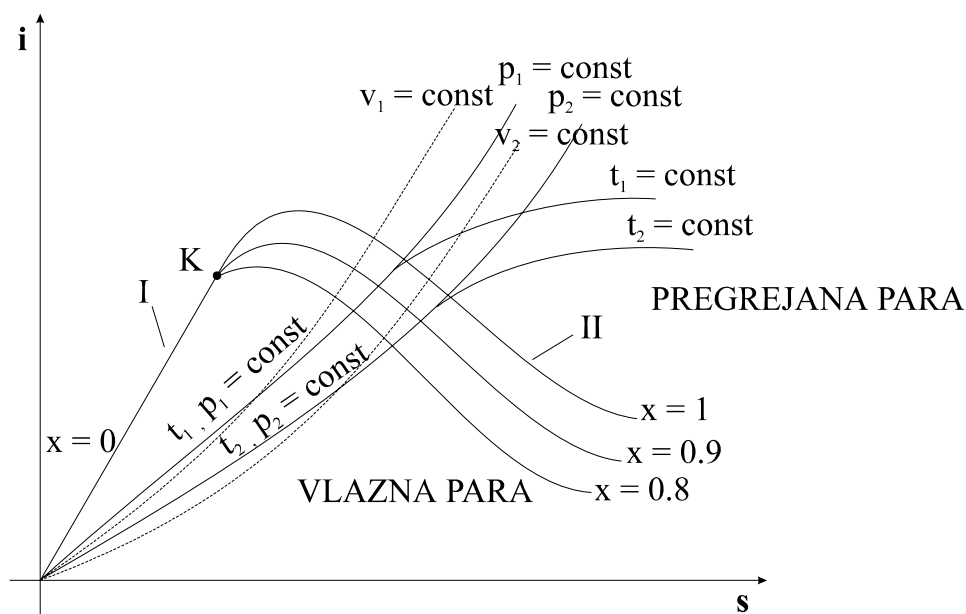
- Primeri rešenih zadataka

1. Određjivanje veličina stanja pare u i -s dijagramu

a) Suvo zasićena para - dovoljno je poznavati 1 parametar da bi se odredilo stanje, jer je ono uvek na gornjoj graničnoj krivoj ($x = 1$).

Oznake na dijagramu (sl. 40) i simbolima: I, ' - ključala tečnost; II, " - suvo zasićena para

Rešenje:



Slika 40

$$t_1 > t_2, p_1 > p_2, v_1 > v_2$$

a) suvo – zasicena para – dovoljno poznavati 1 parametar

$$1.) t'' = 160^\circ \text{C} \rightarrow p'' = 6.1 \text{ bar}, v'' = 0.32 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}, i'' = 2760 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, s'' = 6.75 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$2.) p'' = 10 \text{ bar} \rightarrow t'' = 180^\circ \text{C}, v'' = 0.197 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}, i'' = 2780 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, s'' = 6.58 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$3.) v'' = 0.65 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \rightarrow p'' = 2.8 \text{ bar}, t'' = 130^\circ \text{C}, i'' = 2720 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, s'' = 7.03 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

b) pregrejana para - moramo poznavati 2 parametra :

$$4.) p = 6.1 \text{ bar}, t = 180^\circ \text{C} \rightarrow v = 0.33 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}, i = 2805 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, s = 6.85 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$5.) p = 8 \text{ bar}, t = 210^\circ \text{C} \rightarrow v = 0.27 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}, i = 2860 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, s = 6.85 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

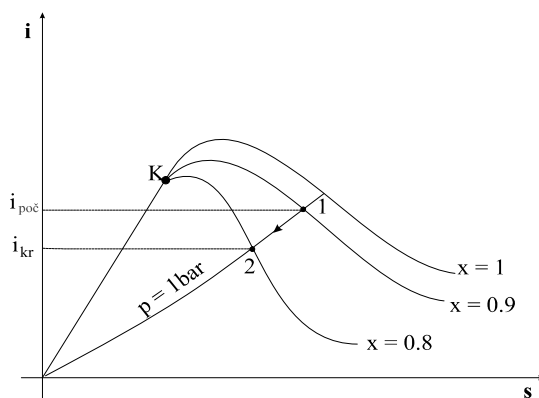
c) vlažna para - potrebna su 2 parametra :

$$6.) t = 160^\circ \text{C}, x = 0.98 \rightarrow i = 2715 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, s = 6.65 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$7.) p = 10 \text{ bar}, v = 0.19 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \rightarrow i = 2660 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, s = 6.31 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}, x = 0.94$$

2. Izračunati količinu toplote koja se oslobodi ako se masi od 2 kg vlažne pare suvoća smanji sa 0.9 na 0.8 pri pritisku $p=1 \text{ bar}$ i toploti isparavanja $r = 2100 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$.

Rešenje:



Slika 41

$$p = 1 \text{ bar} \xrightarrow{i-s \text{ dij.}} t = 100^\circ \text{C}$$

$$i' = c \cdot t = 4.19 \cdot 100 = 419 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$i_{poc} = i' + x_{poc} \cdot r = 419 + 0.9 \cdot 2100 = 2309 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$i_{kr} = i' + x_{kr} \cdot r = 419 + 0.8 \cdot 2100 = 2099 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{osl} = m \cdot q_{osl} = m(i_{kr} - i_{poc}) = 2 \cdot (2099 - 2309) = -420 \text{ kJ}$$

3. Odrediti stepen suvoće i entalpiju vlažne pare koja je na pritisku $p = 4 \text{ bar}$ i $v = 0.4 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$, a specifična zapremina ključale vode $v' = 0.0011 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$.

Rešenje:

Prvo ćemo odrediti stepen suvoće iz poznatih specifičnih zapremina :

$$v = v' + x \cdot (v'' - v') \rightarrow x = \frac{v - v'}{v'' - v'} = \frac{0.4 - 0.0011}{0.47 - 0.0011} = 0.85$$

$$p = 4 \text{ bar} \xrightarrow{i-s \text{ dij.}} i'' = 2740 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, v'' = 0.47 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$i = i' + x \cdot (i'' - i') = 607.55 + 0.85 \cdot (2740 - 607.55) = 2420 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$i' = c \cdot t' = 4.19 \cdot 145 = 607.55 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

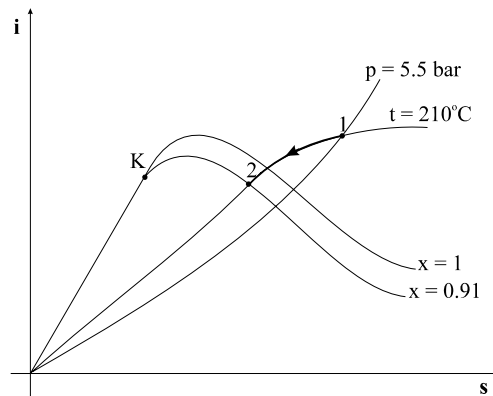
4. 3 kg vodene pare se izotermiski sabija od početne temperature 210°C i pritiska 5.5 bar , do krajnjeg stepena suvoće 0.91 . Odrediti parametre pare na kraju procesa i odvedenu količinu toplote. Prikazati proces u i - s dijagramu za vodenu paru.

Rešenje:

$$t = 210^\circ \text{C}, p = 5.5 \text{ bar} \rightarrow i_1 = 2875 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$t = 210^\circ \text{C}, x = 0.91 \rightarrow i_2 = 2625 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, s_2 = 6 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}, p_2 = 19 \text{ bar}$$

$$Q = m(i_2 - i_1) = 3 \cdot (2625 - 2875) = -750 \text{ kJ}$$



Slika 42

5. U razmenjivaču toplote kroz cev prečnika 60 mm protiče voda brzinom 0.1 m/s i greje se sa 10 °C na 90 °C. Odrediti protok pare koja zagreva ovu vodu ako se ista izobarski hladi od $p=5$ bar i $t = 400$ °C do stanja SZP.

Rešenje:

Kako para predaje toplotu vodi ona se hladi pa je:

$$\dot{Q}_v = \left| \dot{Q}_p \right|$$

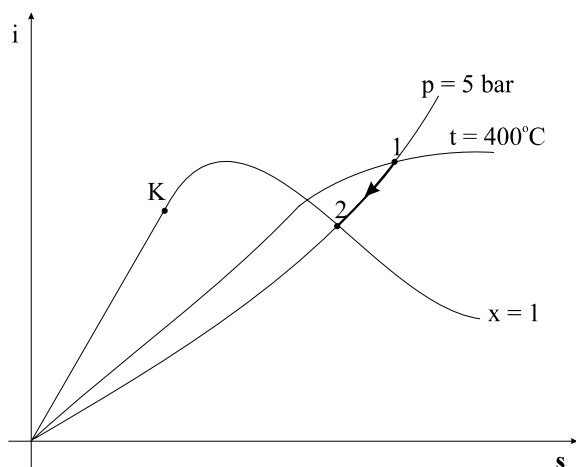
$$\dot{m}_v c(t_2 - t_1) = \dot{m}_p (i_1 - i_2)$$

$$\dot{m}_p = \frac{\dot{m}_v c(t_2 - t_1)}{(i_1 - i_2)} = \frac{0.283 \cdot 4.19 \cdot (90 - 10)}{3275 - 2750} = 0.18 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_v = \rho \cdot w \cdot A = \rho \cdot w \cdot \frac{d^2 \pi}{4} = 10^3 \cdot 0.1 \cdot \frac{0.06^2 \pi}{4} = 0.283 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$p = 5 \text{ bar}, t = 400^\circ \text{C} \rightarrow i_1 = 3275 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$p = 5 \text{ bar}, x = 1 \rightarrow i_2 = 2750 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$



Slika 44

6. SZP koja dolazi iz parnog kotla ($t_1=160^\circ\text{C}$) se izobarski pregrijava u pregrijaču pare do temperature $t_2 = 200^\circ\text{C}$. Odrediti:

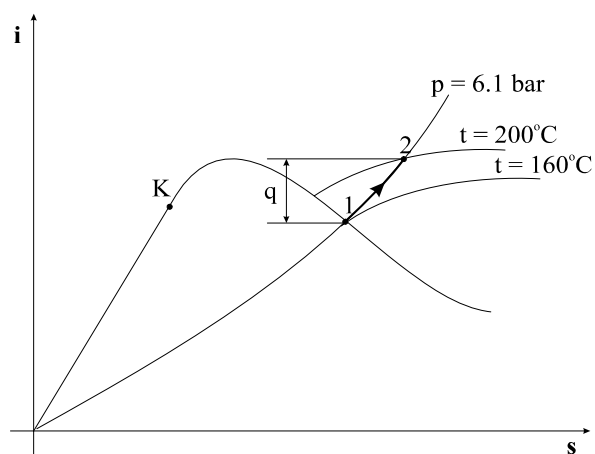
- 1.) Parametre pare pre pregrevanja
- 2.) Parametre pare nakon pregrevanja
- 3.) Količinu toplote potrebnu za pregrevanje 1 kg pare

Rešenje :

$$1.) t_1 = t'' = 160^\circ\text{C} \rightarrow p'' = 6.1 \text{ bar}, i_1 = i'' = 2760 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, s'' = 6.75 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}, v'' = 0.32 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$2.) t_2 = 200^\circ\text{C} \rightarrow p = 6.1 \text{ bar}, i_2 = 2850 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, s_2 = 6.95 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}, v_2 = 0.35 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$3.) q = \Delta i_{pr} = i_2 - i_1 = 2850 - 2760 = 90 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$



Slika 45

7. Vlažna para ($p_1 = 7 \text{ bar}$, $x_1 = 0.97$) se adijabatski prigušuje do $t_2 = 130^\circ \text{C}$. Odrediti :

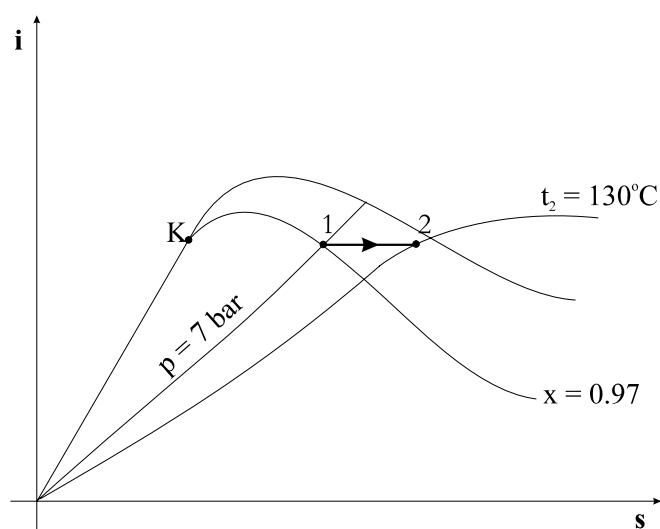
1.) Parametre pare nakon prigušenja :

2.) Promenu specifi č ne zapremine i entropije pare :

Resenje :

1.) Pri adijabatskom prigušenju je $i = \text{const}$.

$$t_2 = 130^\circ \text{C}, i = 2700 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \rightarrow p_2 = 2.6 \text{ bar}, s_2 = 6.98 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}, v_2 = 0.68 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$



Slika 46

2.) Kako je pre prigušivanja :

$$s_1 = 6.56 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}, v_1 = 0.27 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Dobija se :

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 6.98 - 6.56 = 0.42 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$\Delta v = v_2 - v_1 = 0.68 - 0.27 = 0.41 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Prigušenjem se para može prevoditi iz vlažne u suvo-zasićenu i pregrejanu bez naknadnog dovodjenja toplote. Prigušenje pare se obavlja na: blendama, mlaznicama ili venturimetrima, koje kao prigušnice služe za određivanje protoka i brzine strujanja pare (fluida) preko merenja razlike pritisaka pre i posle prigušnice.

6. Vlažan vazduh

Vlažan vazduh je mešavina suvog vazduha i vodene pare. Udeo jedne komponente (vodene pare) u vlažnom vazduhu se menja, što posebno karakteriše ovu mešavinu u odnosu na druge mešavine idealnog gasa. U preradi drveta koristi se kao agens sušenja kod sušara za drvo. Za pravilnu eksploataciju i proračun prostojanja i postupaka kao i za analizu konkretnih procesa potrebno je posebnu pažnju posvetiti izučavanju termodinamičkih osobina vlažnog vazduha. Sa obzirom da se u mnogim procesima: u klimatizacionim postrojenjima, sušarama, rashladnim uređajima, skladištenju materijala i sl., vlažnost vazduha menja, za analizu takvih procesa ne mogu se primiti klasične termodinamičke metode koje se primenjuju za mešavine konstantnog sastava.

Znatno su ređi specijalni suvi procesi kod kojih se menja sastav suvog vazduha na primer povećanjem udela ugljen-dioksida u suvom vazduhu prilikom skladištenja životnih namirnica, pa se takvi procesi posebno proučavaju. Prilikom osnovne analize u sledećim poglavljima smatraće se da je sastav suvog vazduha konstantan definisan uobičajnim prosečnim vrednostima njenih komponenata.

6.1 Termodinamičke osobine vlažnog vazduha

Apsolutna vlažnost vlažnog vazduha može se izraziti i odnosom kilo molova pare (n_p) i br. kilo molova suvog vazduha (n_{sv}) i dr. komponente odnosno molskom koncentracijom:

$$x = n_p / n_{sv} \text{ (kmol vlage / kmol suvog vazduha)}$$

Pošto su molarne mase pare (M_p) i suvog vazduha (M_{sv}) poznate:

$$M_w = 18,016 \text{ (kg/kmol)}, \quad M_{sv} = 28,964 \text{ (kg/kmol)}$$

$$x = n_p / n_{sv} = (m_p / M_w) / (m_{sv} / M_{sv})$$

Prema tome, apsolutna vlažnost vlažnog vazduha može se izraziti i preko odnosa mase pare (m_p) prema masi suvog vazduha (m_{sv}):

$$x = \frac{m_p}{m_{sv}} \text{ (kg pare / kg sv)} \quad (1)$$

Pošto je već naglašeno da u mnogim procesima dolazi do promene apsolutne vlažnosti vlažnog vazduha a masa ostaje nepromenljiva, često se za jedinicu mase vlažnog vazduha uzima 1kg suvog vazduha pomešan sa x(kg vlage).

U (1+x)kg vlažnog vazduha nalazi se 1kg suvog vazduha pomešan sa x(kg vlage) odnosno u 1kg vlažnog vazduha nalazi se $1/(1+x)$ kg suvog vazduha i $x/(1+x)$ kg vlage. Prema tome masa suvog vazduha može se uvek odrediti iz izraza:

$$m_{sv} = m_{vv} / (1+x)$$

Zapremina u kojoj se nalazi nezasićen vlažan vazduh pritiska ($p = p_{sv} + p_p$ – Daltonov zakon) koja se sastoji iz 1kg suvog vazduha p_{sv} i temperature t i x_p kg pregrijane vodene pare pritiska i temperature t obeležava se sa v_{1+x} .

Relativna vlažnost posmatranog vlažnog vazduha:

$$\varphi = \frac{p_p}{p_z}$$

p_p -parcijalni pritisak vodene pare u posmatranom stanju

p_z -parcijalni pritisak vodene pare u zasićenom vlažnom vazduhu iste tem.

Relativna vlažnost vlažnog vazduha često se izražava u procentima. Sem toga očigledno je da se relativna vlažnost može sračunati i preko gustine vodene pare u posmatranom ne zasićenom vlažnom vazduhu i gustine vodene pare u nezasićenom vlažnom vazduhu iste temperature.

Prilikom izobarskog hlađenja nezasićenog vlažnog vazduha apsolutna vlažnost x_p i parcijalni pritisak vodene pare p_p ostaju konstantni sve dok se ne dostigne temperatura koja se naziva temperatura tačke rose. Parcijalni pritisak vodene pare u dostignutoj tački rose odgovara pritisku zasićenja za temperaturu tačke rose t_r , pa se relativna vlažnost vlažnog vazduha može izraziti i na sledeći način:

$$\varphi = p_z(t_r) / p_z(t)$$

Veza izmedju apsolutne i relativne vlažnosti, imajući u vidu izraz (1) može se prikazati relacijom:

$$x = \frac{m_p}{m_{sv}} = \frac{R_{sv} p_p}{R_p p_{sv}} = \frac{M_p p_p}{M_{sv} p_{sv}} = 0,622 \cdot \frac{p_p}{p_{sv}} = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_z}{p - \varphi \cdot p_z}$$

Za ubičajene pritiske i temperature može se za specifičnu toplotu leda usvojiti konstantna vrednost:

$$c_{\epsilon} = 2,05 \text{ kJ/(kgK)},$$

pa izraz za entalpiju glasi:

$$i_{\epsilon} = r_{\epsilon} + c_{\epsilon} t = -333,4 + 2,05 \text{ kJ/kg}$$

Specifična entalpija vlažnost vazduha može se sada jednostavno odrediti kao zbir proizvoda mase komponenata i specifičnih entalpija pojedinih komponenata.

Entalpija i_{1+x} kg nezasićenog vlažnog vazduha kada se vlaga nalazi samo u parnom stanju (homogena mešavina suvog vazduha i suvozasićene vodene pare) biće:

$$i_{1+x} = 1 \cdot i_{sv} + x_p i_p$$

$$i_{1+x} = c_{psv} t + x_p (c_{pp} t + r_o)$$

odnosno:

$$i = 1 \cdot i_{sv} + x \cdot i_p = c_{psv} \cdot t + x \cdot (c_{pp} \cdot t + r_0) = 1.006 \cdot t + x \cdot (1.86 \cdot t + 2500) [\text{kJ/kgsv}]$$

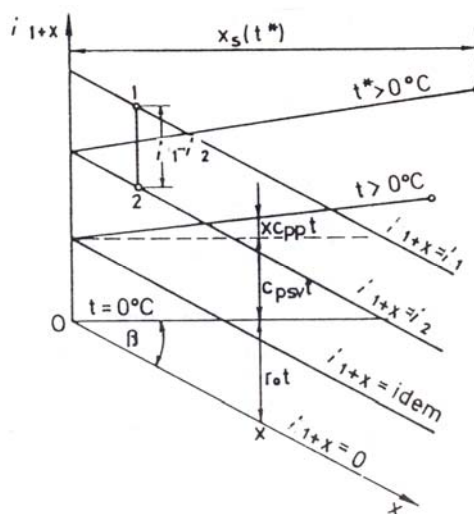
6.2 Dijagrami za vlažan vazduh

U ovom poglavlju biće reči o dijagramima koji se najviše koriste za analizu stanja vlažnog vazduha. To je pre svega i-x dijagram koji je najviše u upotrebi, a pored njega su i manje korišćeni psihrometarski dijagrami: p-t i x-t.

6.2.1 i-x dijagram za vlažan vazduh

Za konstantni pritisak (obično $p=100\text{kPa}=\text{const}$) najčešće je kod nas u upotrebi Mollijerov i-x dijagram stanja vlažnosti vazduha. U tom dijagramu na kordinati se nanosi vrednost specifične entapije i_{1+x} (kJ/kg s.v), vlažnog vazduha, a vrednosti apsolutne vlažnosti x , (kg vlage/kg s.v) vlažnog vazduha. Pošto je ovaj dijagram konstruisan za neki konstantan pritisak (obično $p=100\text{kPa}=\text{const}$) moguće je u njemu vršiti analizu izobarskih procesa. Prema osnovnim zakonima termodinamike entapije krajnjeg i početnog stanja za izobarske promene stanja, definiše razmenjenu količinu toplote.

Kosougli i-xdijagram za vlažan vazduh konstruiše se tako da je ugao između koordinatnih osa veći od 90°C i obično iznosi 135°C , odnosno koordinanta x-osa zaokrenuta je udesno i naniže (u smeru obrtanja kazaljke na časovniku) za ugao od 45°C . Postoje u upotrebi i takvi dijagrami na kojima je koordinanta x-osa zaokrenuta udesno i naniže za neki drugi (najčešće veći) ugao. Najpogodnija vrednost ovog ugla (ugao β na sl. 47) je ona, pri kojoj je izoterma $t=0^\circ\text{C}$ nezasićenog vlažnog vazduha (koja predstavlja pravu liniju, kao što je to ranije pokazano) upravna na ordinantnu osu (horizontalna). Sve izentalpe ostaju i dalje paralelnemeđu sobom i sa x-osom linije konstantne apsolutne vlažnosti ostaju vertikalne, a razlika specifičnih entalpija vlažnog vazduha za pojedina stanja (sl. 47).

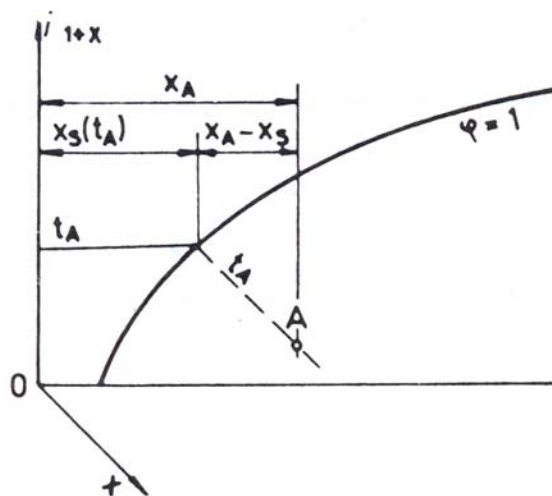


Slika 47: Izoterme i izentalpe vlažnog vazduha za nezasićeno područje

- Neka stanja vlažnog vazduha na i-x dijagramu

Neka tačka A u području magle (sl. 48) definiše stanje vlažnog vazduha u kome se nalaze u ravnoteži: suvi vazduh, suvozasícene vodena para i voda na temperaturi t_A . Pošto se masa suvo zasícene vodene pare $x_s(t_A)$ po kg suvog vazduha može direkto pročitati u i-x dijagramu za vlažan vazduh mase vode po kg suvog vazduha odražuje se kao razlika ukupne apsolutne vlažnosti x_A i apsolutne vlažnosti parne faze $x_p = x_s(t_A)$:

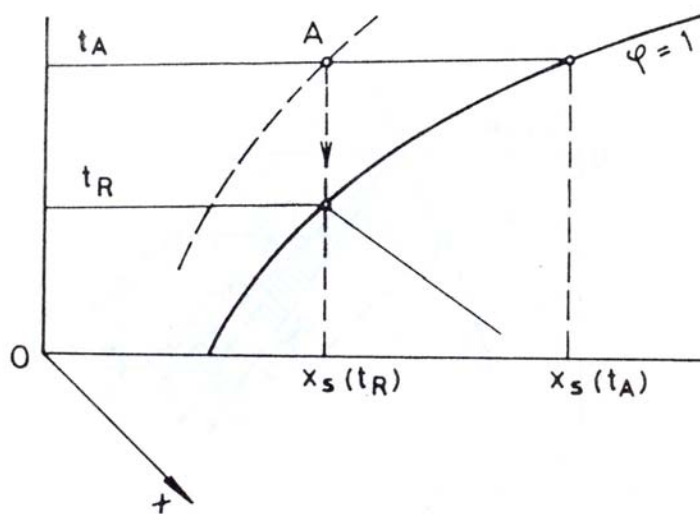
$$x_t = x_A - x_s(t_A)$$



Slika 48: Grafičko odredjivanje mase tečne faze

Može se dati i veoma jednostavno grafičko tumačenje relativne vlažnosti vazduha (sl. 49). Pri izobarskom hladjenju neasićenom vazduhu apsolutna vlažnost i parcijalni pritisak vodene pare se ne menjaju sve dok se ne dostigne temperature tačke rose (na liniji zasícenja). U tom slučaju vlažan vazduh je zasícen, a parcijalni pritisak vodene pare ima vrednost pritiska zasícenja za temperaturu tačke rose. Na osnovu ovih činjenica sledi da se relativna vlažnost vazduha može izraziti kao odnos pritiska zasícenja pri temperaturi tačke rose i pritiska zasícenja za posmatranu temperaturu t_A :

$$\varphi_A = \frac{p_s(t_R)}{p_s(t_A)}$$

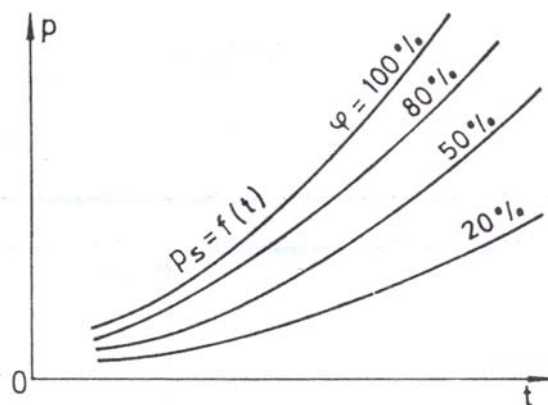


Slika 49: Grafičko tumačenje definicije relativne vlažnosti

6.2.2 Psihometarski dijagram

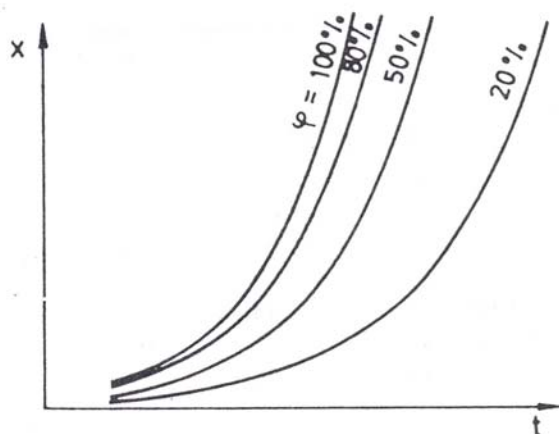
Psihometarski dijagram predstavlja analog i-x dijagramu za vlažan vazduh, a njegova upotreba je veoma rasprostranjena naročito u Americi i Velikoj Britaniji. Konstrukcija psihometrijskog dijagrama može biti izvedena prema podacima o zavisnosti pritiska zasićenja vodene pare od temperature, prema kojima se u p-t dijagramu može ucrtati kriva, odnosno linija zasićenja ($\varphi=100\%$, sl. 50). Dalje se korišćenjem veze između apsolutne vlažnosti vlažnog vazduha i parcijalnog pritiska vodene pare:

$$x=0,622 \frac{p_p}{(p-p_p)},$$



Slika 50: Psihometarski p-t dijagram

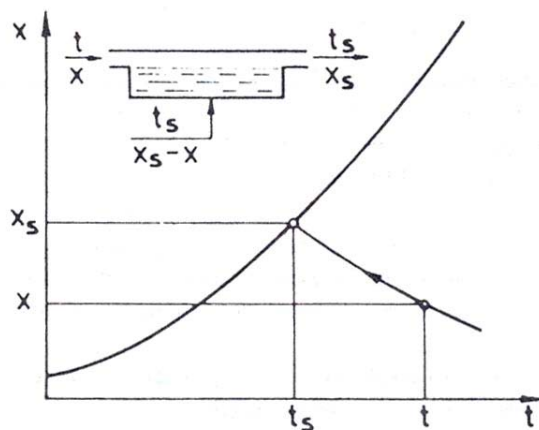
za neki određeni ukupni pritisak vlažnog vazduha $p=\text{const.}$, linije $\varphi=\text{const}$ preslikavaju u novi x-t koordinatni sistem, u kojem se one asimptotski približavaju vertikalama odgovarajućih temperatura (sl. 51).



Slika 51: Psihrometarski x-t dijagram

Za grafičku analizu promena stanja vlažnog vazduha, potrebno je u ovaj dijagram ucrtati i linije koje predstavljaju adijabatske promene stanja. Konstrukcija adijabata u psihometrijskom dijagramu proizilazi iz razmatranja procesa adijabatskog zasićenja vazduha nad površinom vode. Voda koja zasićuje vazduh, isparava, trošeći potrebnu toplotu na račun vazduha, pošto je sistem, prema pretpostavci, adijabatski.

Za postizanje stanja zasićenja vlažnog vazduha, potrebno je stalno dovoditi svežu vodu u iznosu $x_s - x$ po kilogramu suvog vazduha. Voda se dovodi pri temperaturi t_s , tj. istoj temperaturi koju ima i odlazeći vlažan vazduh, kada se stacionarno stanje uspostavi (sl. 52).



Slika 52: Adijabatsko zasićenje vlažnog vazduha

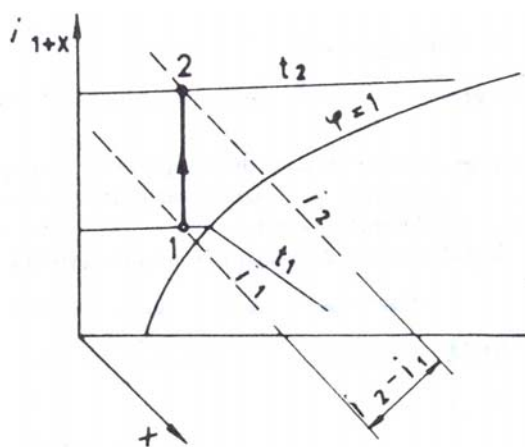
6.3 Idealizovane termodinamičke promene stanja vlažnog vazduha

Za većinu termodinamičkih promena stanja vlažnog vazduha, koje se proučavaju u tehnici klimatizacije, grejanja i hlađenja, kao i u tehnologiji konvektivnog sušenja i mnogim drugim tehnološkim procesima, može se smatrati da nastaju pri konstantnom velikom pritisku vlažnog vazduha. Ranije je već naglašeno da pošto jedna veličina vlažnog vazduha ostaje nepromenjena ($p = \text{const}$), analiza takvog stanja moguća je u raznim ravanskim (dvodimenzionalnim) koordinantnim sistemima. Kako je kod nas

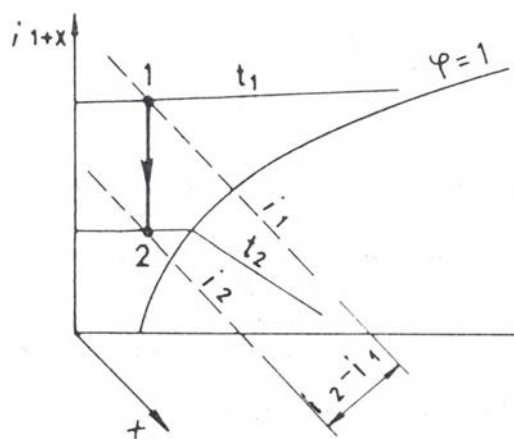
najčešće u upotrebi, ranije proučeni, i-x dijagram stanja vlažnog vazduha, on će nam koristiti za prikaz osnovni idealizovanih termodinamičkih promena stanja iako se principijalno mogu koristiti i drugi koordinantni sistemi (na primer x-t dijagram, i-s dijagram ili i-t dijagram), kao i razni nomogrami.

6.3.1 Proces izobarskog zagrevanja i hlađenja vlažnog vazduha

Prilikom izobarskog zagrevanja ili hlađenja vlažnog vazduha njegova apsolutna vlažnost se ne menja ($x = \text{const}$) pa su ovi procesi predstavljeni vertikalama u i-x dijagramu za vlažan vazduh sa smerom naviše u slučaju zagrevanja (sl. 53) odnosno sa smerom naniže u slučaju izobarskog hlađenja (sl. 54).



Slika 53: Izobarsko zagrevanje vlažnog vazduha



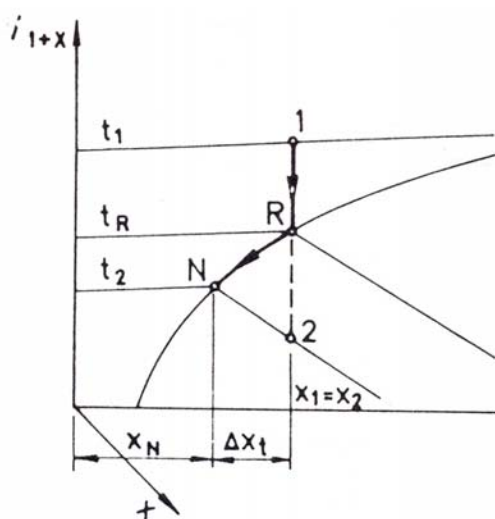
Slika 54: Izobarsko hlađenje vlažnog vazduha

Pri izobarskom zagrevanju (hlađenju) mase $m_{vv} = m_{sv}(1+x)$ vlažnog vazduha od početnog stanja $1(p, t_1, h_1)$ do krajnjeg stanja $2(p, t_2, h_2)$, potrebno je dovesti (odvesti) količinu toplote:

$$Q_{12}=I_2-I_1=m_{sv}(i_2-i_1), \text{ (kJ)}$$

pri čemu se razlika specifičnih entalpija (i_2-i_1) može takođe direktno očitati u i - x dijagramu za vlažan vazduh.

Ako bi se izobarsko hlađenje vlažnog vazduha izvršilo do temperature koja je niža od temperature tačke rose, stanje 2. vlažnog vazduha nalazilo bi se u području magle (sl. 55), došlo je do delimične kondenzacije vodene pare iz vlažnog vazduha, pa se u vlažnom vazduhu stanja 2. nalazi i tečna faza (voda).



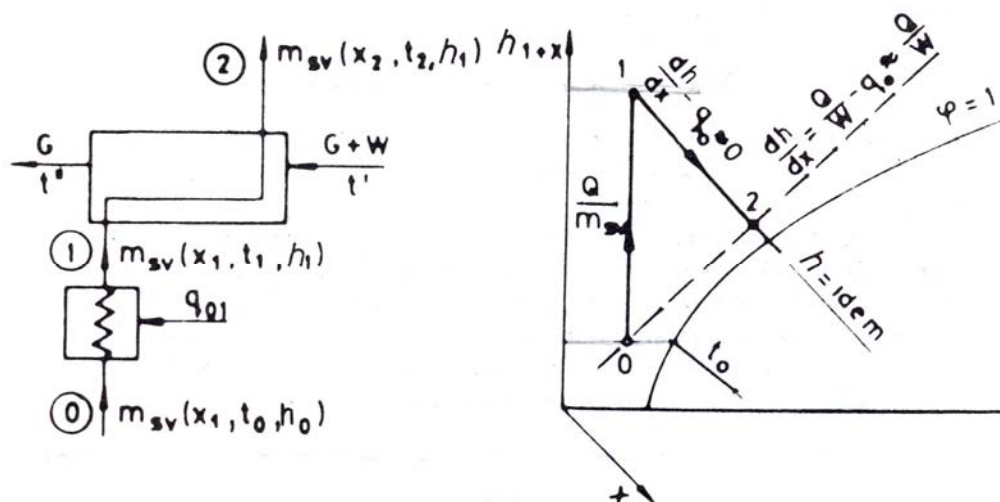
Slika 55: Izobarsko hlađenje vlažnog vazduha sa izdvajanjem kondenzata

Pri ovom izobarskom hlađenju, proces se, integralno posmatrano, odvija pri $x = \text{const}$ od stanja 1 (p, t_1, h_1) do stanja 2 (p, t_2, h_2). Međutim, kada se pri snižavanju temperature dostigne temperatura tačke rose t_R , vlažan vazduh postaje zasićen i promena stanja tog zasićenog vlažnog vazduha (kada se on posmatra nezavisno od kondenzata koji se stvara u sve većoj količini pri daljem snižavanju temperature) odvija se po liniji $\phi = 1$, od tačke R do tačke N.

Tako u stanju 2. na tem. t_2 postoji suv vazduh, suvo zasićenom vodenom parom čija je masa po kg suvog vazduha određena apsisom $x_N = x_s(t_2)$ i kondenzat čija je masa po kg suvog vazduha jednaka razlici $x_2 - x_N = x_2 - x_s(t_2)$

6.3.2. Izobarska-izentalpska promena stanja vlažnog vazduha

Izobarska-izentalpska promena stanja vlažnog vazduha može se teorijski ostvariti u idealizovanoj adijabatskoj konvektivnoj sušari (sl. 56).



Slika 56: Šema idealizovane adijabatske sušare i skica procesa u i-x dijagramu

Da bi se povišenjem temperature smanjila relativna vlažnost vlažnog vazduha spoljašnjem vazduha stanja 0 ($x_0=x_1$, t_0 , i_0) izobarski se dovodi u grejnom telu (kaloriferu) količina toplote:

$$q_{01} = i_1 - i_0 \text{ (kJ/(1+x) kg v.v.)},$$

odnosno:

$$Q = I_1 - I_0 = m_{sv}(i_1 - i_0) \text{ (kJ)}$$

Vlažan vazduh ulazi u adijabatski izolovanu sušaru sa stnjem 1 (x_1, t_1, h_1) a napušta sušaru sa stanjem 2 (x_2, t_2, h_2). S druge strane u sušaru ulazi neki drugi vlažni materijal mase ($G+W$) temperature T , a napušta je osušen materijal mase G i temperature t'' .

$$W = m_{sv}(x_2 - x_1) \text{ (kg vlage)}$$

Toplotni bilans idealizovane sušare glasi:

$$Q = m_{sv}(i_2 - i_0) + Gc(t'' - t) - Wc_w t$$

Količina toplote koja je potrebna za izdvajanje jednog kg vlage iz vlažnog materijala iznosi:

$$q = Q/W = i_2 - i_0/x_1 - x_2 + G/W(t'' - t) - c_s t$$

odnosno:

$$q = i_2 - i_0/x_2 - x_1 + q_0 = h_2 - h_0/x_2 - x_1 = i_1 - i_0/x_2 - x_1 \text{ (kJ/kg vlage)}$$

pošto se može smatrati da je:

$$q_0 = c(G/W)(t'' - t) - c_w t \sim 0$$

6.3.3 Procesi izobarskog mešanja dve struje vlažnog vazduha

Često u praksi dolazi do mešanja dve struje vlažnog vazduha. Na primer, kod sušara sa recirkulacijom stalno se jedna količina svežeg vazduha ubacuje (obično oko 5%), ili kod klimatizacije kad zasićen vlažana vazduh odlazi putem kondenzacije, a novi se ubacuje.

Prilikom mešanja vlažnog vazduha stanja 1 (p, x_1, i_1) i stanja 2 (p, x_2, i_2) potrebno je odrediti veličine stanja novonastale mešavine M.

Materijalni bilans suvog vazduha glasi:

$$\dot{m}_{svm} = \dot{m}_{sv1} + \dot{m}_{sv2},$$

a materijalni bilans vlage:

$$\dot{m}_{sv1} \cdot x_1 + \dot{m}_{sv2} \cdot x_2 = \dot{m}_{svm} \cdot x_m,$$

dok je toplotni bilans ovog izobarsko-adijabatskog procesa mešanja definisan izrazom:

$$\dot{m}_{sv1} \cdot i_1 + \dot{m}_{sv2} \cdot i_2 = \dot{m}_{svm} \cdot i_m$$

Iz pomenutog materijalnog i toplotnog bilansa može se odrediti stanje mešavine M (p, x_M, i_M) kao:

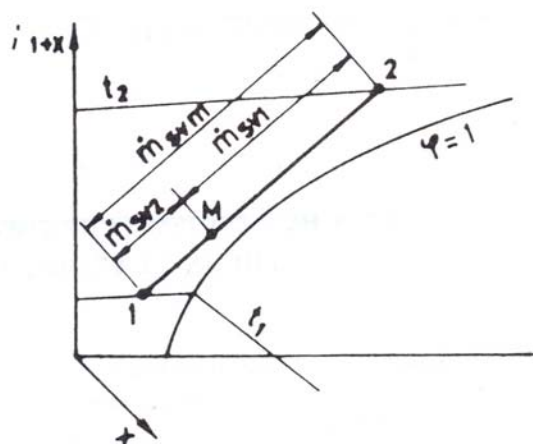
$$x_m = \frac{\dot{m}_{sv1} \cdot x_1 + \dot{m}_{sv2} \cdot x_2}{\dot{m}_{svm}}$$

$$i_m = \frac{\dot{m}_{sv1} \cdot i_1 + \dot{m}_{sv2} \cdot i_2}{\dot{m}_{svm}}$$

Iz istih bilansa uspostavlja se pravilo mešanja (tzv. zakon poluge) koji glasi:

$$\frac{i_1 - i_M}{i_M - i_2} = \frac{x_1 - x_M}{x_M - x_2} = \frac{\dot{m}_{sv2}}{\dot{m}_{sv1}}$$

i iz koga sledi da se stanje mešavine M nalazi na duži koju određuju stanja 1 i 2 (slika 57), tako da deli duž 12 u odnosu protoka suvog vazduha stanja 1. i suvog vazduha stanja 2.



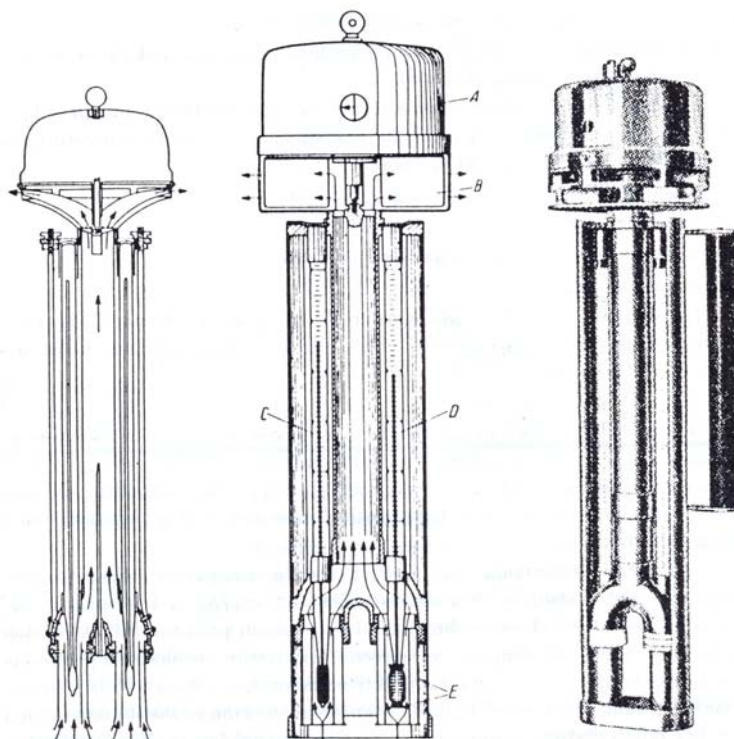
Slika 57: Mešanje dve struje vlažnog vazduha

6.4 Merenje vlažnosti vazduha

Za određivanje veličina stanja koje karakterišu vlažnost vazduha, postoji veliki broj postupaka i metoda, jer još ne postoji higrometar koji bi objedinio sve pozitivne osobine, kao što su osetljivost, tačnost, stabilnost, brzo reagovanje, dugotrajnost, jednostavno rukovanje i održavanje, a da pri tome ima i relativno nisku cenu. Svi postupci koji se upotrebljavaju imaju izraženu po neku od ovih osobina, i to ih čini pogodnim za merenje pri određenim uslovima.

6.4.1 Psihrometar

Psihrometarski metod predstavlja već klasičan, u praksi najrasprostranjeniji i najviše proveravani i proučavani metod merenja vlažnosti vazduha. Zasniva se na merenju razlike temperature u struji vazduha: temperature suvog termometra (stvarne temperature vlažnog vazduha) i temperature vlažnog termometra (temperature potpuno okvašene površine sa koje voda isparava u nezasićeni vlažan vazduh) – sl.58.



Slika 58: Aspiracioni psihrometri: A-pogon ventilatora, B-ventilator, C-suvi termometar, D-vlažni termometar, E-ekran za zaštitu od zračenja.

Pri ovome se koristi efekat snižavanja temperature vlažne površine pri isparavanju (otud i naziv, od grčkog "psihros"-hladan). Isparavanje sa površine vlažnog termometra je utoliko intenzivnije (i utoliko će biti niza temperatura vlažnog termometra t_{vt}), u koliko je parcijalni pritisak vodene pare u vlažnom vazduhu manji od pritiska zasićenja vodene pare, pri datoj temperature po suvom termometru t_{st} . Takodje da bi se proces isparavanja pospešio koristi se ventilator B (sl.58). Na osnovu razlike $t_{st}-t_{vt}$, takozvane psihrometerske razlike, može se odrediti parcijalni pritisak vodene pare, odnosno relativna vlažnost vazduha. Na osnovu materijalnog i toplotnog isparavanja vode sa površine vlažnog termometra i nekih uvedenih pretpostavki, dolazi se do jednostavne empirijske veze izmedju parcijalnog pritiska vodene pare i psihrometerske razlike temperature, u obliku takozvane psihrometerske jednačine:

$$p_p = p_s(t_{vt}) - A_p(t_{st} - t_{vt})$$

u kojoj veličina A_p predstavlja psihometrijsku konstantu. Njena vrednost u najopstijem slučaju zavisi od geometrijskog oblika i dimenzija osetljivog dela vlažnog termometra i od strujnog i temperaturnog polja u blizini okvašene površine. Dobro konstruisanim psihrometrima može se, pažljivo postupkom merenja pri temperaturama vazduha iznad 0°C , odrediti relativna vlažnost sa tačnošću 2%, dok za interval od -10° do 80°C tačnosti

6.4.2 Higrometri na principu promene impedance

Poslednjih godina intenzivno se radi na usavršavanju davača higrometara, čiji se princip zasniva na promeni elektro-fizičkih osobina (otpora i kapacitivnosti) davača pri promeni vlažnosti sredine. Za razliku od elektrolitičko-sorpcionog metoda, kod koga se meri otpor električne provodljivosti samog higroosetljivog materijala, u ovoj metodi higroosetljiv material ne učestvuje direktno u procesu provodjenja, odnosno u kapacitivnim metodama pojavljuje se kao dielektrik koji jako reaguje na promenu relativne vlažnosti vazduha.

Karakteristike ovakvog davača određene su zavisnošću vlažnosti (sadržaja vlage) higroosetljivog materijala od vlažnosti okolnog vazduha (izoterme sorpcije i desorpcije) i zavisnošću izlazne električne veličine od vlažnosti higroosetljivog materijala.

Ove zavisnosti, a posebno ova druga, ne mogu se tačno odrediti zbog nemogućnosti da se utvrdi polje vlažnosti u higroosetljivom materijalu. Iz tog razloga većina istraživanja u ovom pravcu ima empirijski karakter. Nezavisno od toga, uspeši koji su već postignuti govore, za sada, o najvećoj perspektivi upravo ovih higrometara u takozvanoj “električnoj higrometriji”.

Senzor davača ima dimenziju 4x4x0,2mm i vremensku konstantu manju od 1s za 90% krajnje vrednosti pokazivanja relativne vlažnosti. Opseg merenja iznosi 0 do 100% relativne vlažnosti u temperaturskom intervalu od -40°C do +80°C.

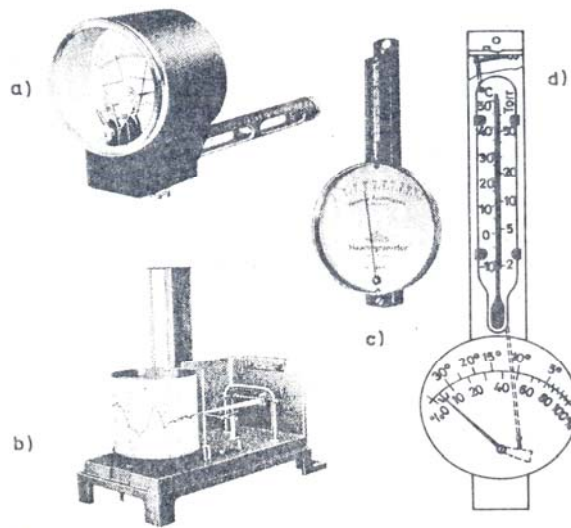
Osetljivost je veća od 0,5%, a histerezis manji od 2% za promenu vlažnosti 0/100/0%. Senzor je postavljen na držač u kome je smesten sistem za temperatursku kompenzaciju i sistem za temperatursku kompenzaciju i sistem za podešavanje kalibracije. Pokazivač ima linearnu skalu relativne vlažnosti.

6.4.3 Higrometri sa dlakom

Za merenje vlažnosti vazduha često se koriste osobine raznih materija prirodnog ili veštačkog porekla, da bi se izduživale (skraćivale) ili deformisale pri promeni relativne vlažnosti vazduha.

Najčešće upotrebljavani material je tehnološki pripremljena dlaka (vlas) kose, čije je puno izduženje 2 do 2,5% i nelinearno pri promeni relativne vlažnosti od 0 do 100%. Ovaj poznati tip higrometara vrlo je rasprostranjen, zahvaljujući jednostavnosti konstrukcije i niskoj ceni. Mogućno je dobijanje jednostavnog mehanickog zapisivanja vlažnosti, a i regulisanje vlažnosti uz pomoć kontaktnih ili reostatskih davača (sl. 59).

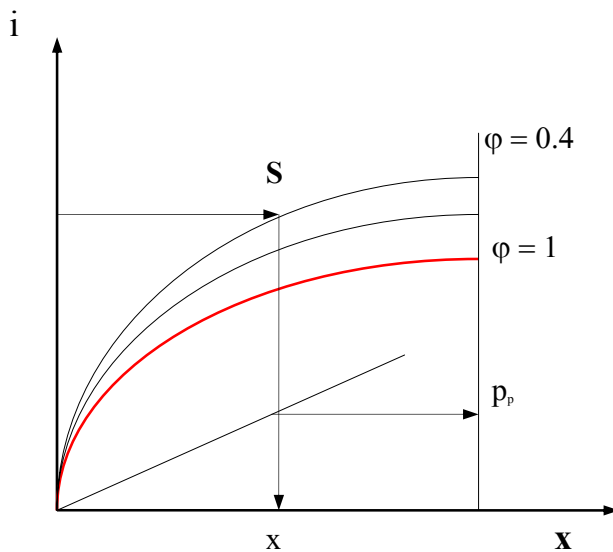
Glavni nedostaci ovih higrometara su velika inercija, znatan histerezis, i naročito promena karakteristika sa vremenom (na primer, oni pokazuju povećanje vrednosti posle dužeg stajanja pri niskim vlažnostima). Greška pri merenju iznosi 5% (a može biti manja ili veća, zavisno od tipa higrometra) u intervalu relativne vlažnosti 0 do 100% i pri temperaturama od -30° do 60°C, a inercija iznosi oko 15 minuta (vreme postizanja 90% krajnjeg pokazivanja). Valjanjem dlake do eliptičnog poprečnog preseka (sa odnosom poluosa elipsa 4:1) povećava se osetljivost i smanjenje grešaka i inercija.



Slika 59: Higrometri sa dlakom

-Primeri rešenih zadataka

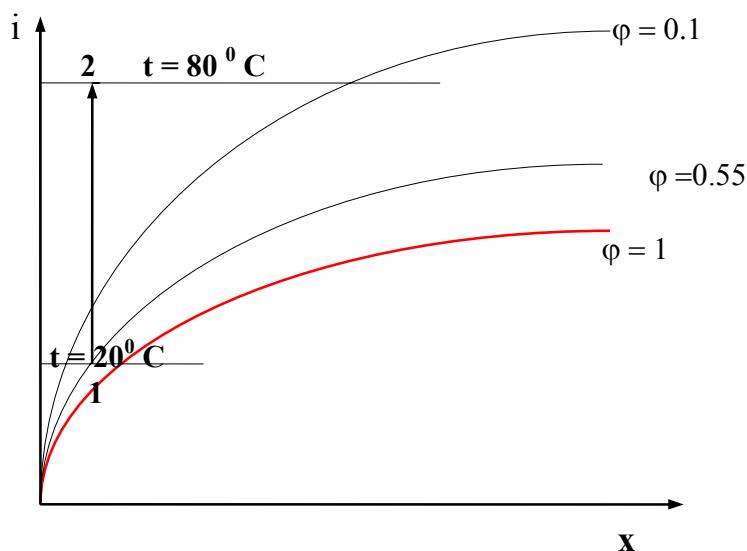
1. Odredite parametre stanja vlažnog vazduha, relativne vlažnosti 40 % koji se nalazi na temperaturi $t = 50^\circ\text{C}$.



Sa $i - x$ dijagrama se nakon pronalaska tačke "S" koja određuje stanje vlažnog vazduha očitava:

$$i = 133 \frac{\text{kJ}}{\text{kg sv}}, \quad x = 0.032 \frac{\text{kg vl}}{\text{kg sv}}, \quad p_p = 48 \text{ mbar}, \quad v = 0.97 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

2. Vlažan vazduh početnog stanja $t_1=20^\circ\text{C}$ i $\phi_1=55\%$ se zagreva do $t_2=80^\circ\text{C}$. Odrediti parametre vlažnog vazduha nakon zagrevanja.



$$i_2 = 101.7 \text{ kJ/kg sv}, x_2 = 0.008 \text{ kg vl / kg sv}, v_2 = 1.025 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Kako je ϕ_2 nemoguće očitati ono se može odrediti računski kao

$$\phi_2 = \frac{p_{p_2}}{p_{z_2}} = \frac{13}{473.6} = 0.027 \text{ tj. } \phi_2 = 2.7 \text{ \%}.$$

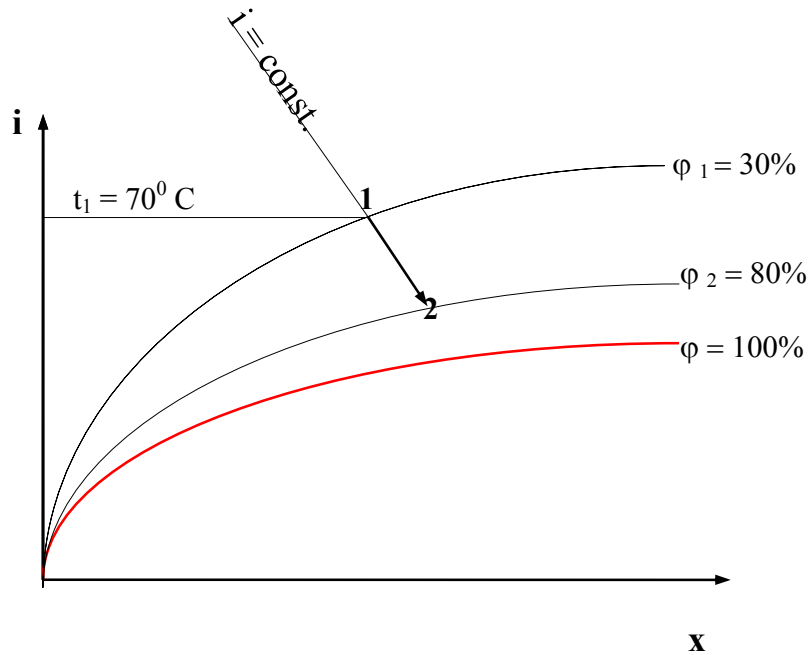
Vidimo da zagrejani vazduh ima veću entalpiju ($i_2 > i_1$), nižu relativnu vlažnost ($\phi_2 < \phi_1$); dok se stepen vlažnosti i parcijalni pritisak vodene pare ne menjaju ($x_2 = x_1 = \text{const.}$, $p_{p_2} = p_{p_1} = \text{const.}$).

3. U sušaru za drvo ulazi vlažan vazduh temperature $t = 70^\circ\text{C}$ i relativne vlažnosti $\phi=30\%$ a izlazi iz nje kad mu vlažnost dostigne $\phi=80\%$. Odrediti parametre vazduha na izlazu.

Rešenje:

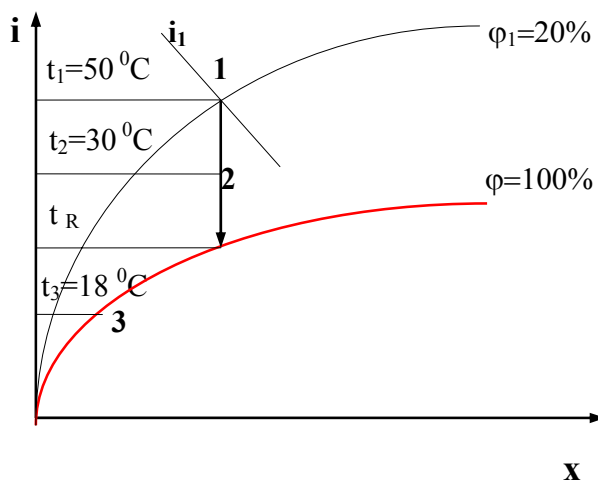
Kako je $i = \text{const.}$ biće : $i_2 = i_1 = 240 \text{ kJ/kg sv}$ i $x_2 = 0.0725 \text{ kg vl/ kg sv}$.

Ohlađeni vazduh u procesu sušenja ima višu relativnu vlažnost ($\phi_2 > \phi_1$), veći stepen vlažnosti ($x_2 > x_1$), a time i parcijalni pritisak ($p_{p_2} > p_{p_1}$), nižu temperaturu ($t_2 < t_1$) dok je entalpija ostala nepromenjena ($i_2 = i_1 = \text{const.}$).



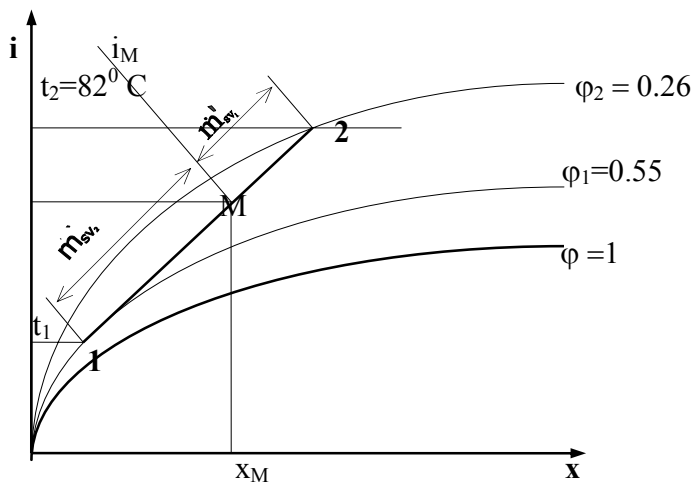
4. Vlažan vazduh ($t_1=50^\circ\text{C}, \varphi=20\%$), se izobarski hladi bez primanja vlage do temperature $t_2=30^\circ\text{C}$. Odrediti:
- 1.) Parametre stanja ohlađenog vazduha
 - 2.) Temperaturu tačke rose
 - 3.) Količinu izdvojenog kondezata ako bi se hladio do 18°C .

Rešenje:



- 1.) $i_2 = 70.8 \text{ kJ/kg}$, $x_2 = x_1 = 0.016 \text{ kg vl/kg sv}$
- 2.) $t_R = 21^\circ\text{C}$
- 3.) $\Delta x = x_2 - x_1 = 0.016 - 0.011 = 0.005 \text{ kg vl/kg sv}$

5. U rekuperativnoj sušari za drvo meša se izrađeni vlažan vazduh temperature $t_2 = 82^\circ\text{C}$ i vlažnosti $\phi_2 = 26\%$ sa 5% spoljašnjeg vazduha temperature $t_1 = 18^\circ\text{C}$ i vlažnosti $\phi_1 = 55\%$. Protok vlažnog vazduha je $\dot{m}_{vv} = 41.126 \text{ kg/h}$. Izračunati parametre mešavine.



Rešenje:

Preko izraza:

$$x = 0.622 \cdot \frac{\phi \cdot p_z}{p - \phi \cdot p_z}$$

$$i = 1.006 \cdot t + x \cdot (1.86 \cdot t + 2500)$$

$$\dot{m}_{sv} = \frac{\dot{m}_{vv}}{1 + x}$$

dobijamo za svež vazduh

$$x_1 = 0.00714 \text{ kg vl/kg sv}, \quad i_1 = 36.2 \text{ kJ/kg sv}, \quad \dot{m}_{sv1} = 40.83 \text{ kg/h}$$

a za izradjen

$$x_2 = 0.09580 \text{ kg vl/kg sv}, \quad i_2 = 336.6 \text{ kJ/kg sv}, \quad \dot{m}_{sv2} = 37.53 \text{ kg/h}$$

Kako se 95% izradjenog vazduha vraća u proces sušenja biće:

$$m_{sv2} = 0.95 \cdot m_{sv1} = 35.7 \text{ kg / h}$$

a prema materijalnom bilansu suvog vazduha dobija se:

$$m_{svm} = m_{sv1} + m_{sv2} = 40.83 + 35.7 = 76.53 \text{ kg / h}$$

Iz materijalnog bilansa vlage je:

$$m_{sv1} \cdot x_1 + m_{sv2} \cdot x_2 = m_{svm} \cdot x_m$$

$$x_m = \frac{m_{sv1} \cdot x_1 + m_{sv2} \cdot x_2}{m_{svm}} = 0.04850 \text{ kgvl / kgsv}$$

dok je toplotni bilans izobarsko-adijabatskog procesa mešanja definisan izrazom:

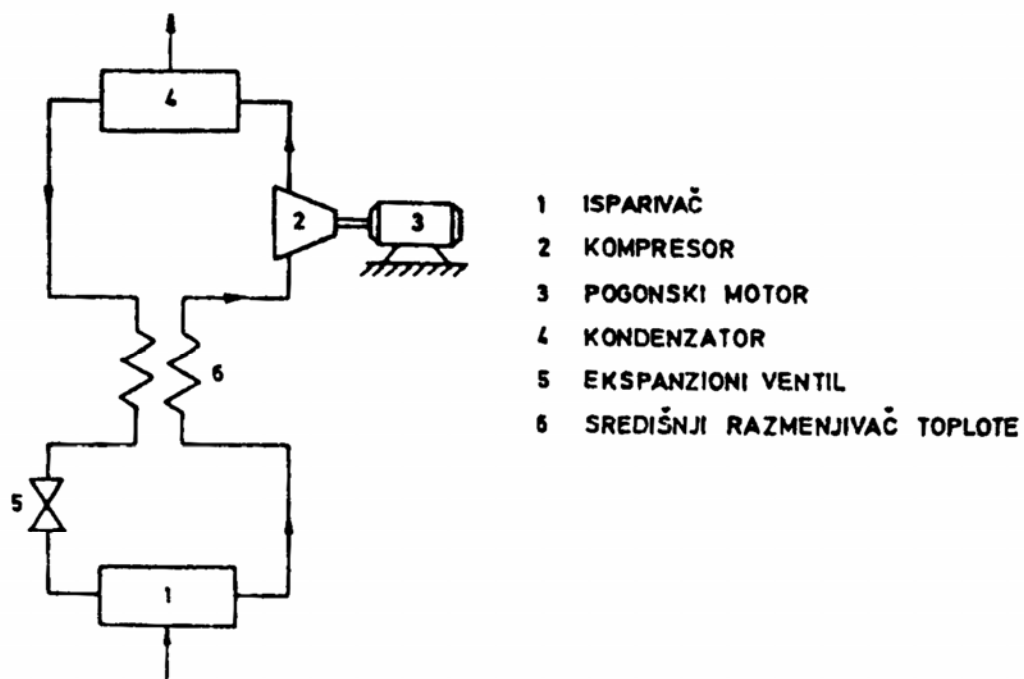
$$m_{sv1} \cdot i_1 + m_{sv2} \cdot i_2 = m_{svm} \cdot i_m$$

$$i_m = \frac{m_{sv1} \cdot i_1 + m_{sv2} \cdot i_2}{m_{svm}} = 176.33 \text{ kJ / kg sv}$$

7. Toplotna pumpa

Teoretske osnove rada toplotnih pumpi bile su poznate još u XIX veku. Međutim, iako je prva toplotna pumpa konstruisana već 1920.god., tek sa početkom 70-ih godina XX veka započinje njihov intenzivan razvoj. Ovo je svakako bilo prouzrokovano pojavom energetske krize, kad energetske efikasni sistemi postaju aktuelni i intenzivira se rad na poboljšanju njihovih energetskih karakteristika.

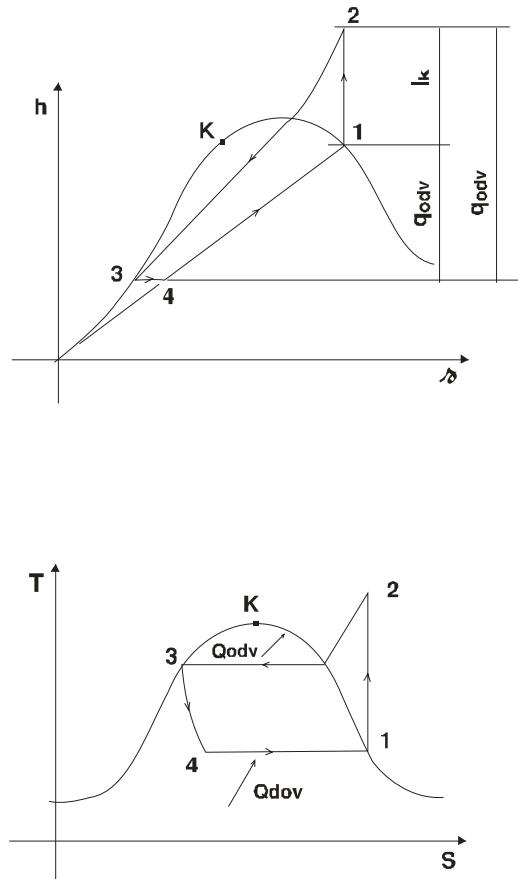
Toplotna pumpa predstavlja toplotnu mašinu koja za razliku od ostalih toplotnih mašina radi po levokretnom Rankin-Klauzisonovom kružnom procesu i uz "stabilan" toplotni izvor konstantne temperature može ostvariti visok toplotni učinak. Naime, pri uloženoj 1Kwh električne energije za pogon kompresora toplotne pumpe, može se dobiti trostruko više toplote potrebne za grejanje. Shematski prikaz rada pumpe dat je na slici 61.:



Slika 61: Šema rada toplotne pumpe

U isparivaču (1) toplotne pumpe radni fluid prima toplotu od toplotnog izvora, pri konstantnom pritisku. Kompresor (2) povišava pritisak, a samim tim i temperaturu radnog fluida koji usled toga u kondenzatoru toplotne pumpe (4) predaje toplote okolnom vazduhu (toplotnom ponoru) koga greje i na taj način ostvaruje svoj koristan učinak. Ekspanzioni (prigušni) ventil (5) snižava pritisak radnog fluida, a time i temperaturu tako da je on opet u mogućnosti da prima toplotu od toplotnog izvora u isparivaču (1). Radi postizanja boljeg toplotnog učinka u pogledu predaje toplote okolnom vazduhu iz kondenzatora (4), radni fluid koji vrši kružni ciklus se može naknadno zagrevati u središnjem razmenjivaču toplote (6).

Kao toplotni izvor obično se koristi prirodni toplotni izvor velikog i približno konstantnog toplotnog kapaciteta (slojevi zemlje ispod njene površine, dubina površinskih stajaćih voda: jezera, mora i dr., atmosferskog vazduha i sl.). Međutim, usled smanjenog koeficijenta grejanja u periodima kada je potreba za grejnom energijom najveća, zemlja koja ima stalnu temperaturu tokom čitave grejne sezone pokazala se kao najadekvatniji toplotni izvor za primenu.



Slika 62: Levokretni Rankin-Klauzisev kružni ciklus u i-s i T-s koordinatnom sistemu

Sam kružni ciklus rada toplotne pumpe prikazan je na slici 62. Ovakav ciklus naziva se levokretni Rankin-Klauzisev kružni ciklus i karakterističan je kako kod toplotne pumpe tako i kod rashladnih uređaja. Karakteristični su sledeći delovi ciklusa:

- 1-2 sabijanje u kompresoru koje je u idealnom slučaju adijabatsko-porast pritiska radnog fluida,
- 2-3 odvođenje toplote radnom fluidu (freonu) u kondenzatoru toplotne pumpe pri konstantnom pritisku,
- 3-4 prigušni ventil – izaziva pad pritiska u instalaciji toplotne pumpe
- 4-1 dovodjenje toplote radnom fluidu (freonu) u isparivaču toplotne pumpe pri konstantnom pritisku.

Stepen efikasnosti ciklusa izražava se preko koeficijenta grejanja:

$$\varepsilon_g = \frac{\text{korisno}}{\text{uloženo}} = \frac{q_{odv}}{l_k} = \frac{i_2 - i_3}{i_2 - i_1} > 1$$

Uspostavljanjem strogih ekoloških zahteva u pogledu zaštite životne sredine, kod savremenih toplotnih pumpi koristi se uglavnom novija generacija freona sa oznakom R22. Takodje, uvode se i freoni sa svojstvima “klizanja” temperature (*slide temperature effect*) kakav je npr. freon 407C, kod kojih temperatura raste pri njihovom izobarskom isparavanju,

odnosno se snižava pri izobarskoj kondenzaciji, obezbeđujući pri tom uslove za porast koeficijenta grejanja.

U poslednje vreme došlo i do unapredjenja samih toplotnih pumpi. Praktično je uvedena posebna konstrukcija vijčanog (*scroll*) kompresora sa ubrizgavanjem pare (EVI sistem – *Enhanced Vapour Injection*) što omogućava da se ostvari ciklus sa prividno dvostepenim sabijanjem pare. Na taj način postignuto je dodatno povećanje koeficijenta grejanja toplotne pumpe, što ju je još više približilo njenoj upotrebi u praktične svrhe.

U preradi drveta, toplotna pumpa našla je svoju primenu kod kondenzacionih sušara za drvo. Izradjeni vlažan vazduh koji izlazi iz sušare prima toplotu od kondenzatora toplotne pumpe, pri čemu mu se temperatura povišava, a relativna vlažnost smanjuje. Na ovaj način, on se ponovo može uvesti kao agens sušenja u sušaru. Međutim, mana jedne ovakve kondenzacione sušare koja radi na principu toplotne pumpe je u tome što se na izlazu iz pumpe ne može ostvariti viša temperatura od oko 70°C , a često je u zavisnosti od vrste i debljine gradje za postizanje konačne vlažnosti potrebne temperature i do preko 90°C . S toga je potrebno dodatno konvektivno zagrevati vazduh u sušari ili putem središnjeg razmenjivača toplote (6) dovesti radnom fluidu toplotu tako da će više toplote predati u kondenzatoru (4) agensu sušenja.

- Primer rešenog zadatka:

1. Vlažan vazduh nakon izlaska iz sušare ulazi u isparivač toplotne pumpe. Radni fluid oduzima toplotu od vlažnog vazduha snižavajući mu temperaturu i količinu vlage u vazduhu. U kondenzatoru toplotne pumpe radni fluid predaje toplotu zagrevajući isušeni vazduh pre ponovnog ulaska u sušaru.

Ako su:

- temperatura vazduha na ulazu u toplotnu pumpu 45°C , a relativna vlaga 70 % ;
- temperatura vazduha na izlazu iz isparivača 25°C , a relativna vlaga 55 % ;
- temperatura vazduha na izlazu iz toplotne pumpe 48°C , a relativna vlaga 55 %.

Potrebno je naći:

- 1) Entalpije vlažnog vazduha
- 2) Količinu isparene vode iz drveta po 1kg izradjenog vazduha
- 3) Koeficijent grejanja toplotne pumpe

Rešenje :

1) Entalpiju vlažnog vazduha na ulazu u toplotnu pumpu moguće je izračunati korišćenjem sledeće formule:

$$i_1 = t_1 + 0.001 \cdot x_1 \cdot (2486 + 1.92 \cdot t_1) [\text{kJ/kg}]$$

gde je :

$$t_1 = 45^\circ \text{C (iz zadatka)}$$

$$x = 622 \cdot \frac{p_{p1}}{p - p_{p1}} [\text{g/kg}]$$

$$p = 1013 \text{ mbar (normalni atmosferski pritisak)}$$

$$p_p = \varphi \cdot p_{pz1}$$

$$p_{pz1} = 92 \text{ mbar} \left(\begin{array}{l} \text{pritisak zasícenja vodene pare na tempreaturi od} \\ 45^\circ \text{C izvadjen iz tablice za vodenu paru} \end{array} \right)$$

$$\varphi_1 = 0.7 \text{ relativna vlaga vazduha (iz zadatka)}$$

$$p_{p1} = 0.7 \cdot 92 = 64.4 \text{ mbar}$$

$$x_1 = 622 \cdot \frac{64.4}{1013 - 64.5} = 42.23 \text{ g/kg}$$

$$i_1 = 45 + 0.001 \cdot 42.23 \cdot (2486 + 1.92 \cdot 45) = 153.63 \text{ kJ/kg}$$

Entalpiju vlažnog vazduha na izlazu iz isparivača toplotne pumpe moguće je izračunati korišćenjem istih formula za sledeće podatke:

$$t_2 = 25^\circ \text{C (iz zadatka)}$$

$$p_{p2} = 32 \text{ mbar}$$

$$x_2 = 622 \cdot \frac{32}{1013 - 32} = 20.3 \text{ g/kg}$$

$$i_2 = 25 + 0.001 \cdot 20.3 \cdot (2486 + 1.92 \cdot 25) = 76.44 \text{ kJ/kg}$$

Entalpiju vlažnog vazduha na izlazu iz toplotne pumpe moguće je izračunati korišćenjem istih formula za sledeće podatke:

$$t_3 = 49^\circ \text{C (iz zadatka)}$$

$$\varphi_3 = 0.55 \text{ (iz zadatka)}$$

$$p_{pz3} = 118 \text{ mbar (iz tablice)}$$

$$p_{p3} = 0.57 \cdot 118 = 67.26 \text{ mbar}$$

$$x_3 = 622 \cdot \frac{67.26}{1013 - 67.26} = 44.23 \text{ g/kg}$$

$$i_3 = 49 + 0.001 \cdot 44.23 \cdot (2486 + 1.92 \cdot 49) = 163.11 \text{ kJ/kg}$$

2) Količina isparene vode iz drveta može se izračunati iz formule :

$$x_1 = 42.23 \text{ g/kg}$$

$$x_2 = 20.3 \text{ g/kg}$$

$$\Delta x = x_1 - x_2 = 42.23 - 20.3 = 21.93 \text{ g/kg}$$

3) Koeficijent grejanja toplotne pumpe računa se iz obrasca :

$$\varepsilon = \frac{q_{\text{pr}}}{q_{\text{pr}} - q_{\text{od}}}$$

gde je : q_{pr} – od vlažnog vazduha primljena toplota

q_{od} – vlažnom vazduhu predata toplota

$$q_{\text{od}} = i_1 - i_2 = 153.63 - 76.44 = 77.2 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{\text{pr}} = i_3 - i_2 = 163.11 - 76.44 = 86.68 \text{ kJ/kg}$$

$$\varepsilon = \frac{86.68}{86.68 - 77.2} = 9.14$$

II KOTLOVI

Za kotao se može reći da predstavlja energetski transformator čiji je zadatak da na što efikasniji način sagorevanjem goriva transformiše u sebi sadržanu vodu u vodenu paru ili samo povisi temperaturu vode, i to u oba slučaja na pritisak veći od atmosferskog pritiska. Ovo uslovljava i prvu podelu kotlova prema vrsti radnog tela – fluida koji stvaraju na izlazu i to na: *parne i vrelovodne (toplovodne) kotlove*.

Prema vrsti proizvedene vodene pare parne kotlove delimo na: *kotlove za zasićenom i kotlove sa pregrejanom vodenom parom*. Kako je para dobijena u kotlu nosilac potencijalne energije, u vidu povišenog pritiska i temperature, a kao što znamo pregrejana para ima višu potencijalnu energiju od zasićene, onda su kotlovi sa pregrejanom parom ekonomičniji u pogledu: uštede za gorivom, manjom potrošnjom pare i njenim boljim iskorišćenjem u potrošačima, manjom kondenzacijom usled gubitaka toplote u dugim parovodima itd.

Sa gledišta veličine pritiska imamo dve grupe kotlova. Kotlovi prve grupe, koji *podležu državnom nadzoru* su:

1. kotlovi niskog pritiska do 16bar,
2. kotlovi srednjeg pritiska od 16 do 25 bar,
3. kotlovi visokog pritiska od 25 do 60 bar i
4. kotlovi vrlo visokog pritiska od 60 do 225bar.

Kotlovi druge grupe koji *ne podležu državnom nadzoru* su kotlovi najnižeg pritiska do 1bar, koji se uglavnom primenjuju kod kućnih instalacija etažnog grejanja. Pored propisanog pritiska prema još uvek važećem Pravilniku o tehničkim normativima za stabilne posude pod pritiskom (Sl. list SFRJ 16/83), kotlovi koji ne podležu državnom nadzoru treba da zadovolje i uslov da je proizvod pritiska i zapremine radnog fluida viši od $0,3\text{bar}\cdot\text{m}^3$, i da se zapremina radnog fluida ne menja pri kontaktu sa atmosferom.

Prema svojoj nameni i načinu ugradnje kotlovi mogu biti: *stabilni, polustabilni i pokretni*. Način ugradnje zavisi od vrste potrošača koji koristi radni fluid, kao i od toga gde se i kako on koristi.

Prema sadržaju vode sa kojom rade, sve kotlove možemo podeliti na dve grupe: na *kotlove sa velikim* i na *kotlove sa malim sadržajem vode*.

U pogledu konstrukcionog oblika i izvodjenja svi kotlovi se mogu podeliti na: cilindrične kotlove, kotlove sa plamenim cevima, kotlove sa dimnim (grejnim) cevima, kotlove sa vodogrejnim cevima (nagnutim ili strmim-vertikalnim) i kotlove specijalnih konstrukcija.

8. Goriva i priprema vode

8.1. Opšti pojmovi o gorivu

Gorivom se naziva svaka materija koja kad se zapali brzo sagoreva razvijajući toplotu, dakle svaka ona materija koja u sebi ima elemente sa kojima će kiseonik iz vazduha stupiti u hemijsku reakciju i obrazovati hemijsko jedinjenje putem brže oksidacije praćene stvaranjem toplote. Da bi se te materije pimenjivale u industriji kao goriva:

- 1.) moraju postojati u velikim količinama,

- 2.) moraju biti jeftine,
- 3.) moraju biti pogodne za loženje u ložištima,
- 4.) moraju svojom čvrstinom omogućavati transportovanje na velike daljine,
- 5.) moraju biti sposobne za magacionisanje (da dužim stajanjem na vazduhu ne menjaju svoj oblik i sastav i da ne podležu samozapaljenju).

Pored toga, korisno je, ako se lako pale, i to već na temperature od 300°C do 400°C, i da su proizvodi njegovog sagorevanja neškodljivi po ljude, životinje i postrojenja. Ove uslove zadovoljavaju sledeće materije: drvo, slama žita, kukuruzna saša, ugalj, prirodni gas itd. Medjutim, materije koje sagorevaju naglo (trenutno), tj. eksplozivno (brizantno), ne spadaju u goriva jer sagorevaju suviše brzo, pored toga su skupe i opasne zbog eksplozije (praskavi gas). Isto tako ne spadaju u goriva ni materije kod kojih je oksidacija vrlo spora, na primer rdjanje gvoždja.

8.2 Podela goriva

Goriva delimo prema njihovom agregatnom stanju na čvrsta, tečna i gasovita. Prema načinu njihovog postanka i dobijanja delimo ih na **prirodna i veštačka**. Industrisjsko gorivo nalazi se u prirodi u tri agregatna stanja: čvrstom, tečnom i gasovitom.

-*Prirodna goriva* - Goriva biljnog i životnjskog porekla, stvorena prirodnim procesima koja se nalaze neposredno u prirodi, nazivaju se prirodna.

-*Veštačka goriva* - Ova goriva dobijaju se iz prirodnih goriva pomoću mehanickih i hemijskih procesa, odnosno dobijaju se iz prirodnih goriva kada se iz njih iskoriste najkorisniji potrebni sastojci.

-*Oplemenjivanje goriva* - predstavlja u stvari veštačko pripremanje goriva dobijenih od lošijih, ponekad neupotrebljivih, prirodnih goriva. Na primer, dobijanje briketa iz ugljene prašine od sitnog neupotrebljivog uglja. Pritom je celokupnim procesom obuhvaceno sušenje, čišćenje, drobljenje, presovanja i formiranje odredjenog oblika goriva, s tim da se tom prilikom ne menja hemijski sastav goriva upotrebljenog u procesu oplemenjivanja.

-*Suva destilacija* - je proces dobijanja veštačkog oblika goriva, pri kome se vrši temeljno razlaganje prvobitne materije da se na kraju kao rezultat ne dobije, s jedne strane, gorivo koje sadrži skoro čist ugljenik (drveni ugalj, koks itd.), a, s druge strane, gasoviti potpuni i nepotpuni proizvodi sagorevanja (ter i dr.).

-*Gasifikacija* - je proces pri kome se čvrsto gorivo potpuno pretvara u gasovito (generatorski gas).

-*Destilacija* - je način dobijanja iz tečnog goriva raznih vrsta veštačkih goriva (destilati frakcione destilacije nafte).

8.2.1 Prirodna goriva

Prirodna čvrsta goriva - ova goriva se dele pretežno na primarna i sekundarna.

Primarna čvrsta goriva su proizvodi biljnog sveta i pri njihovom sagorevanju proizvodi se toplota koja se može iskoristiti. Ovde dolaze sve drvenaste biljke (listopadno, četinarsko drveće, žbunaste biljke i dr.), vlaknaste biljke (slama, seno, trava i dr.), razni otpatci koji se javljaju pri preradi ovih i drugih biljaka u privredi i raznim industrijskim

postrojenjima (kore drveta, ljuske suncokretnih semenki i dr.), ova vrsta goriva se stalno obnavlja i time stvara neiscrpne vrste goriva.

Sekundarna prirodna čvrsta goriva postala su od primarnih prirodnih čvrstih goriva procesom ugljenisanja, koji je trajao dugi niz godina, čak vekova, i koji jos i danas traje. U ovu vrstu goriva spadaju treset, mrki ugalj (lignit), kameni ugalj i natracit. Ova goriva se vade iz zemlje i zato se jos nazivaju *fosilnim mineralnim gorivima*. Ova vrsta goriva predstavlja ogromnu, ali iscrpljivu rezervu goriva.

Prirodna tečna goriva - ovde spada zemno ulje (nafta).

Prirodna gasovita goriva - u ovu vrstu goriva dolaze prirodni zemni gas, truli gas, barski gas itd.

8.2.2 Veštačka goriva

Veštačka čvrsta goriva - ova goriva dobijaju se iz prirodnih lošijih i ponekad neupotrebljivih goriva procesima oplemenjivanja i suve destilacije. Prvi proces sastoji se u sušenju, čišćenju, drobljenju, presovanju (briket) ili mlevenju (ugljena prašina); pritom se ne menja hemijski sastav goriva uzetog na preradu. U ovu grupu ulaze briket (dobijen presovanjem treseta lignita, mrkog i kamenog uglja, polu koksa i njihovih koksova), bercit, karburit i, najzad, ugljena prašina (fino mleveni prah od raznih vrsta uglja).

Presovanjem dobijeni briket može da ima završni oblik u vidu cigle ili peleta. Briket u vidu cigle omogućava lako slaganje, ali se pre upotrebe lomi, dok briket u vidu peleta onemogućava lako slaganje, ali se pre upotrebe ne mora lomiti, već se direktno ubacuje u ložišni prostor.

Veštačka tečna goriva - ova su proizvod destilacije zemnog ulja (nafte), koja obuhvata: čišćenje, frakcionu destilaciju i refinaciju nafte, pri čemu se dobija sirovi benzin (petroleum), motorno gasno ulje, mazut i razna biljna ulja i tečne smole dobijene iz čvrstih goriva.

Veštačka gasovita goriva - ona se dobijaju suvom destilacijom prirodnih čvrstih goriva (uglja), pri čemu se dobija svetleći gas, ili gazifikacijom, koja obuhvata potpuno pretvaranje prirodnog čvrstog goriva u gasovito (generatorski gas-vazdušni, vodeni, plavi i mešani gas i gasovi metalurških peći).

8.3 Svojstva goriva

Gorivo se u laboratorijama podvrgava raznim ispitivanjima kojima se utvrđuje njegov hemijski sastav, nastanak, toplotna moć, brzina sagorevanja, dužina plamena i sl.

8.3.1 Elementarni sastav goriva

Poznavajući elementarni sastav nekog goriva moguće je dosta predvideti njegova svojstva, toplotnu moć kao i proceniti opravdanost njegove primene kao goriva.

Postoji uopštena jednakost za sve vrste goriva, ukoliko poznamo procentualni udeo svakog elementa koji u njemu učestvuje:

$$C(\%) + H(\%) + O(\%) + N(\%) + S(\%) + A(\%) + W(\%) = 100\%$$

gde su: C, H, O, N, S – simboli hemijskih elemenata, A-mineralne primese, W-vlaga.

U tabeli 8.1 dat je prosečan elementarni hemijski sastav za neka čvrsta goriva u 1kg čistog goriva, imajući u vidu tri najprisutnija elementa u njima, C, H, O. “Čisto gorivo” podrazumeva ono koje u sebi ne sadrži ni vodu ni pepeo.

Tabela 8.1: Prosečan procentualni sastav u 1 kg čistog goriva

Vrsta goriva	C (%)	H (%)	O (%)
Drvo	50	6	44
Treset	60	6	34
Mrki ugalj	65	6	29
Kameni ugalj	85	5	10
Antracit	95	2	3

Ugljenik predstavlja najvažniju komponentu goriva jer ga procentualno ima najviše u njemu i što se njegovim sagorevanjem oslobadja značajna količina toplote.

Vodonik se obično u gorivu javlja vezan sa drugim elementima ili u mešavini sa njima. Ako je slobodan onda se sjedinjuje sa kiseonikom i obrazuje vodu.

Kiseonik nije gorivi element, ali potpomaže i omogućava sagorevanje. Količina kiseonika u gorivu smanjuje potrebnu količinu kiseonika iz vazduha.

Azot se u gorivu nalazi u sklopu složenih organskih hemijskih jedinjenja. U gasovitim gorivima ima ga mnogo više nego u čvrstim i tečnim.

Sumpor se u gorivu može javiti u sagorivom i nesagorivom obliku. Prisustvo sumpora u gorivu je nepoželjno. Oksidi sumpora u dodiru sa vodom obrazuju sumporastu, odnosno sumpornu kiselinu, koja deluje korozivno na postrojenje i zagađuje životnu sredinu.

Mineralne primese u gorivu otežavaju sagorevanje, smanjuju toplotnu moć goriva, povećavaju troškove transporta i postrojenja i smanjuju njegov radni vek.

Vlaga je nepoželjni sastojak goriva jer otežava sagorevanje. Ukupna vlaga koja se javlja u gorivu predstavlja zbir: grube, higroskopne i hemijski vezane vlage.

Gruba (slobodna) vlaga je posledica kvašenja goriva vodom iz spoljašnje sredine. Lako se odstranjuje iz čvrstog goriva pravilnim skladištenjem na suvom i promajnom mestu. Količina grube vlage zavisi od parametara vlažnog vazduha: vlažnosti, temperature i pritiska; granulacije goriva, načina skladištenja i sl.

Higroskopna (vezana) vlaga se nalazi u porama čvrstog goriva i kapilarnim adhezionim silama je vezana za suvu osnovu. Odstranjuje se zagrevanjem goriva do $105\pm 3^{\circ}\text{C}$.

Hemijski vezana vlaga nalazi se u gorivu u obliku hidroksilnih grupa i može se odstraniti samo zagrevanjem do jako visokih temperatura (anhidrisanje) ili pak promenom hemijske strukture samog goriva.

8.3.2 Toplotna moć goriva

Toplotna moć goriva je ona količina toplote koje se oslobadja pri potpunom sagorevanju jedinične mase goriva od koga je toplota dobijena. Toplotna moć goriva se izražava u kJ/kg za čvrsta goriva i tečna goriva ili u kJ/nm³ za gasovita goriva.

Voda u produktima sagorevanja potiče od ukupne vlage koja postoji u gorivu i vode nastale sagorevanjem vodonika iz goriva (svaki maseni udeo vodonika, vezuje osam delova kiseonika, stvarajući 9 masenih delova vode).

S obzirom na toplotni nivo produkata sagorevanja nastalih prilikom određivanja toplotne moći razlikujemo:

- Gornja toplotna moć (H_g) predstavlja količinu toplote koja se oslobadja potpunim sagorevanjem 1kg ili 1nm³ goriva, uz uslov da se voda u produktima sagorevanja nalazi u tečnom stanju. Pri ovome treba da budu zadovoljena sledeća 2 uslova:
1) produkti sagorevanja goriva dovedeni su na temperaturu koju je gorivo imalo na ulazu u proces sagorevanja (20°C);
2) ugljenik i sumpor iz goriva sagoreli su u CO₂ tj. SO₂, dok do sagorevanja azota nije došlo.
- Donja toplotna moć (H_d) predstavlja količinu toplote koja se oslobadja potpunim sagorevanjem 1kg ili 1nm³ goriva, uz uslov da se voda u produktima sagorevanja nalazi u parnom stanju.

Za praktične svrhe je merodavna donja toplotna moć goriva, jer pri sagorevanju goriva u industrijskim ložištima produkti sagorevanja odlaze u atmosferu sa temperaturom višom od 100°C, a sa njima i voda u parnom stanju.

- Izračunavanje toplotne moći iz elementarnog sastava goriva

Toplotna moć se može određivati eksperimentalno sagorevanjem pripremljenog uzorka ili računski, na osnovu poznatih podataka elementarne ili hemijske analize sastava goriva.

Za sračunavanje gornje toplotne moći se uglavnom koriste obrasci Društva nemačkih inženjera (VDI-obrazac). Tako, na primer, u obrazac za čvrsta goriva ušli su oni hemijski elementi koji pri oksidaciji oslobadjaju toplotu (ugljenik, vodonik, sumpor):

$$H_g = 340 \cdot C + 1420,5 \cdot \left(H - \frac{O}{8}\right) + 105 \cdot S \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right] \quad (1)$$

Izračunate vrednosti su uvek manje od eksperimentalnih, a nekad je ta razlika veća i od 10%. U drvetu, koje je organska supstanca složene strukture, ugljenik, vodonik i kiseonik se nalaze u okviru ugljovodoničnih jedinjenja. Vodonik čije je prisustvo utvrđeno elementarnom analizom, pored toga što ulazi u sastav uvek prisutne vlage, ulazi u hidrosilne (OH) grupe. Takodje, deo kiseonika vezan je sa ugljenikom, odnosno azotom, a deo je i u slobodnom stanju. Učešće sumpora u drvetu je neznatno, tako da je njegov uticaj zanemaren

Imajući u vidu navedene konstatacije, korigovan je VDI obrazac (1) tako da se za sračunavanje gornje toplotne moći za drvo predlaže izračunavanje preko obrasca (2):

$$H_g = 340 \cdot C + 1420,5 \cdot \left(H - \frac{O}{16}\right) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right] \quad (2)$$

Poznavajući gornju toplotnu moć drveta za donju toplotnu moć bi se koristio obrazac:

$$H_d = H_g - r \cdot u$$

gde je :

r - specifična toplota isparavanja vode pri normalnim uslovima (2500 kJ/kg).

u - maseno učešće vlage u gorivu

- Izračunavanje toplotne moći iz hemijskog sastava goriva

Ukoliko poznajemo procentualno učešće hemijskih jedinjenja koja sačinjavaju drvo, kao što su: celuloza, lignin i ekstraktivi onda bi se za izračunavanje gornje toplotne moći mogao koristiti obrazac:

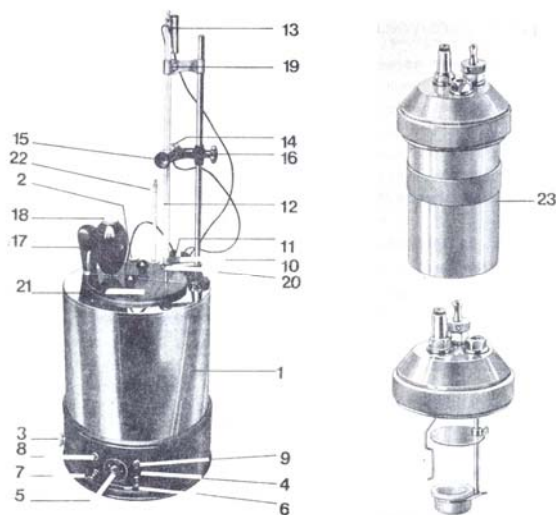
$$H_g = H_{gc} \cdot \frac{P_c}{100} + H_{gl} \cdot \frac{P_l}{100} + H_{ge} \cdot \frac{P_e}{100} \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

gde su: H_{gc} , H_{gl} , H_{ge} - prosečne vrednosti gornjih toplotnih moći: celuloze i njoj sličnih jedinjenja (hemiseluloze i sl.), lignina i ekstraktiva respektivno.

- Odredjivanje toplotne moći uz pomoć kalorimetra

Za egzaktno odredjivanje gornje toplotne moći koriste se eksperimentalne metode. Pri ovom eksperimentalnom odredjivanju se za čvrsta i tečna goriva koristi kalorimetarska bomba, a za gasovita goriva protočni kalorimetar. U prvom slučaju se proces sagorevanja odvija pri stalnoj zapremini, a u drugom pri stalnom pritisku. Priprema goriva i postupci merenja propisani su srpskim standardima (SRPS).

Eksperimentalna metoda odredjivanja toplotne moći čvrstih goriva (npr. drvnog otpatka) zasniva se na potpunom sagorevanju odmerene količine goriva pri povišenom pritisku. Količina toplote nastala sagorevanjem predaje se okolnom mediju – vodi. Mereći masu vode i njen porast temperature i znajući specifični maseni toplotni kapacitet vode, može se, uz odgovarajuće korekcije za toplotne gubitke, odrediti nastala količina toplote. Deljenjem ove količine toplote, sa količinom goriva od koje je nastala, dobija se toplotna moć. Spoljni izgled kalorimetra sa kalorimetarskom bombom prikazan je na slici 63.



Slika 63: a) Spoljni izgled kalorimetra, b) kalorimetarska bomba

8.4 Sagorevanje goriva

Pod pojmom sagorevanja goriva podrazumeva se brzo hemijsko vezivanje goriva, odnosno sagorljivih sastojaka u gorivu (uglenika, vodonika, itd.) sa kiseonikom iz vazduha, ili, kratko rečeno, burna oksidacija goriva, pri čemu se iz goriva oslobadja hemijski vezana toplota. Dakle, jedan vrlo složeni fizičko-hemijski proces, pri kome se iz goriva oslobadja hemijski vezana toplota, koju možemo zamisliti kao rezultat celokupnog postupka vezivanja kiseonika sa pojedinim sagorljivim sastojcima goriva. Sagorevanjem goriva dobijamo produkte sagorevanja (razne gasove) uz oslobađanje toplote i pojavu svetlosti (plamen).

Gorivo u ložistu kotla može da sagoreva potpuno ili nepotpuno, što zavisi od mnogo faktora, kao od raspoložive količine vazduha, odnosno kiseonika, vrste i tipa konstrukcione koncepcije samog ložišta i dr.

8.4.1 Potpuno sagorevanje goriva

Pod potpunim sagorevanjem goriva podrazumevamo sagorevanje njegovih osnovnih sagorljivih elemenata- ugljenika (C) i vodonika (H) u prisustvu dovoljne količine vazduha (kiseonika O), kojom se prilikom dobijaju produkti potpune oksidacije ovih elemenata, tj. ugljen-dioksid (CO_2) i vodena para (H_2O).

8.4.2 Nepotpuno sagorevanje goriva

Nepotpuno sagorevanje goriva nastupa u slučaju nedovoljne količine vazduha, tj. kiseonika u toku sagorevanja, u tom se slučaju u produktima sagorevanja javljaju proizvodi nepotpune oksidacije ugljenika tj. ugljen-monoksida (CO), i razni drugi ne sagorivi sastojci, odnosno jedinjenja (ugljevodonici), kao na primer metan (CH_4) itd.

8.4.3 Temperatura paljenja goriva

Temperaturom paljenja nekog goriva podrazumevamo onu temperaturu do koje treba zagrejati gorivo u prisustvu vazduha (kiseonika) da se ono samo od sebe upali i time počne da sagoreva; u tom slučaju plamen stranog toplotnog izvora, kojim smo upalili gorivo, postaje nepotreban, jer se proces sagorevanja sam od sebe dalje razvija.

8.4.4 Analiza vazduha potrebnog za sagorevanje goriva

Da bismo proces sagorevanja goriva proučili, potrebno je da imamo podatke hemijske analize goriva iz kojih saznajemo sastav goriva. No pošto je sagorevanje goriva ustvari burna oksidacija, odnosno hemijsko vezivanje goriva sa kiseonikom iz vazduha, to moramo znati i sastav atmosferskog vazduha, iz koga uzimamo kiseonik potreban za sagorevanje.

8.4.5 Proces sagorevanja goriva

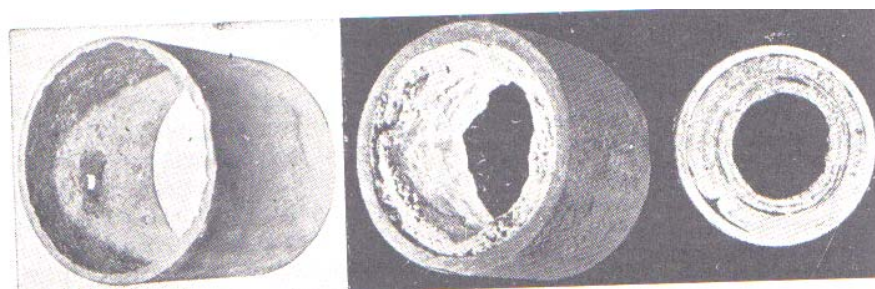
Sagorevanje čvrstog goriva u ložištu obuhvata nekoliko zbivanja, od kojih je prvo susenje goriva, tj. izdvajanje grube higroskopne vlage goriva, pri njegovom zagrevanju do 100°C , zatim destilacija ugljovodonika zagrevanjem goriva do oko 500°C . Na ovoj temperaturi po destilaciji preostralo gorivo počinje da se pali i sagoreva na taj način sto se najpre ugljenik (C) iz goriva spaja, odnosno sagoreva, sa kiseonikom iz vazduha u ugljen-monoksid (CO), koji će potom u ložišnom prostoru sagoreti u ugljen-dioksid (CO_2), ukoliko u ložištu bude dovoljno viška vazduha, odnosno kiseonika, kao i dovoljna temperatura. Po završenoj destilaciji ugljovodonika na rešetki ložišta ostaju usijani koks (C_{fix}) i pepeo (A). Kad je počelo sagorevanje, ugljovodonici se raspadaju i pale na usijanom koksu istovremeno sa koksom sagorevaju, tako da se pri potpunom sagorevanju u ložišnom prostoru obrazuju produkti sagorevanja: vodena para (H_2O) i ugljen-dioksid (CO_2). U produktima sagorevanja postoji još i azot (N_2) iz vazduha, koji ne sagoreva.

8.5 Priprema vode

8.5.1 Sastav vode za napajanje parnog kotla

Primeze koje se javljaju u vodi za napajanje parnog kotla mogu da budu uglavnom:

- mehaničke, sa veličinom zrnca $0,1\ (\mu)$ (mulj glina i dr.),
- koloidne, sa veličinom zrnca $0,1$ do $0,001(\mu)$ (masni sastojci, ulje i dr.), koji se mogu zadržati na filtru (prečistaču) od hartije,
- rastvorljive primeze, sa veličinom zrnca ispod $0,001\ (\mu)$ (razni gasovi, razna hemijska jedinjenja-karbonati i bikarbonati kalcijuma, magnezijuma i natrijuma). Rastvorljive primeze na višim temperaturama obrazuju takozvani kotlovski kamen ili kotlovac (sl. 64.)



Slika 64.-Prikaz preseka vodogrejnih cevi sa naslagama kotlovskog kamena

Kotlovski kamen može da izazove pregrevanje (deformisanje, pa čak i eksploziju parnog kotla) kotlovskog lima na taj način što kao loš sprovodnik toplote sprečava prenošenje toplote na vodu u kotlu preko kotlovskog lima, koji se spolja zagreva od vrelih gasova usled sagorevanja. Ukoliko su slojevi (naslage) kotlovskog kamena deblji, utoliko je prenošenje toplote slabije i cirkulacija u kotlu vode nepravilnija, a sa tim u vezi

i potrošnja goriva veća. Zatim, ukoliko je taloženje kotlovskog kamena na površinama kotlovskog lima neravnomernije, utoliko je naprezanje samog lima neravnomernije. Kako usijani lim parnog kotla ne može da izdrži postignuti parni pritisak, to se jako deformiše, ispupči ili prsne.

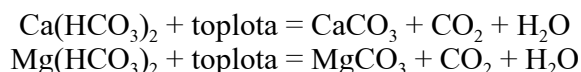
Tvrdoća vode izražava se u stepenima tvrdoće. Tako npr. jedan nemački stepen tvrdoće, koji je kod nas u primeni, ima voda čiji jedan litar sadrži 10mg kalcijum-oksida (negašenog kreča, CaO), ili ekvivalentnu količinu magnezijum-oksida (MgO) koja iznosi 7,2mg. Obeležava se sa 1° d. Pored nemačkog stepena tvrdoće postoji i francuski, engleski i američki.

Ukupna tvrdoća se može predstaviti kao zbir karbonatne (nestalne) i nekarbonatne (trajne) tvrdoće.

$$UKUPNA\ TVRDOĆA = NESTALNA\ TVRDOĆA + STALNA\ TVRDOĆA$$

Nestalnu tvrdoću čine joni Ca^{2+} i Mg^{2+} koji se nalaze vezani sa bikarbonatima, a trajnu – nekarbonatnu čine: sulfati, hloridi, silikati, i druge soli kalcijuma i magnezijuma.

Pri temperaturama do 20°C i pritiscima do 5bar karbonati koji su prisutni u vodi neće se intenzivno izdvajati i taložiti. Međutim, kada se voda izloži naglom zagrevanju i porastu pritiska, što je prisutno kod rada kotlovskog postrojenja, narušava se ravnoteža (ugljen-dioksid-karbonati-bikarbonati) i dolazi do raspada bikarbonata i stvaranja karbonata. Ovo se može prikazati jednačinama:



Izdvajanje karbonatnog kamena počinje već na 55°C, a granica intenzivnog izdvajanja je oko 65°C. Nekarbonatni kamenac se izdvaja na znatno višim temperaturama (preko 200°C), i takodje predstavlja opasnost kod kotlova koji rade na ovim povišenim temperaturama. Da bi se izbeglo stvaranje ove vrste kotlovskog kamena, često se u cilju nadoknade gubitaka vode iz kotla, dodaje termički obradjena voda, tvrdoće ispod 0,05°d i sa minimalnom količinom rastvorenih gasova.

8.5.2 Prečišćavanje vode za napajanje kotlova

- Postupak za udaljavanje mehaničkih primesa

Mehaničke primese mogu da budu organskog ili mineralnog porekla. Prema svojim specifičnim težinama u odnosu na specifičnu težinu vode, mehaničke primese mogu da budu: plivajuće, lebdeće i toneće. S toga se udaljuju iz vode: propuštanjem kroz sita, taloženjem ili filtriranjem. Koji postupak će se primeniti zavisi od krupnoće primesa i od njihovog pomenutog ponašanja u vodi. Za odstranjivanje finih primesa koriste se različiti filteri napravljeni od drvene vune, šljunka, peska, koksa i sl.

- Postupak za udaljavanje kolodnih primesa

Koloidne primese su, pored drugih, silicijum-oksidi (SiO_2), masti, ulja. Silicijum-oksidi se odstranjuju uz pomoć sulfata amonijaka. Masti i ulja se odstranjuju asorpcionim

ili električnim postupkom. Asorpcioni postupak podrazumeva dodavanje pahuljaste materije koja stvara finu mrežu koja pri tonjenju povlači sitne čestice i taloži ih na dnu. Odatle se nečistoće odstranjuju filtriranjem. Primenom drugog postupka se električnom strujom od finih čestica masnoće obrazuju kapi, koje se iz vode odstranjuju filtriranjem.

- Postupak za udaljšavanje rastvorljivih primesa

Rastvorljive primeše, kao što smo videli, uglavnom su hemijska jedinjenja: karbonati, bikarbonati, sulfati i hloridi kalcijuma, magnezijuma i natrijuma. Ovi hemijski sastojci vrlo su štetni, jer karbonati nagrízaju korlovske površine (korodiraju), dok bikarbonati obrazuju kotlovski kamen, koji se u čitavim slojevima nahvata na metalnim površinama.

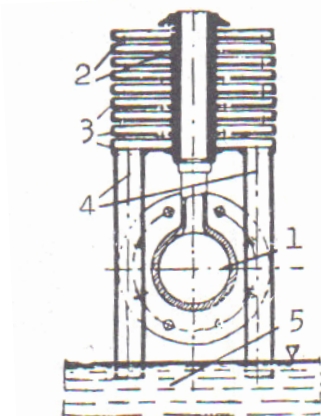
Postupak zagrevanja vode (sl. 65) – Zagrevanjem vode preko 75°C do tačke ključanja u naročitim degazatorima postiže se prisilno odstranjenje vazduha i ugljen-dioksida iz vode, koji su glavni prouzrokovai korozije metalnih površina.

Postupak destilacije vode – Ovaj postupak se sastoji u tome što se voda zagreva do ključanja, pri čemu se ona isparava u naročito konstruisanim uređajima (takozvanim isparavačima) da bi se zatim podvrgla hlađenju i kondenzovanju. Destilacijom se dobija potpuno čista voda, bez soli kotlovskog kamena.

Postupak hemijskog omekšavanja vode (sl. 66) – Ovim postupkom hemijskog omekšavanja vode postiže se odstranjenje ukupne tvrdoće napajane vode, tj., hemijskih jedinjenja: bikarbonata, karbonata, sulfata i hlorida kalcijuma i magnezijuma, iz vode za napajanje parnog kotla, osim toga neutrališe se slobodni ugljen-dioksid u sirovoj vodi koju omekšavamo.

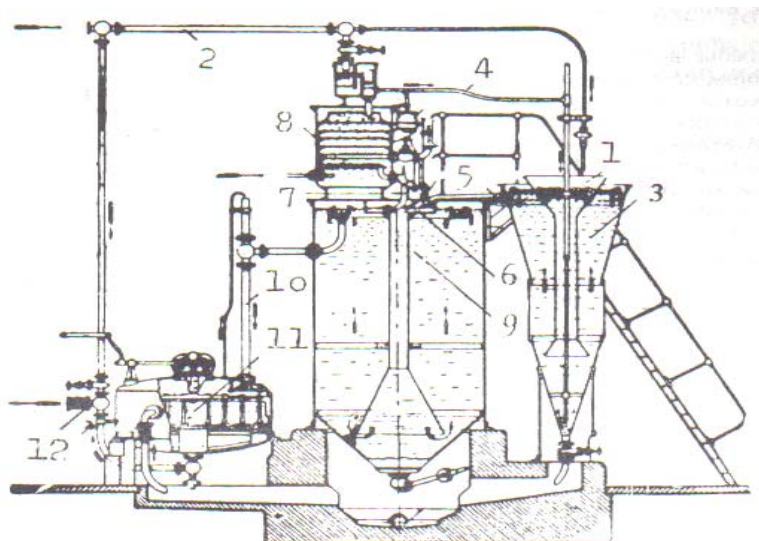
-postupak taloženja- obuhvata izdvajanje karbonata kalcijuma i magnezijuma iz vode upotrebom hemijskih jedinjenja, kao što su krečno mleko (Ca(OH)_2), soda (Na_2CO_3) i ljuta soda (NaOH).

-postupak razmene- za omekšavanje vode za napajanje parnog kotla našao je široku primenu, a sastoji se u tome što se voda propusta kroz specijalni filter (prečistač). Ovaj filter se sastoji iz materije permutit, koja je ustvari veštački stvorena (sintetička) materija i odlikuje se jako poroznom strukturom i velikom unutrašnjom aktivnom površinom.



Slika 65: Šematski prikaz uređaja za omekšavanje kotlovske vode postupkom zagrevanja:

- 1-dovodna cev za vodu,
- 2-otvori za oticanje vode,
- 3-rebra za taloženje kotlovskog kamena,
- 4-cev za odvod vode,
- 5-vodeni prostor parnog kotla.



Slika 66: Šematski prikaz uređaja za omekšavanje kotlovske vode hemijskim postupkom pomoću kombinacije kreča i sode:

- | | |
|---|---|
| 1-sud za krečno mleko, | 7-cev za dovod rastvorljive vode, |
| 2-cev za dovod vode, | 8-sud za rastvaranje sode, |
| 3-sud za vodu, | 9-sud za vodu, |
| 4-cev za dovod rastvorene vode, | 10-cev za sprovođenje vode, |
| 5-cev za sprovođenje vode, | 11-brzi filter, |
| 6-sud za mesanje rastvorljive sode sa vodom | 12-cev za sprovođenje vode u parni kotao. |

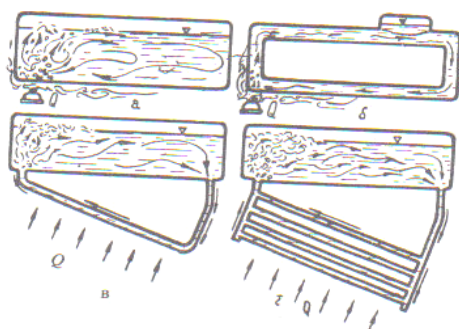
U pripremi vode za napajanje kotla kao kod podstanica centralnog grejanja često se koriste jonski razmenjivači. Ipak ovo rešenje, pored svojih brojnih prednosti, iziskuje značajna ulaganja i velike eksploatacione troškove. S toga se jonski razmenjivači obično ne koriste za potpuno uklanjanje tvrdoće vode, već za omekšavanje do nivoa od 6 do 8^od. To se postiže upotrebom sistema sa ručnim ili automatskim obilaznim vodom, tako što se iza omekšivača meša potpuno omekšana voda (0^od) koja je propuštena kroz uređaj, sa vodom koja nije tretirana. Velika mana ovakvog rešenja je ta što se regeneracija može automatizovati, ali je dopunjavanje solju uvek ručno i zahteva redovno angažovanje radne snage. Godišnji troškovi za nabavku soli mogu biti znatni, što svakako smanjuje upotrebljivost ove veoma pouzdane metode.

Omekšavanje vode može se sprovesti magnetima tako što se oni postave oko cevi, u cev, ili se u cevovod ugrade uređaji sa magnetima u sopstvenom kućištu. Ovo poslednje rešenje je i najbolje, jer se pokazalo da se jedino na taj način voda može izložiti dovoljno jakom magnetnom polju koje može da proizvede željene efekte omekšavanja. Molekuli vode počinju da vibriraju pod uticajem Lorencove sile koju stvara magnetno polje u uređaju. Ove vibracije dovode do odvajanja mikročestica koje su bile vezane za molekule vode. Tako oslobođene mikročestice sada privlače čestice kalcijuma i time ih sprečavaju da se izdvajaju i talože na hrapavim i zagrejanim površinama.

Upotrebom magnetnog postupka se ne smanjuje tvrdoća vode već se smanjuje afinitet karbonata ka izdvajanju u obliku naslaga na zidovima cevi i kotlovskog agregata. Magnetni tretman povoljno utiče i na karbonatnu i na nekarbonatnu tvrdoću, pa je s toga pogodan i kod kotlovskih postrojenja i kod instalacija daljinskog grejanja.

8.6 Cirkulacija vode kod parnog kotla

Toplota kojom se kotao zagreva pretvara vodu u vodenu paru; na taj način postoje u samom kotlu, odnosno njegovoj vodi, na pojedinim mestima područja ispunjena vodom, a na pojedinim mestima područja ispunjena smesom vode i vodene pare. Usled toga postoje razlike u specifičnim težinama fluida ovih područja, čime se izaziva cirkulacija (kretanje) vode i pare u kotlovskom prostoru. Pri tom specifički lakše mase mešavine vode i vodene pare vrše kretanje (od dna kotla na mestu njegovog zagrevanja) prema gore, dok teže mase čiste vode struje nadole (sl. 67).

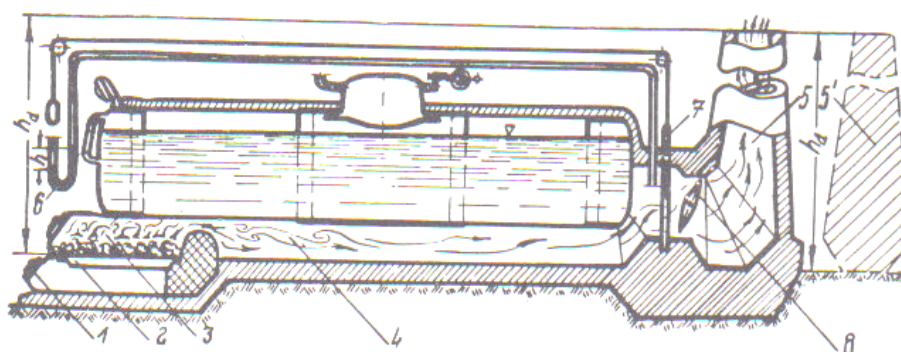


Slika 67: a-strujanje vode pri njenom zagrevanju u sudu, b-strujanje vode pri njenom zagrevanju u cevi, c-strujanje vode pri njenom zagrevanju u nagnutoj cevi, d-strujanje vode pri njenom zagrevanju u nagnutim cevima.

8.7 Promaja kod parnog kotla

Pošto je potpuno sagorevanje nekog čvrstog goriva na rešetki parnog kotla (vidi sliku 68) potrebna velika količina vazduha (L), to je potrebno obezbediti prolaz ove količine vazduha kroz procepe na rešetki i kroz sloj goriva na njoj radi ulaska u ložišni prostor, u kom cilju se mora ostvariti razlika pritiska vazduha u pepeoniku (p_p) i pritiska u lozistu, ložišnom prostoru (p_l).

Razlika pritisaka ($p_p - p_l$) omogućava dolazak svežeg vazduha u ložišni prostor, odnosno ona omogućava kretanje vazduha dovoljnom brzinom da dovoljno vazduha bude u svakom momentu za potpuno sagorevanje goriva u ložištu.



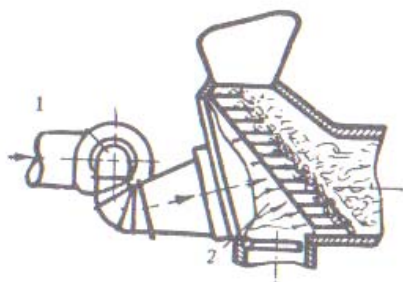
Slika 68: Šematski prikaz uređaja za merenje prirodne promaje kod parnog kotla pomoću deprimometra: 1-vrata na pepeoniku, 2-štap rešetke, 3-ložišni prostor, 4-dimni kanal, 5-dimnjak, 6-deprimometar, 7-zasun, 8-priklopac.

8.7.1 Prirodna promaja

Pri sagorevanju goriva u ložišnom prostoru, dimnjak je stalno ispunjen vrelim produktima sagorevanja, čija je temperatura t_{vgs} obično 180-300°C; ovi gasovi, kao topliji, uvek su razredjeniji i otuda lakši od spoljnog, hladnog i gušćeg vazduha, čija je temperatura (t_v) približno 20°C (prosečna godišnja vrednost za naše krajeve). Prema tome, težina stuba produkta sagorevanja u dimnjaku uvek je manja od težine stuba spoljanjeg vazduha, čija je visina jednaka visini dimnjaka (h_d). tada razlika težina produkta sagorevanja i spoljnog vazduha stvara promaju, te se na taj način vreli produkti sagorevanja penju, kao lakši, gore, ostavljajući za sobom u dimnjaku sve veću razredjenost (depresiju); zbog te razlike pritiska spoljašnji hladan vazduh ulazi izvesnom brzinom strujanja kroz pepeonik i procepe rešetke, kao kroz sam sloj goriva u ložišni prostor. Iz prednjeg se zaključuje da će promaja biti bolja, jača, što je dimnjak viši i što su produkti sagorevanja u dimnjaku zagrejaniji, tj. veće temperature.

8.7.2 Veštačka promaja

Veštačka promaja može se dobiti uglavnom uduvavanjem vazduha pod pritiskom ispod rešetke ložišta, u kom se slučaju radi o takozvanoj donjoj promaji (sl. 69). Ako se, pak, vreli gasovi od sagorevanja direktno, indirektno ili kombinovano ubacuju pod dejstvom snažnih ventilatora ili ejektora, time se stvara veštačka depresija u ložišnom prostoru i omogućuje ulazak svežeg spoljašnjeg vazduha, tada se radi o veštačkoj promaji pomoću sisanja.

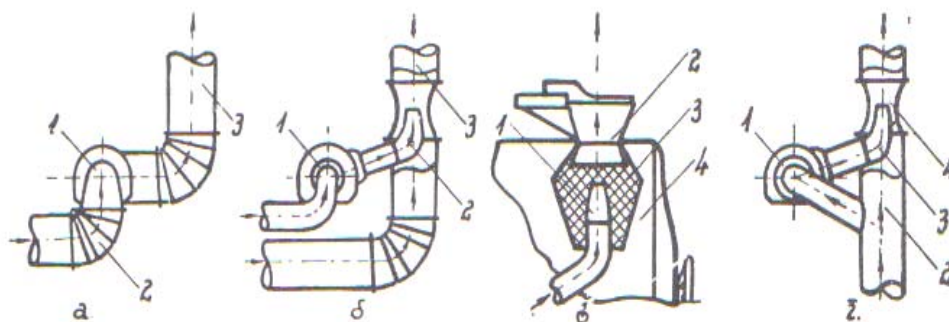


Slika 69: Šematski prikaz uređaja za ostvarivanje veštačke promaje u hermetički zatvorenom pepeoniku pod pritiskom:
1-ventilator,
2-rešetka ložišta.

8.7.3 Promaja pomoću sisanja

Promaja pomoću sisanja dobija se dejstvom snažnih ventilatora, koji direktno, indirektno ili kombinovano (direktno i indirektno zajedno) usisavaju vrelе gasove od sagorevanja iz izlaznog kanala kotla (sl. 70), ili, pak, iz dimnog kanala; usisane gasove ventilator potiskuje u takozvani difuzor (kratka metalna cev dužine 1.0-1.5 metara), koja

svojim postepenim širenjem preseka omogućuje pretvaranje brzine vrelih gasova u pritisak.



Slika 70:

- a.) Šematski prikaz uređaja za ostvarivanje veštačke promaje sa direktnim sisanjem: 1-ventilator, 2-dimni kanal, 3-dimnjak,
- b.) Šematski prikaz rada instalacije veštačke promaje sa indirektnim sisanjem na stabilnim kotlovima: 1-ventilator, 2-konus, 3-difuzor,
- c.) Šematski prikaz rada instalacije veštačke promaje sa indirektnim sisanjem na lokomotivskim kotlovima: 1-konusni deo injektora, 2-difuzor, 3-dimnjača, 4-iskorhvatač,
- d.) Šematski prikaz rada instalacije veštačke promaje sa kombinovanim sisanjem: 1-ventilator, 2-dimni kanal, 3-konusni deo injektora, 4-difuzor.

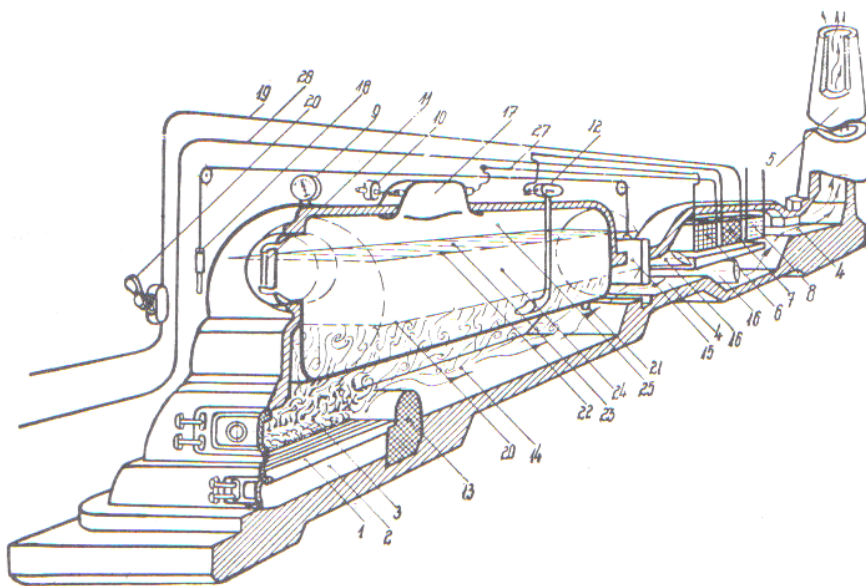
9. Glavni delovi parnog kotla i njegovo funkcionisanje

U ovom odeljku upoznaćemo se sa standardnim delovima jednog kotlovskog postrojenja, i proučiti sam postupak njegovog funkcionisanja.

9.1 Glavni delovi kotlovskog postrojenja

Da bismo upoznali glavne delove jednog standardnog kotlovskog postrojenja, poslužićemo se šematskim prikazom cilindričnog kotla na slici 71. Takvo jedno postrojenje obuhvata ložište, delove kotlovskog agregata, kotlovsku armaturu, aparaturu i d r.

Ložište predstavlja onaj deo kotla u kome gorivo sagoreva (sl. 71). Gorivo se stavlja na rešetku, na kojoj ono sagoreva, a ispod njega se nalazi pepeonik. U pepeonik pada pepeo, nesagorljivi ostatak pri sagorevanju goriva. Prostor ložišta u kome gorivo sagoreva naziva se ložišni prostor. Veličina ložišnog prostora izražava se u kubnim metrima. Proizvodi sagorevanja (vreli gasovi) obrazovani u ložišnom prostoru odvođe se dimnim kanalima u dimnjak, a iz njega u atmosferu.



Slika 71: Šematski prikaz postrojenja cilindričnog parnog kotla

1. štapovi rešetke, 2.pepeonik, 3.ložišni prostor, 4.dimni kanal, 5.dimnjak, 6.pregrejač pare, 7.zagrejač vode, 8.zagrejač vazduha, 9.manometar, 10.ventil sigurnosti, 11.vodomerno staklo, 12.ventil za napajanje, 13.vatreni most, 14.dimni kanal, 15.zasun, 16.priklopci, 17.parni dom, 18.teg, 19.cev za dovod vode, 20.pumpa za vodu, 21.cev za otakanje vode, 22.vodena linija, 23.isparavajuća površina, 24.vodeni prostor, 25.parni prostor, 26.vatrena linija, 27.parovodna cev za sprovodjenje vodene pare iz parnog doma u pregrejač, 28.cev za sprovodjenje pregrejane pare na mesto upotrebe.

Parni kotao u užem smislu reči predstavlja u stvari zatvoreni sud u kome se vrši isparavanje vode pomoću toplote koja se oslobadja pri sagorevanju goriva u ložištu. Toplota proizvedena pri sagorevanju goriva u ložistu prolazi kroz zidove grejnih površina kotla, prenosi se na vodu, zagreva je i pretvara u paru. Što se tiče same konstrukcije kotla, on može biti izradjen u vidu valjka, kao što je prikazano na slici 71, ili u vidu kombinacije cilindra i cevi. Ovom kombinacijom cilindra i cevi povećava se aktivna površina kroz koju prolazi toplota od vrelih gasova sagorevanja na vodu. Time se postiže brza produkcija vodene pare i ušteda u gorivu. Ako u cevima struje vreli gasovi sagorevanja, tada se one nazivaju 'grejne cevi'. Ako se u cevima nalazi voda, tada se nazivaju 'vodogrejne cevi'. Cilindricni kotao se izradjuje od čeličnih limova koji su sastavljeni zakivcima u čvrstu, nerazdvojnu vezu zavarivanjem ili kovanjem, a eventualno i kombinovanim načinom: zakivanjem i zavarivanjem. On se sastoji uglavnom iz tri dela: omotača, prednjeg i zadnjeg dela.

Za pravilan i ekonomičan rad kotlovskog agregata potrebno je da on rasplaže sledećim napravama (slika 71), tj. da ima: pregrejač pare, zagrevač vode za napajanje kotla, zagrejač vazduha za zagrevanje vazduha potrebnog za sagorevanje goriva.

Kotlovaska armatura obuhvata sprave i instrumente koji obezbeđuju pravilan i siguran rad kotlovskog postrojenja. Ona se uglavnom deli na armaturu parnog prostora i armaturu vodenog prostora. U prvu grupu spadaju manometar i ventil sigurnosti, dok u drugu grupu dolaze: vodomerno staklo i ventil za napajanje kotla vodom.

Pored pomenutih glavnih delova koje kotao ima za svoj pravilan i ekonomičan rad, on je snabdeven i raznim drugim napravama, kao i raznim drugim pomoćnim uređajima, u koje spadaju veći broj slavina, naprave za napajanje kotla vodom, regulator promaje, prečistač vode, kao i razne sprave sa kontrolisanje sagorevanja goriva u ložišnom prostoru kotla, potrošnje goriva i v. o. d. e., tj. za kontrolisanje rada celokupne kotlovske instalacije. Svi pomenuti glavni i pomoćni uređaji svojim pravilnim funkcionisanjem povećavaju ekonomičnost i sigurnost rada kotlovskog postrojenja.

9.2 Opis rada kotlovskog postrojenja

Rad kotlovskog postrojenja pratićemo na sl. 71. Sagorevanje goriva počinje na štapovima rešetke ložišta; razvijena toplota u ložišnom prostoru prenosi se neposredno zračenjem i posredno preko vrelih gasova na kotlovski lim. Kroz kotlovski lim toplota prolazi sprovodljivošću, odnosno predaje se vodi putem konvekcije u cilju njenog zagrevanja i pretvaranja u paru. Količina vazduha (L) koja je potrebna za potpuno sagorevanje goriva dovodi se u ložište kroz pepeonik prirodnom ili veštačkom promajom. Vreli gasovi sagorevanja iz ložišta struje preko vatrenog mosta i nastavljaju strujanje kroz hodnik duž grejne površine kotla; pri tom oni grejnoj površini neprekidno odaju toplotu. Primljena toplota se kondukcijom sprovodi kroz kotlovski lim i prenosi na vodu putem dodira metala i vode; ova toplota se dalje sprovodi kroz vodu putem konvekcije, zahvaljujući neprekidnom strujanju vode u kotlu, te se na taj način stvara para. Očigledno je da se najveća količina vodene pare proizvodi na onom delu grejne površine gde je temperaturska razlika između vode i vrelih gasova sagorevanja najveća, tj. gde je predaja toplote ostvarena zračenjem i dodirom. Ovaj slučaj postoji u ložišnom prostoru, dok idući

prema kraju grejne površine sve dalje od ložišta, opada temperaturska razlika pa time i količina proizvedene pare. Tako na kraju grejne površine temperatura vrelih gasova sagorevanja iznosi od 300 do 550 °C, te bi svako dalje produženje grejne površine bilo neopravdano, zbog relativno niskih temperature. Znači da je zbog ovog razloga dužina kotla ograničena. Toplota vrelih gasova sagorevanja, po njihovom prolasku duž grejne površine kotla, koristi se jednim delom za pregrevanje pare, zagrevanje vode za napajanje kotla i za zagrevanje vazduha u narocitim uređajima, pregrejaču pare, zagrejaču vode i zagrejaču vazduha. Ovi uređaji se obično nalaze u dimnom kanalu na samom putu prolaska vrelih gasova sagorevanja. Gasovi se propuštaju u dimni kanal kroz naročiti otvor, čija se veličina reguliše zasunom i priklopcima. Posle ovog pošto su predali jedan deo svoje toplote vodenoj pari, vodi u vazduhu, koji cirkulišu u napred pomenutim uređajima, vreli gasovi sagorevanja odlaze sa temperaturom oko 180 °C kroz dimni kanal i dimnjak a i ovog u atmosferu. Prema tome jedan moderan kotao, tj. parni kotao snabdeven pregrejačima pare, kao sa zagrejačima vode i vazduha, naziva se **kotlovsko postrojenje**. Na parnom domu je obično postavljen ventil sigurnosti koji sprečava prekoračenje maksimalnog radnog pritiska vodene pare i kotlu za koji je kotao konstruisan, odnosno sagradjen. Visina nivoa vode u kotlu kontroliše se pomoću vodomernog stakla. Pritisak pare čita se na manometru, koji je u tu svrhu postavljen na nekom vidnom mestu. Prirodnu i veštacku promaju regulišemo pomoću jednog zasuna podizanjem ili spuštanjem tega, koji se nalazi na prednjoj strani kotla. Napajanje vodom vrši se kroz cev, koja je u vezi sa pumpom za napajanje vode, zagrejačem vode i ventilom. Samo otakanje vode iz kotla vrši se kroz otvor. Para koja se proizvodi u parnom kotlu i koja se skuplja u parnom prostoru je vlažna i sadrži u sebi vodene čestice. U tom cilju kotao je obično snabdeven takozvanim parnim domom, odakle se para odvodi u pregrejač vode pomoću parovodne cevi sprovodi radi dalje upotrebe u toplotnim mašinama. Deo limene površine kotla, koja je sa jedne strane u neposrednom dodiru sa vrelim gasovima, a sa druge strane u dodiru sa vodom, naziva se **grejna površina kotla**. Grejna površina se deli na direktnu i indirektnu. Deo grejne površine koji je izložen neposrednom zračenju toplote od usijanog goriva koje sagoreva na rešetki ložišta naziva se **direktna** ili **neposredna grejna površina**. Indirektna grejna površina je ostali deo grejne površine. Linija koja se dobija kao presek nivoa vode u kotlu i zida kotla naziva se **vodena linija**. Površina vode u kotlu zove se **ispiravajuća površina**. Prostor koji zauzima voda u kotlu zove se **vodeni prostor**. Površine limova koje su u dodiru sa jedne strane sa vrelim produktima sagorevanja, a sa druge svoje strane sa parom ne spadaju u grejnu površinu. Ovakve površine limova dopuštaju se samo izuzetno i to pod uslovom da velicina grejne površine bude bar 40 puta veća od ukupne površine rešetke i da u dodiru sa tim limovima vreli produkti sagorevanja posle prinudnog prolaska pored grejne površine u izvesnoj meri ohlade. Zapremina vodenog prostora u kotlu utiče na sam rad kotla. Tako npr., kotlovi koji imaju malu zapreminu vodenog prostora brzo se stavljaju u pogon, jer se voda u njima brže zagreva zbog svoje manje količine, zatim proizvode vlažnu paru, koju u pregrejaču pare pretvaramo u suhu paru. Oni se primenjuju kod pogona koji imaju česte prekide u radu. Gubici usled hladjenja i ponovnog zagrevanja kotla su mali. U pogonu gde postoji neravnomerna i nagla potrošnja vodene pare ne upotrebljavaju se ovakvi kotlovi, a umesto njih se primenjuju kotlovi sa velikim vodenim prostorom, tj. velikim sadržajem vode. Kod ovih poslednjih pri nagloj potrošnji pare pritisak ne opada, zahvaljujući velikom sadržaju vode, jer velika količina vode sadrži u sebi količinu toplote koja je dovoljna da nadoknadi neravnomernu-veliku potrošnju pare i time spreči naglo opadanje

pritiska u kotlu. Kotlovi sa malim vodenim pritiskom ne mogu da spreče nagli pad pritiska jer je njihova mala grejna površina nemoćna da propusti svu potrebnu količinu toplote za nadoknadjivanje nagle potrošnje vodene pare. Prostor koji u kotlu zauzima vodena para naziva se *parni prostor*. Što je parni prostor veći, tim je para manje vlažna. Ponekad je stvaranje pare eruptivno; para je tom prilikom pomešana sa vodenim česticama, i ako bi se takva para upotrebila za pogon toplotnih mašina, došlo bi do njihovog kvarenja. Za odvajanje vodenih čestica od pare služi prošireni deo parnog prostora, *tzv. paroskupljač*, u kome je smešten i uređaj za odvajanje čestica vode iz pare; paroskupljač se obično smešta na najvišem mestu parnog prostora. Gornja granica do koje dopiru vreli gasovi od sagorevanja na zidove kotla ili do koje zrači toplota naziva se *vatrena linija*. Najniži nivo vode u kotlu treba da je najmanje 1 dm iznad vatrene linije; on je na vodomernom staklu obeležen crvenom linijom. Prostor koji se naizmenično puni parom i vodom, tj. prostor najnižeg i najvišeg vodostaja, naziva se *napojni prostor*. Pošto se za loženje kotlova upotrebljava gorivo u sva tri agregatna stanja, ložišta možemo po vrsti goriva podeliti na 2 tipa: ložišta sa rešetkom za sva čvrsta goriva i ložišta sa plamenjakom za tečna i gasovita goriva i ugljenu prašinu od čvrstih goriva. Prema tome, kod prvog tipa ložišta gorivo sagoreva na rešetki ložišta, dok kod drugog tipa ložišta gorivo sagoreva u ložišnom prostoru. Površina na kojoj sagoreva čvrsto gorivo u ložištu kotla zove se *ukupna površina rešetke*, za razliku od slobodne površine rešetke. Ovu slobodnu površinu rešetke dobijamo kao zbir svih slobodnih površina između štapova rešetke kroz koje struji vazduh potreban za potpuno sagorevanje goriva.

9.3 Glavne karakteristike parnog kotla

Kotao karakterišu nekoliko glavnih činilaca: stepen iskorišćenja kotla, toplotno opterećenje rešetke, toplotno opterećenje ložišnog prostora i specifična potrošnja vodene pare. Ovde će biti reči samo o stepenu iskorišćenja kotla.

9.3.1 Stepen iskorišćenja parnog kotla

Stepen iskorišćenja bilo koje mašine prikazan je odnosom dobijene energije prema utrošenoj energiji za tu dobijenu. U našem slučaju, stepen iskorišćenja kotla obuhvata sve gubitke koji se javljaju u kotlovskom postrojenju i izračunava se kao proizvod parcijalnih stepena iskorišćenja: ložišta (η_L), grejne površine kotla (η_A) i u pogledu čuvanja toplote (η_T) tj.:

$$\eta_K = \eta_L \cdot \eta_A \cdot \eta_T$$

Njegova vrednost je uvek manja od jedinice, zbog gubitka pri pretvaranju jedne vrste energije u drugu, u samom kotlu pri njegovom radu. Zato je pri konstruisanju kotla, a i drugih mašina i uređaja potrebno smanjiti gubitke na što manju vrednost da bi stepen korisnog dejstva uređaja biti što veći. Prema tome, da bi stepen iskorišćenja parnog kotla bio što veći, potrebno je da sagorevanje goriva u ložištu bude što bolje da bi na taj način dalo vodi što veću količinu toplote potrebnu za zagrevanje vode i njeno pretvaranje u paru. Drugim rečima, potrebno je da stepen iskorišćenja ložišta (η_L) koji čini sastavni deo ukupnog stepena iskorišćenja celog kotlovskog postrojenja, ima što veću vrednost.

- *Stepen iskorišćenja ložišta* (η_L) – Količina toplote Q , razvijena u ložištu, ukoliko ne bi bila odvodjena kroz ozid kotla (prolaženjem toplote), bila bi iskorišćena potpuno za povišenje toplote vrelih produkata sagorevanja. Međutim, postoje gubici pri radu ložišta kao što su: gubici od nepotpunog sagorevanja u ložišnom prostoru, gubici od nesagorelog goriva (koje propada kroz rešetku ložišta u pepeonik), gubici goriva usled koga odlazi u dimne kanale i dimnjak itd. Zbog ovoga je dobijena količina toplote (Q_L) sagorevanjem goriva određene toplotne moći, znatno manja od raspoložive količine toplote (Q_H), hemijski vezane o određenoj količini goriva pa je stepen iskorišćenja ložišta:

$$\eta_L = \frac{Q_L}{Q_H},$$

i kreće se u granicama $\eta_L=0,75 \div 0,95$.

- *Stepen iskorišćenja grejne površine kotla* (η_A) – Ako ukupnu količinu toplote primljenu preko površine kotla A_k , označimo sa Q_A , i podelimo je sa uloženom količinom toplote koja je hemijski vezana u količini goriva m_g , toplotne moći H_d dobija se:

$$\eta_A = \frac{Q_A}{\eta_L \cdot m_g \cdot H_d}.$$

- *Stepen iskorišćenja kotla u pogledu čuvanja toplote* (η_T) – Ovaj stepen iskorišćenja zavisi od gubitaka usled zračenja i dodira površine kotla sa spoljnim vazduhom:

$$\eta_T = \frac{Q_A - Q_g}{Q_A},$$

gde je:

Q_g – izgubljena toplota na pomenute načine.

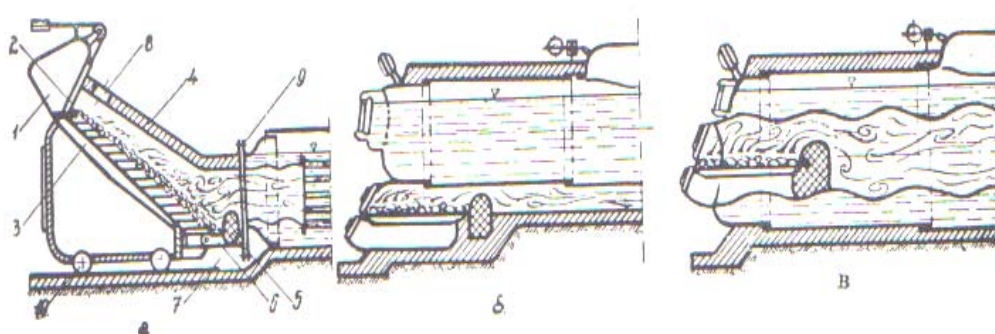
9.4 Tipovi konstrukcija kotlovskih ložišta

9.4.1 Zadatak kotlovskog ložišta

Zadatak ložišta je da gorivu koje u njemu sagoreva omogući potpuno sagorevanje, bez velikog mehaničkog propadanja nesagorelog goriva kroz procepe rešetke i hemijskih gubitaka. Drugim rečima, ložište treba da omogući gorivu da svu svoju hemijski vezanu količinu toplote oslobodi u njegovom prostoru; u tom slučaju stepen iskorišćenja ložišta dostiže svoju najveću vrednost. Po svom položaju u odnosu na kotao ložište može da bude prednje (slika 72a), donje (slika 72b) i unutrašnje (slika 72c), što zavisi od načina njegovog ugradjivanja, konstrukcije ložišta, kao i od same konstrukcije kotla.

Konstrukcija ložišta zavisi od konstrukcije samog kotla, a ona opet, zavisi od vrste primenjenog goriva, prema čemu ih delimo uglavnom na: ložišta sa rešetkom i

ložišta sa plamenjakom. Ložišta sa rešetkom služe za sagorevanje čvrstog goriva, izuzev ugljene prašine. Ložišta sa plamenjakom služe za sagorevanje čvrstih goriva, kao i za sagorevanje tečnih i gasovitih goriva. To su ložišta u kojima sagorevaju vrlo sitni delići goriva u tzv. *letećem stanju*. Kod ovog tipa ložišta loženje je mehaničko.



Slika 72: a) Šematski prikaz prednjeg ložišta sa kosom etažnom rešetkom: 1.levak za gorivo, 2.zasun, 3.stepenasta rešetka, 4.šamotski svod, 5.plameni most, 6.obrtni završni deo rešetke, 7.pepeonik, 8.otvor za sekundarni vazduh, 9.zavrtnji za vezu, 10.točkovi;
b) šematski prikaz donjeg ložišta
c) šematski prikaz unutrašnjeg ložišta

- Ložišta sa rešetkom

Ložišta sa rešetkom služe za sagorevanje čvrstog goriva izuzev ugljene prašine. Kod ovih ložišta loženje može da bude *ručno* ili *mehaničko*.

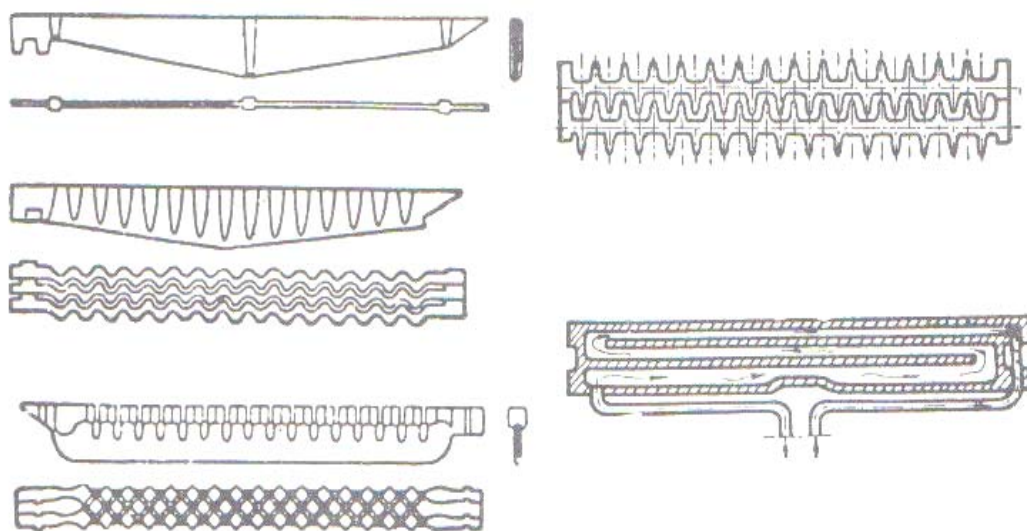
- Ložišta sa ručnim loženjem

Prema kvalitetu primenjenog goriva mogu se ložišta sa rešetkom podeliti na ona sa *ravnom rešetkom* sa *kosom rešetkom*.

- Ravna rešetka

Ravna rešetka je načinjena od štapova koji su izgradjeni od livenog gvoždja, čelika ili čelčnih legura. Izmedju ovih štapova nalaze se procepi za prelazak vazduha, potrebnog za sagorevanje goriva na rešetki. Brzina strujanja vazduha kroz rešetku iznosi do 2m u sekundi u slučaju prirodne promaje, dok u slučaju vetačke promaje brzina strujanja dostiže i do 10m u sek. Zbog ručnog loženja dužina rešetke je ograničena, do 2,2m a u izuzetnim slučajevima do 2,4m do koje je daljine ložać još u mogućnosti da lopatom dobaci, nabaci gorivo na zadnji kraj rešetke. Za određivanje površine rešetke, tj. dimenzije njene dužine i širine, potrebno je poznavati karakteristiku toplotnog opterećenja rešetke, kao i vrednosti sledećih veličina; produkciju pare u vremenu od jednog časa, toplotni sadržaj vodene pare, toplotni sadržaj vode za napajanje kotla, donju toplotnu moć goriva i stepen iskorišćenja parnog kotla.

Pošto je dužina rešetke kod ručnog loženja ograničena na 2,2m a najviše 2,4m, to je širina rešetke funkcije površine rešetke. Veličina slobodne površine rešetke ima vrednosti koje čine 20 do 50% ukupne površine rešetke. Radi boljeg funkcionisanja štapova rešetke i radi povećanja aktivne površine rešetke, štapovi se izrađuju u raznim konstruktivnim oblicima (slika 73).



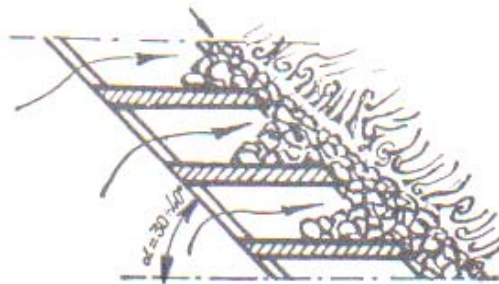
Slika 73: Šematski prikaz osnovnih tipova štapova rešetke

- | | |
|---------------------|---|
| a)običan prav štap, | g)zupčast štap |
| b)talasast štap, | d)specijalni štap kroz koji struji voda za njegovo hlađenje |
| v)kockast štap. | |

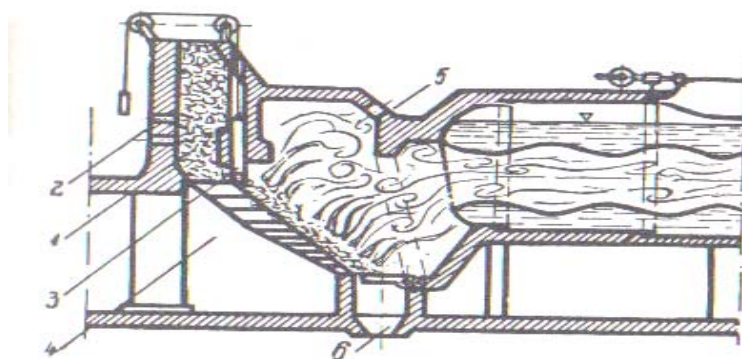
- Kosa rešetka

Kosa rešetka može se videti na slici 1a. Gorivo, koje se stavlja u levak, klizi, pada, zahvaljujući svojoj težini iz levka kroz zasun na stepenastu rešetku. Ova rešetka ima ugao nagiba 30-40 °C, što predstavlja prirodni ugao nagiba strane prirodne kupe uglja na stovarištu. Kod ovog tipa rešetke dužina rešetke iznosi 2-3m. Ovom konstrukcijom štapova rešetke postignuto je povećanje aktivne površine rešetke na skoro 70% ukupne površine rešetke, a pored toga sprečeno je propadanje sitnog goriva u pepeonik. Kod ovog tipa rešetke sagorevanje goriva se izvodi u zonama. U gornjem delu rešetke vrši se najpre sušenje goriva, pošto se ovo prethodno pušta na rešetku manjim ili većim otvaranjem zasuna, pri čemu se toplota potrebna za sušenje goriva uzima putem zračenja sa šamotskog svoda ložišta i usijanog plamenog mosta. Posle faze sušenja dolazi faza destilacije ugljovodonika iz goriva, koji se po izdvajanju iz goriva pod dejstvom visoke temperature užarenog svoda i usijanog plamenog mosta, te sagoreva u samom ložišnom prostoru. Na drugom delu rešetke, pri dnu, nastaje faza sagorevanja i dogorevanja nastalog koksa. Najzad na završnom delu rešetke, koji je zaravnjen a ne

nagnut, skupljaju se šljaka i pepeo, koji se izbacuju u pepeonik, zahvaljujući obrtanju ili pomeranju ovog završnog dela rešetke. Prema tome, ovde se radi o zonskom-faznom sagorevanju i sa prirodnim kretanjem goriva nadole. Što ugalj postaje suvlji pri sagorevanju, tim mu se smanjuje ugao nagiba strane prirodne kupe, kojim automatski osigurava klizanje uglja na donjem, završnom delu rešetke. Zahvaljujući ovome, kao i tome što ovakva ložišta imaju rešetke čiji etažni štapovi imaju srazmerno jednaku površinu hladjenja i zagrevanja, primenjuju se za slabije vrste goriva-ugljeva. Pri sagorevanju gorući komad uglja pada pod dejstvom gravitacije na niže stepene stepenaste rešetke, koju detaljno prikazuje slika 74. Pri svom padanju na niže stepenike užareni komad uglja zagreva hladan vazduh koji struji iz pepeonika i prolazi pored komada uglja. Pored toga, ovaj komad uglja, pri svom postepenom sagorevanju, istovremeno vrši toplotnu izolaciju sloja uglja koji se nalazi iznad njega, te time omogućuje njegovo dobro sagorevanje. U slučaju da gorivo sadrži u sebi mnogo ugljovodonika, potrebno je dovoditi mu pored tzv. primarnog vazduha još i sekundarni vazduh, koji se dovodi kroz specijalan otvor iznad sloja goriva koje sagoreva u fazi destilacije. Na taj način se postiže bolje sagorevanje teških ugljovodonika i ugljenmonoksida. Kod ovog tipa ložišta nema gubitaka toplote pri otvaranju vrata ložišta u toku loženja, kakav je bio slučaj kod prethodnog tipa ložišta. Glavna količina vazduha ovde se dovodi kroz pepeonik, pri čemu je brzina njegovog strujanja kroz procepe rešetke 2 m/s kod primene prirodne promaje, dok je u slučaju veštačke promaje 5 m/s. Ovaj tip ložišta, nazvan spoljašnji, vrlo je praktičan jer može da se odvoji od kotla skidanjem navrtki sa zavrtnja, da bi se na taj način udaljio na tačkovima radi čiscenja rešetke. Za goriva koja sadrže u sebi veliki procenat vlage, upotrebljava se tzv. *polugasno ložište* sa stepenastom rešetkom i jamom za sušenje goriva (sl. 75). Kod ovog tipa ložišta gorivo sa velikim procentom vlage stavlja se u jamu sa otvorima za prolazak vazduha koji služi za sušenje goriva.



Slika 74: Šematski prikaz štapova stepenaste etažne rešetke na kojoj sagoreva gorivo



Slika 75: Šematski prikaz ložišta sa stepenastom rešetkom i jamom za sušenje goriva
1.jama, 2.otvori za vazduh, 3.zasun, 4.stepenasta rešetka, 5.otvor za sekundarni vazduh,
6.pepeonik

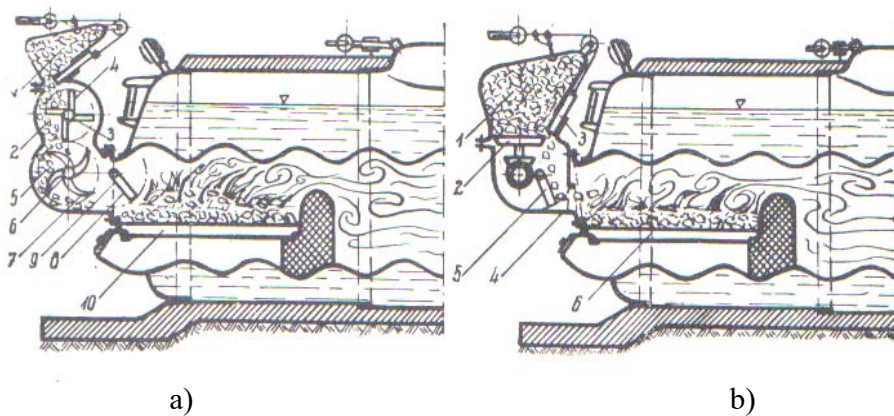
9.4.2 Ložišta sa mehaničkim loženjem

Ovaj tip ložišta se primenjuje kod velikih kotlova koji imaju veliku površinu rešetke, jer kod njih ne bi bilo moguće ručno ubacivanje goriva na rešetku. Za ova ložišta potreban je manji broj ložača; ona omogućuju brzo ubacivanje goriva u malim i velikim količinama. Kod ovih ložišta izbegnut je gubitak toplote koji je nastao pri otvaranju vrata prvog pomenutog tipa ložišta. Oni su skupa jer zahtevaju primenu specijalnih motora za pogon svojih delova-uređaja. Kod ovog tipa ložišta ljudska snaga zamenjena je mehaničkim uređajem, koji svojim funkcionisanjem omogućava odvijanje procesa sagorevanja kod koga se faze ne redjaju uzastopno, već istovremeno. Specifičnost konstruktivnog izvođenja mehaničkog ložišta zavisi uglavnom od vrste rešetke, i to da li je ravna ili kosa, tako da uglavnom imamo *mehanička ložišta sa ravnom ili kosom rešetkom*.

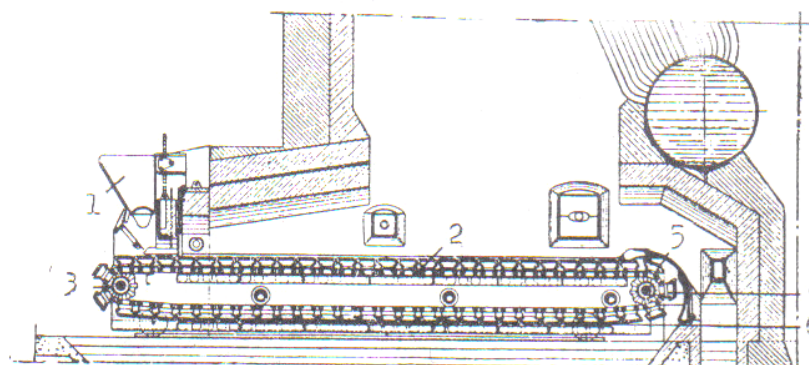
- Mehaničko ložište sa ravnom rešetkom

Za ravnu rešetku imamo uglavnom dva tipa najviše primenjivanih mehaničkih ložišta, i to: *katapultno i ložište sa lančanom rešetkom*. Katapultna ložišta mogu da se svrstaju uglavnom u dve grupe. U prvu grupu katapultnih ložišta svrstala bi se ložišta koja mogu da ostvare ubacivanje goriva pomoću uređaja koji se sastoji iz jednog vratila sa pravim perima i jednog motornog vratila sa ugradjenim savijenim perima (sl.76a). Tako se regulisanjem brzine obrtanja valjka sa ugradjenim pravim perima reguliše u stvari količina goriva, a regulisanjem brzine obrtanja valjka sa ugradjenim savijenim perima, kao i položajem klapne, reguliše se i sama daljina ubacivanja goriva na ložišnu rešetku. U drugu grupu katapultnih ložišta svrstala bi se sva ona ložišta koja funkcionišu posredstvom uređaja koji se sastoji iz obrtne ploče i jedne oscilirajuće lopate (sl.76b). Tako količina ubačenog goriva uglavnom zavisi od brzine obrtanja ploče, dok daljina njenog ubacivanja na samu rešetku ložišta zavisi od broja oscilacija oscilirajuće lopate u jedinici vremena. Predstavnik drugog tipa ložišta sa ravnom rešetkom, koji je i najviše rasprostranjen, je mehaničko ložište sa lančanom putujućom rešetkom. Ovo ložište

prikazuje u proseku slika 77. Lančana rešetka je jedna od najboljih za sve vrste goriva, kako za srednja tako i za velika kotlovska postrojenja. Gorivo iz levka pod dejstvom sopstvene težine pada na lančanu rešetku na kojoj se pali i sagoreva. Cela lančana rešetka je navučena na izvestan broj zupčanika i to preko nekoliko motornih zupčanika postavljenih duž prednjeg motornog vratila i isto toliko vodjenih zupčanika postavljenih duž zadnjeg vratila. Prednje i zadnje vratilo obrću se u ležistima koja su ugrađena u pravougaonom ramu. Ovaj ram ima točkove tako da se cela lančana rešetka može izvući iz ložišta u slučaju potrebe za opravkom rešetke ili samog kotla. Pod dejstvom motornih zupčanika cela lančana rešetka stavlja se u prinudno kretanje, i to različitom brzinom, koja se kreće između 6 i 12 m/h kod starijih, a približno dva puta brže kod modernih putujućih rešetki. Moderne rešetke ovog tipa imaju specijalne uređaje za povećanje brzine i na 40 m/h; inače najviše primenjena brzina iznosi do 120 mm/min. Ova brzina umnogome zavisi od vrste i kvaliteta samog goriva.



Slika 76: Šematski prikaz mehaničkog katapultnog ložišta sa uređajem za ubacivanje uglja pomoću vratila sa perima: 1-levak za uglj, 2-prostor za uglj, 3-vratilo, 4-pravo pero, 5-prostor za uglj, 6-vratilo, 7-profilisano pero, 8-metalna ploča, 9-horizontalna osovina, 10-rešetka ložišta.



Slika 77: Šematski prikaz mehaničkog ložišta sa lančanom rešetkom: 1-levak za uglj, 2-lančana rešetka, 3-motorni zupčanik, 4-vodjeni zupčanik, 5-pravougli ram, 6-točkovi.

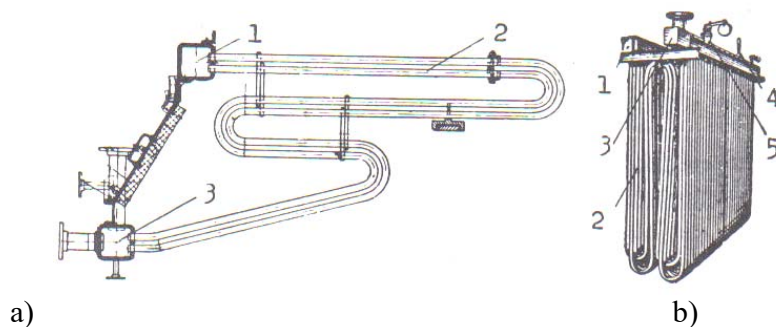
9.5 Tipovi i konstrukcije delova kotlovskog agregata

9.5.1 Zadatak delova kotlovskog agregata

U delove kotlovskog agregata dolaze;pregrejač pare,zagrejač vode za napajanje parnog kotla, kao i zagrejač vazduha. Svi ovi uređaji rade na principu korišćenja toplote vrelih proizvoda sagorevanja. Tako pregrejač pare uzima toplotu od vrelih produkata sagorevanja, koji bi mogao i sam parni kotao da koristi. Medjutim zagrejač vode i zagrejač vazduha obično se ugradjuju u dimne kanale, i to na mestima prolaza već toplotno iskorišćenih vrelih gasova sagorevanja, te na taj način naknadno iskorišćuju još jedan deo toplote ovih gasova, koja bi inače, u slučaju neprimenjivanja uređaja, otišla neiskorišćena napolje, u atmosferu. Zbog toga se zagrejaču vode i vazduha nazivaju još ekonomajzeri. Svi ovi delovi kotlovskog agregata poboljšavaju koeficijent iskorišćenja kotlovskog postrojenja, a istovremeno povišavaju stepen iskorišćenja celokupnog postrojenja.

9.5.2 Pregrejač pare

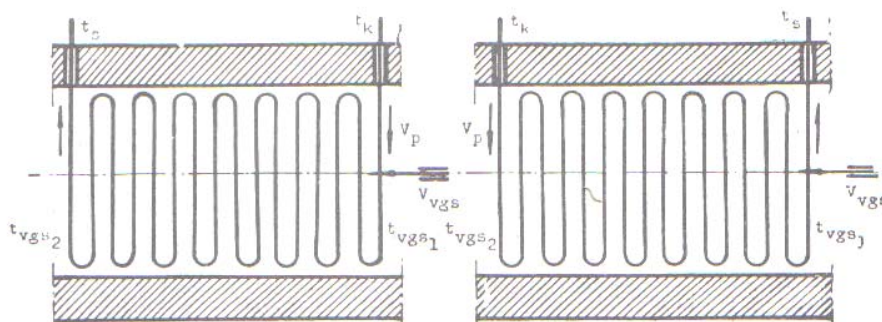
Pregrejač pare je deo kotlovskog agregata, uređaj koji ima zadatak da pregreje već proizvedenu i zasićenu paru u kotlu pri stalnom kotlovskom pritisku, tj.da proizvede pregrejanu paru, čija je temperatura, koja je znatno viša od temperature kotla. Sam pregrejač pare sastoji se iz većeg broja cevi malog prečnika kroz koje se propušta proizvedena para iz kotlovskog parnog prostora, odnosno parnog doma. Proizvedena vodena para u cevima pregrejača pregrevava se toplotom koju odaju vreli produkti sagorevanja pri svom strujanju između cevi pregrejača, njihovim dodirima sa spoljnim površinama metalnih zidova pregrejača pare kao i zračenjem toplote. Pri sagorevanju pare pod stalnim kotlovskim pritiskom specifična zapremina stalno raste, ukoliko se povećava temperatura pregrejane pare. Prema tome, ukoliko se želi dobiti veća zapremina proizvedene pare pregrevanjem, utoliko je potrebno nju izložiti višoj temperaturi pregrevanja. Iz ovih razloga pregrejači pare obično su postavljeni na putu strujanja gasova sagorevanja, i to na mestima gde njihova temperatura dostiže preko 500°C , a kod zračenih pregrejača pare čak i do 1200°C . Neke konstrukcije pregrejača date su na slikama 77 i 78.



Slika 77a: Šematski prikaz pregrejača pare sa horizontalnim cevima sistema W: 1.kolektor za dovod proizvedene pare, 2.cevi pregrejača pare, 3.kolektor za odvod pregrejane pare.

Slika 77b: Šematski prikaz pregrejača pare sa vertikalnim cevima: 1.kolektor za dovod proizvedene pare, 2.cevi pregrejača pare, 3.kolektor za odvod pregrejane pare, 4.termometar, 5.ventil sigurnosti

Praksa je pokazala da za pravilan rad toplotnih mašina vodena para treba da ima tačno određenu temperaturu. Iz tih razloga potrebno je da parni kotao ima uređaj za regulisanje tačno određene temperature pregrejanosti vode. Ovo se može postići primenom naročito konstruisanih uređaja kroz koje se propušta pregrejana vodena para da bi se u njima rashladila ubrizgavanjem izvesne količine hladne vode.



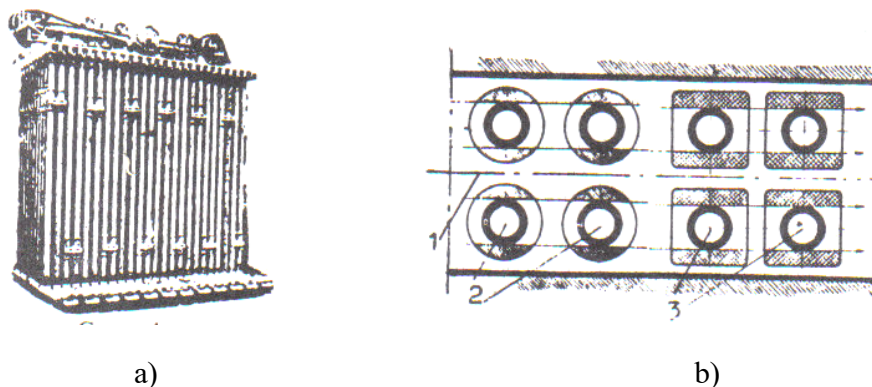
Slika 78: Šematski prikaz pregrejača pare izloženog poprečnom opastrujavanju vrelih gasova sagorevanja:

- a) slučaj paralelnog strujanja vrelih gasova sagorevanja i vodene pare u pregrejaču,
- b) slučaj protivravnog strujanja vrelih gasova sagorevanja i vodene pare u pregrejaču.

9.5.3 Zagrejač vode

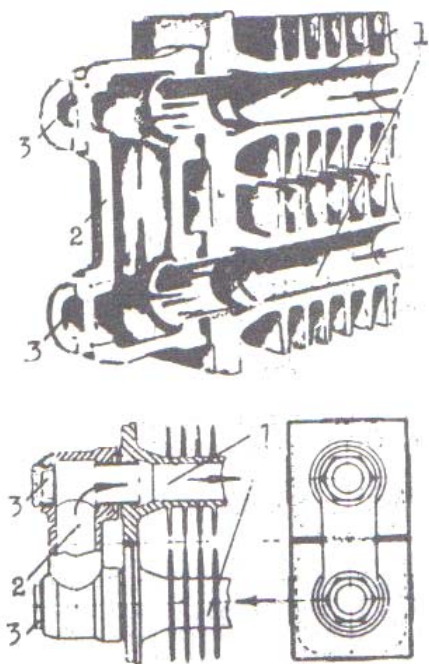
Zagrejač vode je uređaj koji ima zadatak da zagreje vodu namenjenu napajanju parnog kotla pomoću toplote vrelih gasova sagorevanja, koja inače za kotao nema više nikakve vrednosti, jer je ovaj ne može više iskoristiti. Za iskorišćavanje toplote vrelih gasova sagorevanja ovaj uređaj zagrejača vode je specijalno konstruisan od čitavog niza cevi kroz koje cirkuliše voda za napajanje parnog kotla. U slučaju prirodne promaje i običnog dimnjaka potrebno je da temperature vrelih gasova sagorevanja bude uvek nešto iznad 180°C , dok ima parnih postrojenja kod kojih su ove temperature ispod 150°C . Srednja temperaturska razlika u slučaju paralelnog strujanja vrelih gasova sagorevanja i vode u cevima zagrejača vode. Kod kotlova niskog pritiska veličina površine zagrejača vode često iznosi 0,25-0,30 od celokupne grejne površine kotla, dok kod kotlova najvišeg pritiska veličina grejne površine zagrejača vode često prekoračuje vrednost grejne površine kotla iz tih razloga što je grejna površina ekonomičnija od grejne od grejne površine parnog kotla. Zagrejači vode mogu se izvesti iz većeg broja glatkih vertikalnih cevi kroz koje struji voda za napajanje (sl. 79) ili konstruisane iz cevi na čijim su spoljnim površinama postavljena rebra. Rebrima se postiže veća dodirna površina

ekonomajzera sa vrelim gasovima sagorevanja. Sama rebra sa cevima mogu biti raznog oblika i veličine.

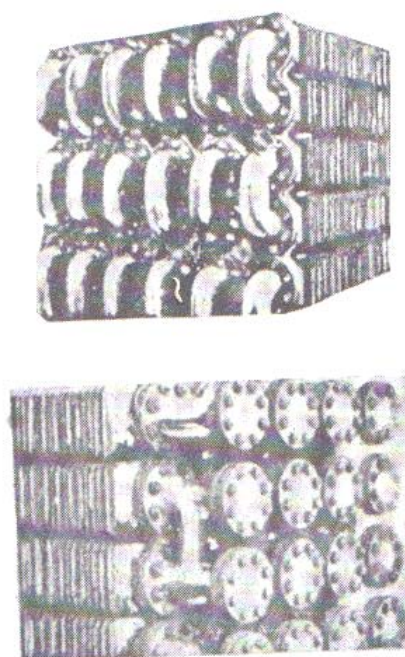


Slika 79: a) Zagrejač vode sa glatkim vertikalnim cevima, raspoređenim u jednu grupu; b) prikaz rebara kružnog i kvadratnog preseka na cevima ekonomajzera

Najčešće se primenjuje kvadratni oblik, jer on, u odnosu na kružni ima znatno veću površinu dodira sa vrelim gasovima sagorevanja, što se lepo vidi iz slike 79b. Rebraste cevi obično se postavljaju u horizontalnom položaju, grupisane u dimnom kanalu u samoj struji vrelih gasova, tako da su im rebra vertikalno postavljena, jer bi u slučaju da su rebra horiz. postavljena nastalo taloženje pepela i čadji na njima; ovo bi znatno smetalo prenošenju toplote vrelih gasova sagorevanja kroz metalni zid ekonomajzera na vodu za napajanje. Samo čišćenje rebara cevi od pepela i čadji vrši se primenom mlaza jako komprimiranog vazduha ili pregrejane pare.



Sl. 80



Sl. 81 a) i b)

Slika 80: Šematski prikaz rebraste cevi zagrejača vode: 1.rebrasta cev, 2.prelazno koleno, 3.zatvarač otvora sa ugrađenom zavojnicom za čišćenje cevi od kotlovskog kamena

Slika 81: Zagrejač vode sa rebrastim cevima: a)rebraste cevi sa prelaznim kolenima cevi; b)rebraste cevi sa prel.kolenima i poklopcima za otvore

9.5.4 Zagrejač vazduha

Zagrejač vazduha je uređaj koji služi za zagrevanje vazduha i to kako celokupne količine vazduha potrebne za sagorevanje goriva u ložištu tako i za zagrevanje tzv. sekundarnog vazduha. On radi na principu korišćenja izlaznih vrelih gasova sagorevanja, koji ne dolaze više u obzir za dalje korišćenje u samom kotlu. Prema tome i zagrejač vazduha je ekonomičniji jer naknadno koristi jedan deo otpadne toplote preostale u vrelim gasovima sagorevanja, koja se više ne može koristiti u samom kotlu, te bi prema tome, izlazila neiskorišćena kroz dimnjak u atmosferu. Ovako zagrejani vazduh, sproveden u ložišni prostor znatno olakšava sagorevanje goriva i time povećava stepen iskorišćenja ložišta.

- Rekuperativni zagrejač vazduha

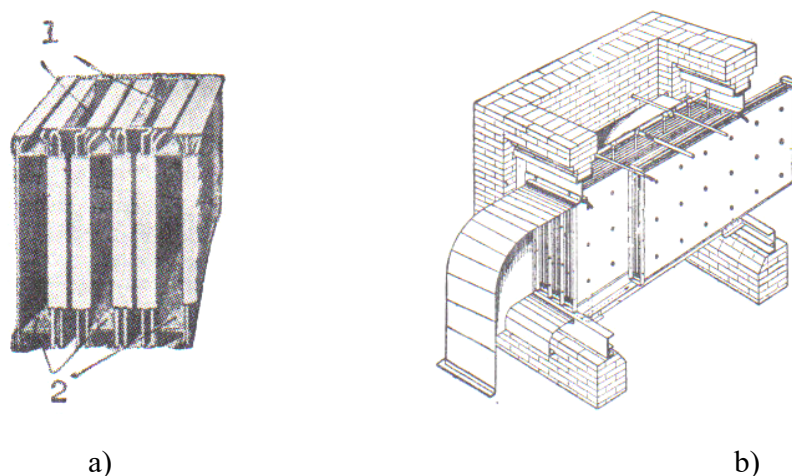
Ovaj zagrejač vazduha u dimnom kanalu postavlja se tako da leži tačno na pravcu strujanja vrelih gasova kroz njega i na taj način direktno uzima sto veću količinu toplote da bi zagrevao vazduh koji kroz njega cirkuliše. Ovaj tip zagrejača vazduha izrađuje se u *vidu cevi ili pljosnatih elemenata*.

- Zagrejač vazduha u vidu cevi

Ovaj zagrejač izrađuje se od većeg broja čeličnih cevi postavljenih pravo na pravac strujanja vazduha, dok se kod njih propuštaju vreli izlazni gasovi sagorevanja. Radi boljeg korišćenja toplote vrelih gasova ovi cevni zagrevači se izrađuju od livenog gvoždja sa tankim zidovima snabdevenim sa spoljne strane i unutrašnje strane izlivenim rebrima raznog oblika i veličine, radi povećanja površine dodira, a time i povećanja količine rekuperirane toplote.

- Zagrejač vazduha u vidu pljosnatih elemenata

Ovaj zagrejač (sl.82a) sastoji se od 2 vertikalna kanala, kroz koji struje vreli gasovi sagorevanja, i od 3 horizontalna kanala, kroz koji struji vazduh koji se tom prilikom zagreva primajući toplotu od vrelih gasova sagorevanja preko povećane grejne površine koja ih razdvaja. Sami kanali su izgrađeni od metalnih limova debljine do 3mm, a širine do 25mm. Kao što se sa slike vidi, svaki kanal za prolaz vrelih gasova sagorevanja nalazi se između 2 kanala za prolaz vazduha koji želimo da zagrevamo. Ovakav raspored elemenata primenjuje se sa ciljem da bi se smanjio gubitak toplote vrelih gasova sagorevanja, a naročito da bi se kroz spoljni kanal propustao vazduh koji vrši ulogu termičkog izolatora od okoline. Sklop nekoliko elemenata čini grupu, dok više grupa, postavljenih jedna iznad druge na putu prolaska vrelih dimnih gasova u dimnom kanalu i povezanih, čine zagrejač vazduha.



Slika 82: Šematski prikaz zagrejača vazduha od pljsonatih elemenata: a) Grupa pljsonatih elemenata: 1-kanal za prolaz vrelih gasova sagorevanja, 2-kanal za prolaz vazduha koji treba zagrijati; b) Zagrejač vazduha u stadijumu montaže.

9.6 Tipovi i konstrukcije parnih kotlova

Prema količini vode sa kojom rade kotlove možemo podeliti na: kotlove sa velikim sadržajem vode i kotlove sa malim sadržajem vode.

Kotlovi sa velikim sadržajem vode dele se na: vertikalne kotlove, kotlove sa plamenim i grejnim cevima i na kombinovane kotlove (lokomobilski, lokomotivski i brodski).

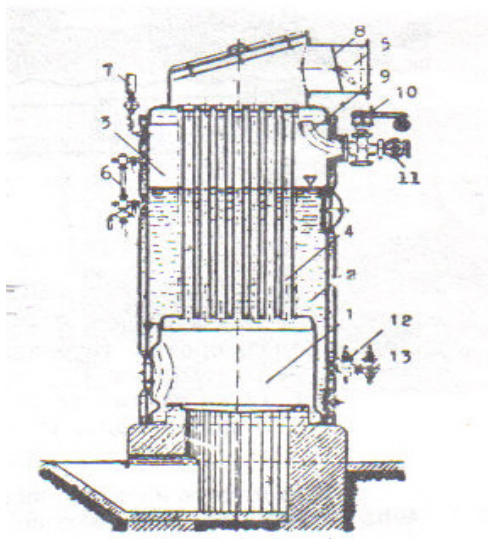
Kotlovi sa malim sadržajem vode dele se na: kotlove sa nagnutim vodogrijnim cevima, kotlove sa strmim vodogrejnim cevima i na kotlove specijalnih konstrukcija.

9.6.1 Kotlovi sa velikim sadržajem vode

Zapremina vodenog kotla jako utiče na pravilan rad parnog kotla. Kotlovi sa velikim sadržajem vode primenjuju se u pogonu gde se javlja neravnomeran rad i nagle promene u potrošnji vodene pare. Ako dođe do naglog povećanja potrošnje pare, kotlovski pritisak neće opasti jer ima veliki sadržaj vode u kotlu. Ovo omogućava velika količina toplote koju voda sadrži.

- Vertikalni kotlovi

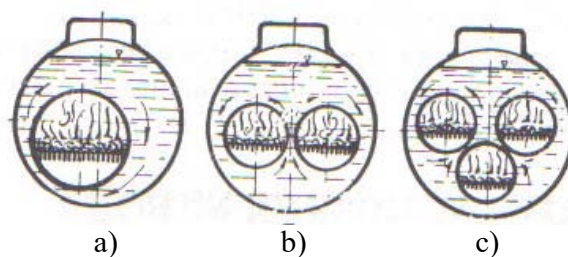
Upotrebljavaju se za pomoćne svrhe u manjim parnim postrojenjima industrije. Veličina grejne površine je do 25 m^2 , pritisak do 15 bar, a specifična proizvodnja pare je do $20 \text{ kg/m}^2\text{h}$.



Slika 83: Šematski prikaz vertikalnog kotla: 1-unutrašnje ložište, 2-vodeni prostor, 3-parni prostor, 4-grejne cevi, 5-dimnjak, 6-vodomerno staklo, 7-manometar, 8-priklopac za regulisanje promaje, 9-parovodna cev, 10-sigurnosni ventil, 11-ventil za paru, 12-ventil za vodu, 13-cev za dovod vode.

- Kotlovi sa plamenim cevima

Primenjuju se kod manjih i srednjih parnih postrojenja u industriji. To su obični cilindrični kotlovi sa ugrađenim plamenim cevima u vodenom prostoru. Obično imaju samo jednu plamenu cev i nazivaju se kornuelski kotlovi. Kornuelski kotlovi imaju veću grejnu površinu od cilindričnih kotlova istih dimenzija. Veličina grejne površine je do 150 m^2 , pritisak u kotlu je do 15 bar, a specifična proizvodnja pare do $20 \text{ kp/m}^2\text{h}$.



Slika 84: Šematski prikaz preseka kotlova sa plamenim cevima: a) kotao sa jednom plamenom cevi-kornuelski; b) kotao sa dve plamene cevi-lankaširski; c) kotao sa tri plamne cevi

- Kotao sa jednom plamenom cevi- kornuelski

Plamena cev se postavlja ekscentrično u odnosu na vertikalnu geometrijsku osu samog kotla, čime se postiže prirodna cirkulacija vode.

- Kotao sa dve plamene cevi- lankaširski

Po konstrukciji su slični kornuelskim kotlovima, samo sto u vodenom prostoru umesto jedne vodene cevi imaju dve. Ekscentrični položaj plamenih cevi stvara jaču koncentraciju toplote na određenim mestima i time bolje predaje toplotu. Voda u samom kotlu jače i bolje cirkuliše.

- Kotao sa tri plamene cevi

U ovom slučaju ugrađene su tri plamene cevi u vodenom prostoru. Povećana je grejna površina, jača je koncentracija toplote i bolja cirkulacija vode u odnosu na prethodna dva kotla. Retko se prave i deo su kombinovanih kotlova (brodski kotlovi).

- Kotlovi sa grejnim cevima

To su cilindrični kotlovi sa grejnim (gasnim, dimnim) cevima smeštenim u vodenom prostoru kotla. Kod ovih kotlova plamene cevi su zamenjene većim brojem cevi malog prečnika (grejnim cevima), čime se povećava grejna površina. Grejna površina je veličine do 200 m².

- Kombinovani kotlovi

Svrstavaju se u dve grupe:

- Kombinovani dvostruki kotlovi

Sastoje se iz dva dela: kotla sa plamenim cevima ugrađenim jedan iznad drugog ili donji može da bude sa plamenim cevima, a gornji sa ugrađenim grejnim cevima. Grejna površina dostiže vrednost do 700m².

- Kombinovani jednostruki kotlovi

Kotlovi ove grupe se sastoje iz dva dela (iz plamenih i grejnih cevi). Ugrađena jedan u produženju drugog ili jedan iznad drugog povejanih u celinu. Takvi su na primer: lokomobilski, lokomotivski, brodski kotao.

9.6.2 Kotlovi sa malim sadržajem vode

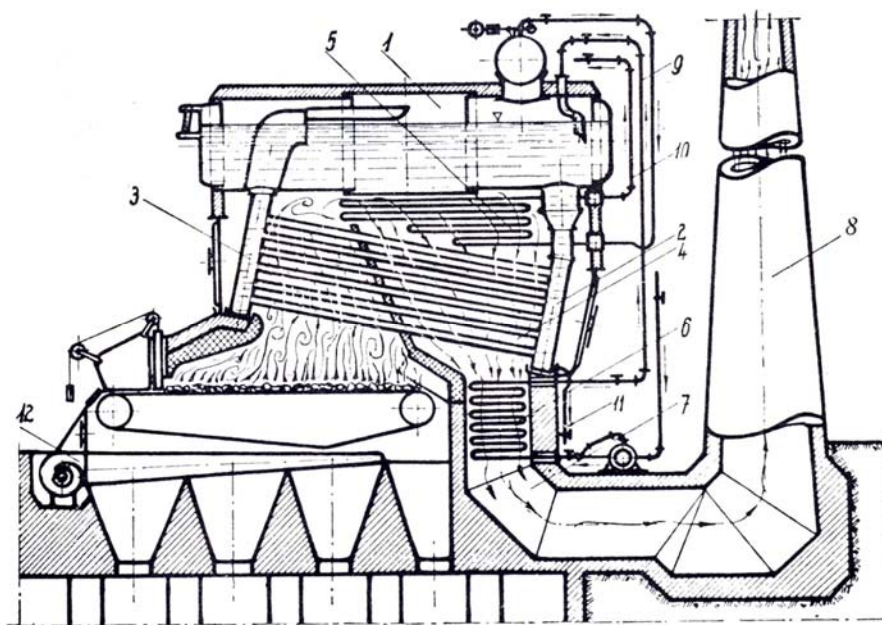
U ovu grupu spadaju kotlovi sa nagnutim i strmim cevima i kotlovi specijalnih konstrukcija. Svi nabrojani tipovi kotla sastoje se od voduogrejnih cevi kroz koje voda cirkuliše prirodno ili prinudno. Sa spoljne strane cevi struje vreli gasovi koji cevima prenose deo toplote, a cevi dalje tu toplotu prdaju vodi koja se nalazi u cevima.

Primenom voduogrejnih cevi u parnim kotlovima postiže se veća grejna površina kotla i bolja cirkulacija vode u samom kotlu. Ovi kotlovi brže se puštaju u rad, jer sadrže manju količinu vode, a imaju sposobnost da stvaraju paru većeg pritiska. Zahvalni su za smeštaj na malim površinama, jer im se konstrukcija razvija u visinu.

- Kotlovi sa nagnutim voduogrejnim cevima

Ova vrsta kotla sastoji se od jednog ili dva doboša koji su preko dve voduogrejne komore (prednje i zadnje), povezane sa čitavim nizom naizmenično poređanih voduogrejnih cevi. Ove cevi su postavljene pod nagibom od 20°.

Ova grupa kotlova deli se na dve vrste: kotlovi sa nagnutim voduogrejnim cevima sa dve nepodeljene voduogrejne komore i kotlovi sa dve podeljene voduogrejne komore. Grejna površina im je do 450 m², pritisak pare dostiže do 25bar, a specifična proizvodnja pare do 60 kg/m²h.



Slika 85: Šematki prikaz kotla sa dve nepodeljene voduogrejne komore

9.7 Kotlovska armatura

Kotlovska armatura je sastavni deo kotlovske postrojenja, jer vrši važnu ulogu, služi za kontrolu sigurnosti i bezbednosti pravilnog rada parnog kotla. Svaki parni kotao mora imati kotlovsku armaturu koja se deli na:

1. armaturu parnog prostora
2. armaturu vodenog prostora

9.7.1 Armatura parnog prostora

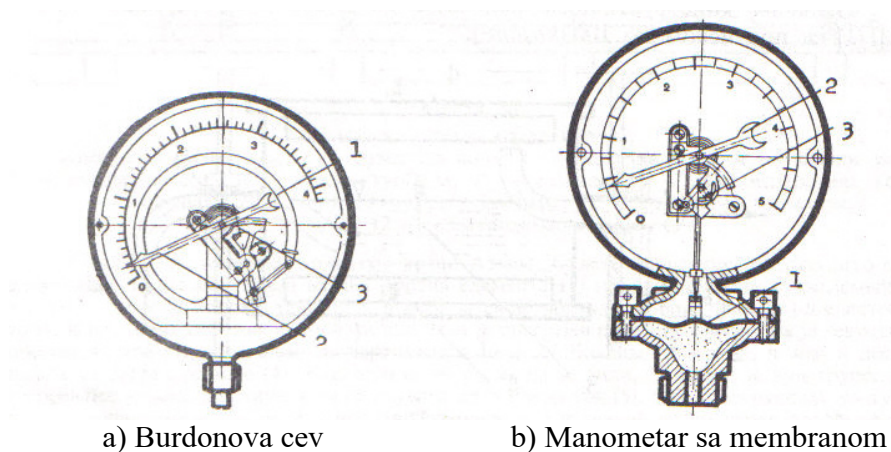
Armaturu parnog prostora sačinjavaju manometri i sigurnosni ventili.

1. Manometar - instrument koji meri kotlovski natpritisak. Svaki kotao mora imati manometar sa oznakom najvećeg dozvoljenog natpritiska.

Postoje dve vrste manometra:

a) *manometar sa Burdonovom cev* (sl. 86a). Sastoji se iz: (1) Burdonova cev - pri porastu unutrašnjeg pritiska ispravlja se i tako izaziva pokretanje (2) kazaljke na gradujsanoj skali posredstvom (3) zupčanog sektora.)

b) *manometar sa membranom* (sl. 86b) Sastoji se iz (1) elastične talasaste pločice membrane, koja se pri povećanju pritiska ispupči prema gore, time se pokreće (2) kazaljka na gradujsanoj skali posredstvom (3) zupčastog sektora.)



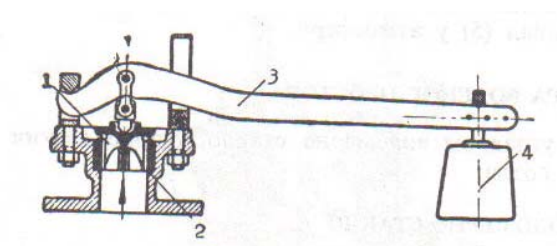
Slika 86: Manometri

2. Sigurnosni ventil - Ima zadatak da automatskim otvaranjem ograniči maksimalni radni pritisak u kotlu, i da se zatvori čim pritisak u kotlu opadne ispod dozvoljene vrednosti. Svaki kotao treba obavezno da raspolaže ventilom sigurnosti čija osetljivost treba da bude

takva da se on u trenutku otvori čim vrednost pritiska u kotlu prekorači dozvoljeni pritisak u kotlu za 0,25bar.

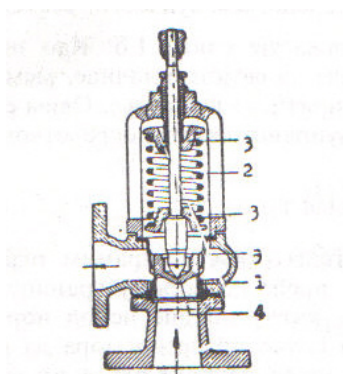
Postoje dve vrste sigurnosnih ventila:

a) *Ventil sa tegom* (sl. 87). Upotrebljava se kod stabilnih, nepokretnih kotlova. Sa slike 87. je uočljivo da je ventilu (1) osigurano naleganje na sedište (2), opterećenjem koje dobija preko poluge (3) od tega (4). Ukoliko dodje do povećanja pritiska u kotlu iznad dozvoljene vrednosti, moment koji stvori sila pritiska biće veći od momenta usled težine tega (4), ventil će se podići sa sedišta (2) i para će isteći. Usled ovog nastupiće pad pritiska u kotlu sve dok se ne postigne dozvoljena vrednost pritiska, nakon čega se momenti usled sile pritiska i težine tega izjednačavaju i ventil zatvara.



Slika 88: Sigurnosni ventil sa tegom

b) *Sigurnosni ventil sa oprugom* (sl. 88). Upotrebljava se uglavnom kod mobilnih kotlova, jer potresi tokom kretanja ne utiču na hermetičnost. Naleganje ventila uz njegovo sedište (1) i potpuno zaptivanje, služi opruga (2), koja je ugrađena između gornjeg i donjeg tanjirića (3). Kada se prekorači kotlovski pritisak opruga se skuplja odozgo naglavu ventila (4), time dolazi do dizanja glave sa sedišta i tako se kroz otvore i kanale (5) propušta para u atmosferu.



Slika 89: Sigurnosni ventil sa oprugom

9.7.2. Armatura vodenog prostora

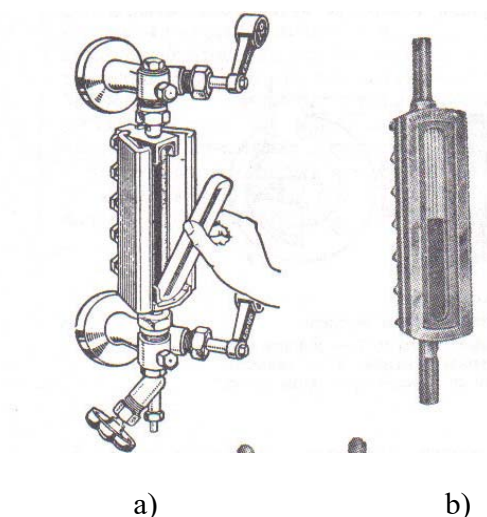
Ova armatura sačinjena je iz:

- Vodomernog stakla

- Napojnog ventila
- Ventila za pražnjenje parnog kotla

1. Vodomerno staklo

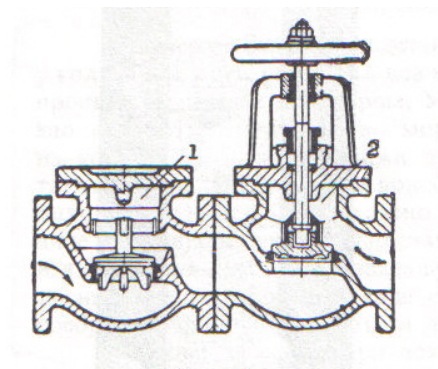
Vodomerno staklo je instrument za pokazivanje nivoa vode u kotlu. Predstavlja šuplju cev koja je tako ugrađena na kotao da spaja vodeni i parni prostor. U vodomernom staklu nivo vode je isti kao nivo u kotlu. Na vodomernom staklu ugrađenom na kotao mora biti obeležen najniži propisani vodostaj za taj tip kotla, koji se nalazi 100 mm iznad vatrene linije. Postoji i Klingerova (sl. 89a) staklena pločica koja se stavlja u specijalnu kutiju. Ovo staklo je dosta debelo i izbrazdano žljebovima, zahvaljujući žljebovima pri prelamanju svetlosti voda se vidi kao crna tečnost, a para kao sjajna srebrna površina (sl. 89b).



Slika 90: Vodomerno staklo: a) ugradjivanje Klingerove staklene pločice u kutiju vodomernog stakla, b) nivo vode (crno) i para (svetlo).

2. Napojni ventil

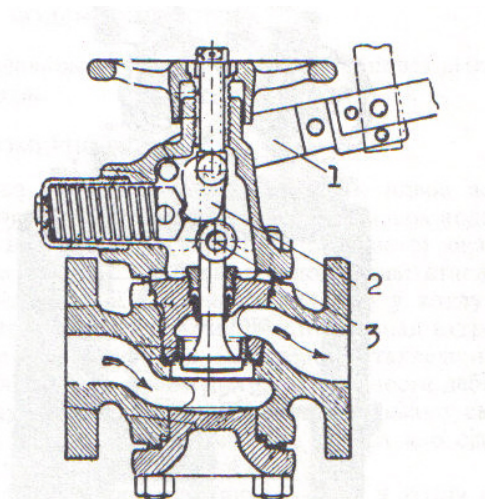
Ugrađuje se na cevnom vodu, između pumpe za napajanje vodom i ulaza cevnog voda u kotao. Zadatak ventila je da se automatski zatvori pod dejstvom pare pri prekidu napajanja kotla vodom, a otvara se pri radu pumpe. Pri radu pumpe postiže se veći pritisak vode u cevi nego u kotlu i nastupa automatsko otvaranje ventila. Kada pumpa prestane da radi ventil se automatski zatvara pod dejstvom pare u kotlu. Često se dešava da u kotao dopre neko strano telo, pa je potrebno pored napojnog ventila imati i ventil zatvarač (sl. 91), koji se zavrće rukom u slučaju nehermetičnosti odbojnog (napojnog) ventila.



Slika 91: Napojni ventil sa ugrađenim ventilskim zatvaračem: 1)napojni ventil; 2)ventil zatvarač (strelicama su označeni pravac i smer strujanja vode)

3. Ventil za pražnjenje parnog kotla

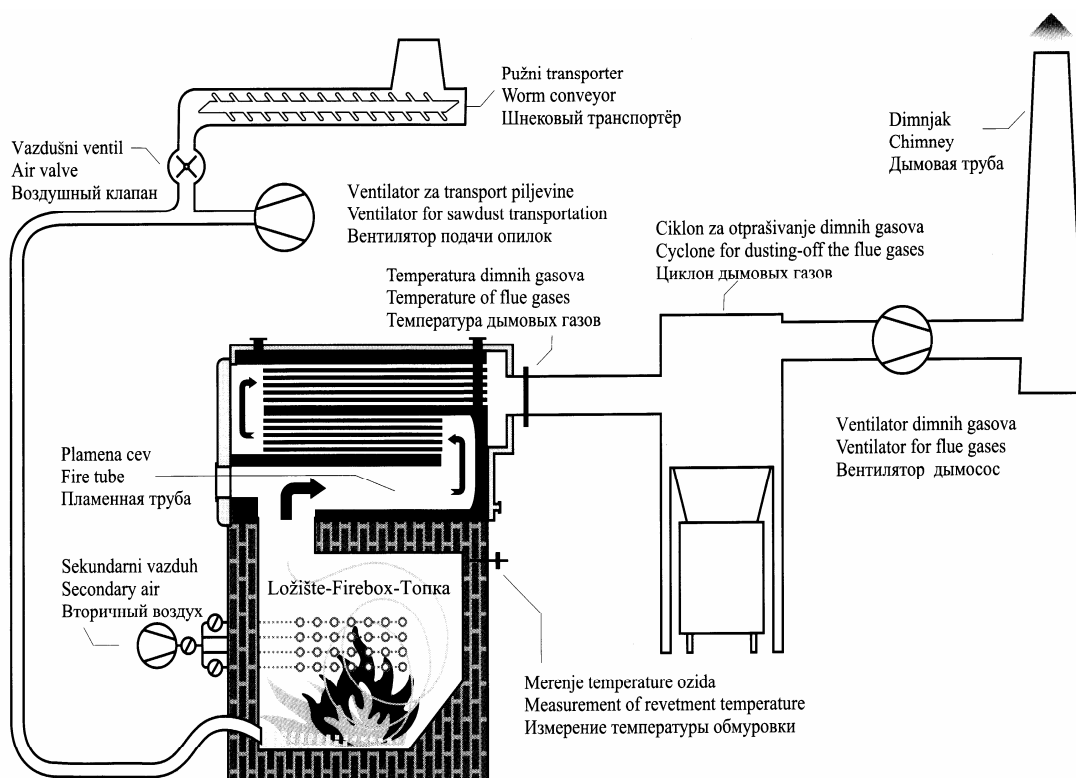
Na slici 92. prikazan je ventil za pražnjenje parnog kotla. Pokretanjem ručice (1) nagore, stavlja se u pokret glava ventila nadole, posredstvom naročitog tela (2) i kotura (3), ugrađenih na telu glave ventila. Time voda iz kotla dejstvom kotlovskog pritiska, ističe kroz oslobođeni otvor ventila napolje. Po prestanku dejstva na ručicu (1) glava ventila, pod pritiskom vode iz kotla, automatski se vraća nagore, što prekida pražnjenje kotla. Ovaj ventil zahvaljujući položaju ne hvata kotlovski kamenac, pa je potpuno obezbeđena hermetičnost zatvaranja ventila.



Slika 92: Ventil za pražnjenje parnog kotla

9.8 Toplovodni kotao na piljevinu

U današnje vreme na tržištu proizvoda iz prerade drveta veoma su zastupljena mala i srednja preduzeća sa fleksibilnim programom proizvodnje. Njihova delatnost je uglavnom finalana prerada drveta, odnosno izrada elemenata po želji kupca. Ovakva preduzeća obično u svom sastavu nemaju sušare i parionice, već po potrebi kupuju već osušenu ili parenu gradju. S toga ne postoji potreba za proizvodnjom pare u kotlu, već samo za dobijanjem tople vode. Ova topla voda koristi se u instalacijama grejanja za zagrevanje proizvodnih pogona, kao i preko izmenjivača toplote za zagrevanje vazduha koji je kao topao potreban u kabinama za lakiranje. Za takve potrebe samo zagrevanja vode uglavnom se koriste toplovodni kotlovi. Ovakvi kotlovi kao gorivo koriste piljevinu, koja se stvara kao otpadak u proizvodnim pogonima. Na ovaj način ostvaruje se znatna ušteda u nabavci inače skupih energenata: uglja, mazuta, gasa i sl., i rešava ekološki problem odlaganja otpatka, kao i izbegavaju transportni troškovi do potrošača drvnog otpatka, što bi svakako uticalo na povećanje cene takvog inače jeftinog i obnovljivog goriva. Šema jednog takvog kotla data je na slici 93.



Slika 93. Toplovodni kotao na piljevinu sa automatskom dopremom goriva i potpunom kontrolom sagorevanja

Sam kotao se sastoji od ozidanog ložišta sa kosom pokretnom rešetkom i horizontalnog tropromajnog izmenjivača toplote. Kosa rešetka je dimenzionisana tako da omogućava kompletno sagorevanje goriva. Primarni vazduh za sagorevanje se dovodi kroz otvore na samoj rešetki. Sekundarni vazduh se dovodi kroz mlaznice koje se nalaze na bočnim zidovima iznad linije sagorevanja goriva na rešetki. Količina primarnog i sekundarnog vazduha se reguliše nezavisno da bi se ostvarilo optimalno sagorevanje unetog goriva. Dodatno dovodjenje dimnih gasova u ložište smanjuje njihovu temperaturu na ispod 1000°C,

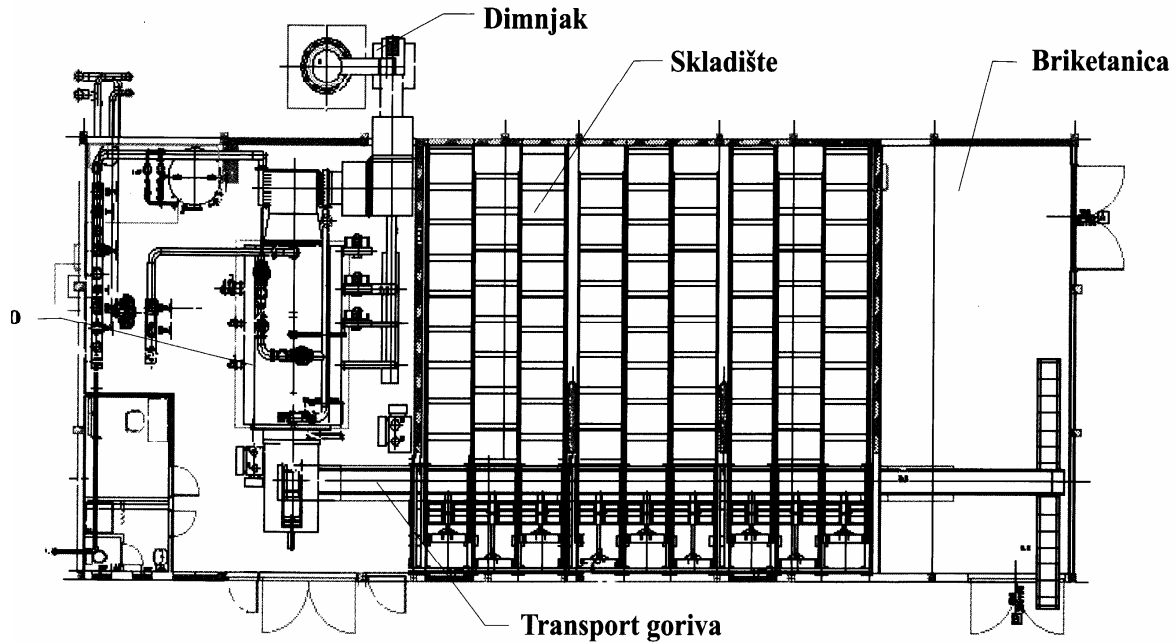
da ne bi došlo do topljenja letećeg pepela i smanjenja koncentracije NO_x . Izmenjivač toplote odnosno konvektivni deo kotla je projektovan na osnovu pravilno usvojenih brzina dimnih gasova da bi se efekat abrazije materijala izmenjivača što više smanjio. Na izmenjivaču toplote obično postoji priključak za alternativni gorionik na gasovito ili tečno gorivo.

Gorivo se transportuje do ložišta putem ventilatora (slika 93). Iza pužnog transportera se preko vazdušnog ventila (slika 93) uvodi vazduh i razlika atmosferskog pritiska i potpritiska u ložištu, uz pomoć ventilatora za transport piljevine, omogućava transport piljevine do rešetke ložišta. Konstrukcija transportera je prilagodjena specifičnosti materijala koji se prenosi. Ukoliko je predviđeno i briketiranje drvnog otpatka onda su obično predviđena dva transportera. Jedan prebacuje gorivo do prihvatnog bunkera, dok drugi služi za prebacivanje piljevine do briketarnice. U briketarnici je predviđeni i transporter koji u zavisnosti od potreba piljevinu transportuje do bunkera briket mašine ili napolje u prihvatni sanduk transportnog vozila.

Ciklon za otprašivanje dimnih gasova (slika 93) sastoji se iz većeg broja malih ciklona kroz koje prolaze dimni gasovi sa velikom tangencijalnom brzinom zbog čega dolazi do izdvajanja težih čestica. Dimni trakt se sastoji od ventilatora dimnih gasova, automatske regulacije promaje u kotlu, i fleksibilnih veza i gasnih kanala dimnjaka.

Skladište goriva (piljevine) treba da obezbedi rezervu goriva za dovoljan broj dana rada kotla punim kapacitetom. Gorivo se obično pneumatski transportuje do skladišta. Iznad svake mašine za finalnu preradu drveta postoji usisna kapa u koju ulazi piljevina nastala u procesu rezanja i sistemom cevi i radom jednog ili više ventilatora piljevina se transportuje do skladišta. Pod skladišta (slika 94) je prekriven izvlakačima koji su projektovani da guraju i povlače materijal iz skladišta. Potrebnu silu za guranje i povlačenje goriva obezbeđuju hidraulični cilindri dvostrukog dejstva. Izvlakači povlače materijal na kraj bunkera odakle pada na transporter. Pepeo i prašina se skupljaju na kraju ispod rešetke i delimično ispod multiciklona i mogu se pomoću mehaničkog transportera prebacivati do kontejnera.

Što se tiče same automatike za rad kotlovskog postrojenja ona treba najpre da obezbedi pravilan odnos O_2 , CO i CO_2 u ložištu kotla radi potpunog i što ekonomičnijeg sagorevanja. Osnovni uslov za ovo je obezbeđivanje potrebne debljine sloja na pokretnoj rešetki koja se oscilatorno kreće napred nazad. Drugi uslov je dovoljna količina primarnog i sekundarnog vadauha, a treći je kontinualno odvođenje dimnih gasova. Temperaturnom sondom u ložištu se održava potrebna temperatura sagorevanja, tako što se održava potrebna količina goriva promenom brzine trake za dovod goriva. Ova promena broja obrtaja pogonskog točka trakastog transportera može se ostvariti preko tiristorskih grupa ili frekventnom regulacijom, što je svakako skuplji način. Svim parametrima automatike obično upravlja PLC mikroprocesor, koji može biti povezan sa računarom i uz korišćenje posebnog programa može se vršiti zadavanje parametara procesa i njihova kontrola.

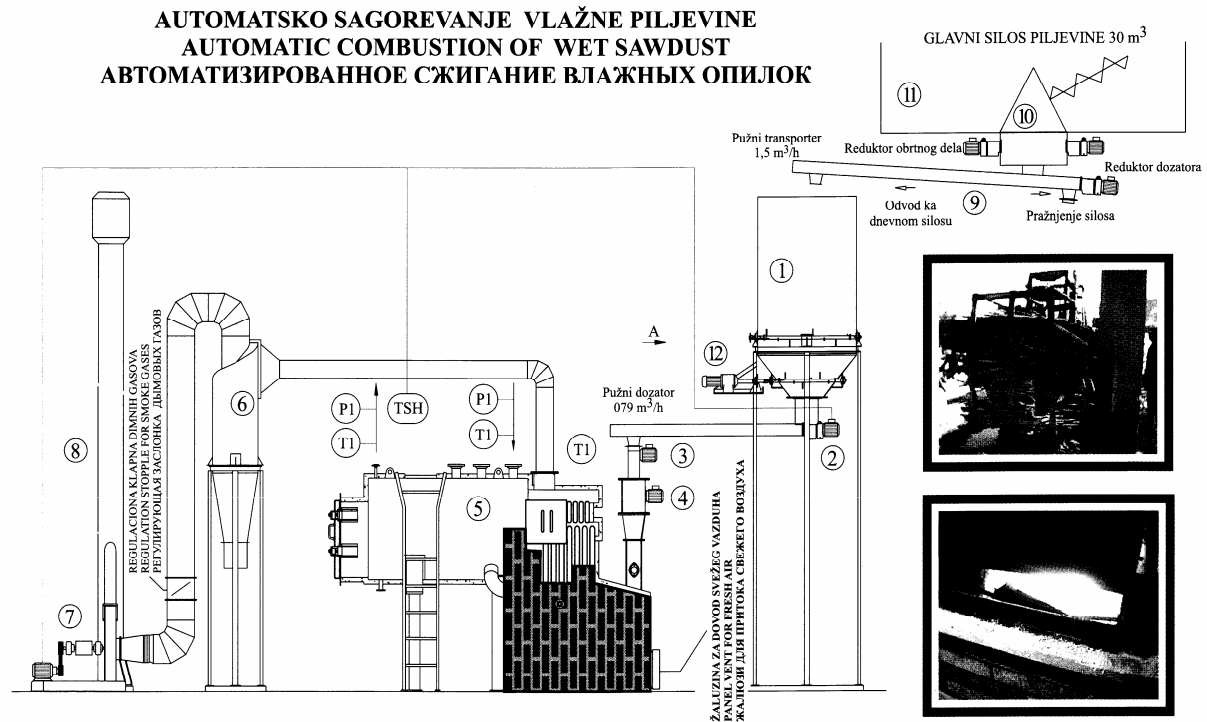


Slika 94: Tlocrt rasporeda: kotla, skladišta i briketarnice

Radi sve strožijih ekoloških zahteva u pogledu emisije gasova kao produkata sagorevanja u atmosferu, poželjno je da kotao poseduje sonde za regulaciju CO_x i NO_x u dozvoljenim granicama. Smanjenje koncentracije ovih gasova u atmosferi postiže se kontrolom temperature dimnih gasova i njihovom recirkulacijom npr. preko izmenjivača toplote: zagrejača vode i vazduha.

Za pravilan rad kotlovskog postrojenja od posebnog je značaja da se obezbedi agregat za pogon pumpi koje omogućavaju: cirkulaciju vode u kotlu preko dimnih cevi, dopremu vode do grejnih tela i povratak vode od grejnih tela do kotla. Ovaj agregat bi obezbedio da pumpe i dalje rade u slučaju nestanka struje, čime bi se izbegla havarija kotla jer bi temperature vode stalno rasla usled zagrevanja gorivom, kada pumpe ne bi radile.

Kad je vlažna piljevina u pitanju, čija je vlažnost u primarnoj preradi drveta često i iznad 70%, drugačija je doprema piljevine do ložišta kotla. Usled povišene vlažnosti a samim tim i veće težine piljevine njen transport do ložišta ne može biti putem ventilatora i vazduha kao u slučaju suve piljevine (vlažnosti ispod 15%) koja je karakteristična za pogone finalne prerade drveta. Zato se često koristi kombinacija mehaničkog i gravitacionog transporta. Šema jednog takvog postrojenja prikazana je na slici 95.



Slika 95: Vrelovodni kotao sa automatskim sagorevanjem vlažne piljevine

Sa slike se vidi da se piljevina iz glavnog skladišnog silosa (11) preko pužnog transportera (9) pri preporučenom protoku od 1,5 m³/h transportuje do dnevnog bunkera (1), odakle pri skoro duplo manjem protoku od 0,79 m³/h, i preko vibracionog natresača (4) odlazi u ložište kotla.

- Primeri zadatka

1. Parni kotao ima kapacitet od $D=6$ t/h , a stepen iskorišćenje 85 % . Radni pritisak pare je $p=30$ bar, a temperatura $t=400^{\circ}\text{C}$. Toplotna moć goriva $H_d=13\,000$ kJ/kg, a temperatura vode na ulazu u kotao 140°C .

Odrediti količinu toplote potrebnu za dobijanje 1 kg pare, moć isparavanja goriva, količinu goriva, za dobijanje 1 kg pare i potrošnju goriva. Gubitke pare u kotlu zanemariti

Rešenje:

Količina toplote za dobijanje 1 kg pare:

$$q = i - i_{ul} = 3230 - 586.6 = 2643.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

gde je:

$$p = 30 \text{ bar}, t = 400^{\circ}\text{C} \xrightarrow{i-s \text{ dij.}} i = 3230 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$i_{ul} = c \cdot t_{ul} = 4.19 \cdot 140 = 586.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Moć isparavanja goriva :

$$d = \frac{H_d \cdot \eta_k}{q} = \frac{13000 \cdot 0.85}{2643.4} = 4.18 \frac{\text{kg pare}}{\text{kg goriva}}$$

Količina goriva za dobijanje 1 kg pare :

$$g = \frac{1}{d} = \frac{1}{4.18} = 0.24 \frac{\text{kg goriva}}{\text{kg pare}}$$

Potrošnja goriva u kotlu :

$$G = \frac{D \cdot q}{H_d \cdot \eta_k} = D \cdot g = 6 \cdot 10^3 \cdot 0.24 = 1.44 \frac{\text{t}}{\text{h}}$$

2. Dimenzionisati parovod, ako je pritisak pare $p=8$ bar, temperatura $t = 210$ °C, brzina strujanja $w = 25$ m/s, a maseni protok $\dot{m} = 2.5$ kg/s. Koliki treba da je pritisak i temperatura SZP koja bi istom brzinom i pri istom protoku strujala tom cevi ?

Resenje:

$$p = 8 \text{ bar}, t = 210^\circ \text{C} \xrightarrow{\text{i-s dij.}} v = 0.27 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\dot{m} = \rho \cdot w \cdot A = \frac{1}{v} \cdot w \cdot \frac{d_u^2 \cdot \pi}{4}$$

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \dot{m} v}{\pi \cdot w}} = \sqrt{1.27 \frac{\dot{m} v}{w}} = \sqrt{1.27 \frac{2.5 \cdot 0.27}{25}} = 0.186 \text{m} = 186 \text{mm}; d_{u_s} = 200 \text{mm}$$

Prema tabeli 1. zadatka 2. iz Praktikuma (2) je debljina zida $\delta = 6$ mm pa je :

$$d_s = d_{u_s} + 2\delta = 200 + 2 \cdot 6 = 212 \text{mm}$$

Spec. zapremina SZP bice:

$$v'' = \frac{d_u^2 \pi \cdot w}{4 \dot{m}} = \frac{0.2^2 \cdot \pi \cdot 25}{4 \cdot 2.5} = 0.32 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\text{Za } v'' = 0.32 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \rightarrow t'' = 158^\circ \text{C}, p'' = 6 \text{bar}$$

III PNEUMATIKA

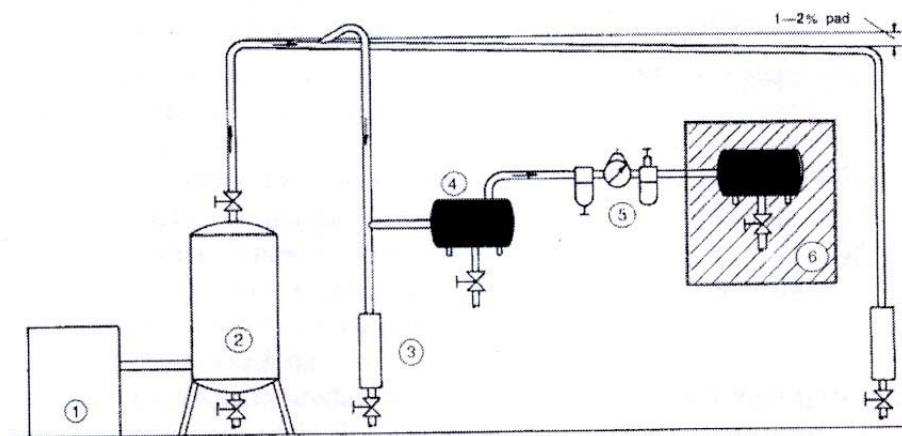
10.1 Uvod

Pneumatski uređaji i sistemi bili su poznati još krajem XIX veka. Tada su se još primenjivale: prese na pneumatski pogon, pneumatski sekači, pneumatski alati za grubo skidanje neravnina na otkovanim komadima i sl. Od tada pa do danas pneumatika se razvila kao samostalna disciplina koja se bavi proučavanjem procesa prenosa i obrade gasova pod pritiskom različitim od atmosferskog.

Prednosti pneumatskih uređaja su: mala masa, jednostavno održavanje, mogućnost finog regulisanja brzine kao i postupnog povećanja sile pritiska, neosetljivost na preopterećenje, mala opasnost od nesrećnog slučaja itd. Takođe, pneumatski uređaji su robusne i jednostavne konstrukcije. Ovo je omogućilo njihovu primenu u teškim uslovima rada, kao i tamo gde se od opreme zahteva velika pouzdanost u radu.

U preradi drveta pneumatski uređaji se koriste za: izvodjenje kretanja nosača alata kod alatnih mašina (bušilica, ručna brusilica i sl.), stezanje obratka na mašini (ljuštilica za furnir, putem vakuuma kod obradnih centara i sl.), raspršivanje boje i lakova, ostvarenje sile pritiska kod prese, pneumatski transport drvnog otpatka, transport i dizanje materijala i gotovih proizvoda, čišćenje radnog mesta, kontrolu kvaliteta itd. Radni fluid je isključivo atmosferski vazduh, a radni pritisci kreću od potpritiska 0,2Mpa, pa sve do natpritiska od 0,9MPa.

Proizvodnja, priprema i distribucija vazduha pod pritiskom kao strana koja snabdeva i *pneumatski izvršni organi* kao potrošači vazduha pod pritiskom čine jedinstven sistem (slika 96). Radi poboljšanja energetske efikasnosti nužan je sistematski prilaz i analiza obe strane – proizvodnje i potrošnje.

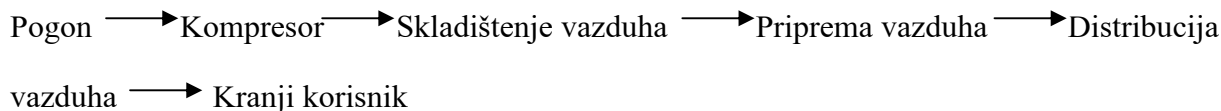


Slika 96: Principijelna šema proizvodnje, pripreme i distribucije vazduha pod pritiskom:
 1.kompresor, 2.rezervoar, 3.ispušni sud za kondenzat, 4.kompenzacioni sud, 5.priprema grupa,
 6.potrošač.

Osnovna komponenta pneumatske instalacije je kompresor (1) jer on proizvodi vazduh pod pritiskom. Vazduh se skladišti u rezervoaru (2), a zatim cevovodom transportuje do kompenzacionog suda (4). Cevovod je blago nagnut kako bi se kondenzat lakše prikupljao i ispuštao preko posude (3). Kompenzacioni sud (4) služi da nadomesti gubitke vazduha u sistemu ili eventualno ispusti višak vazduha, da bi se sistem uravnotežio i postigao stabilni

pritisak. Pripremna grupa (5) prečišćava i zauljava vazduh, i održava ga na potrebnom pritisku na kome radi potrošač (6). Potrošač obično u sebi poseduje upravljački deo koji vrši upravljanje i regulaciju rada izvršnog organa potrošača.

Lanac koji povezuje izvor električne energije i krajnjeg potrošača prikazan je na slici 97.



Slika 97: Procesni lanac za sisteme vazduha pod pritiskom

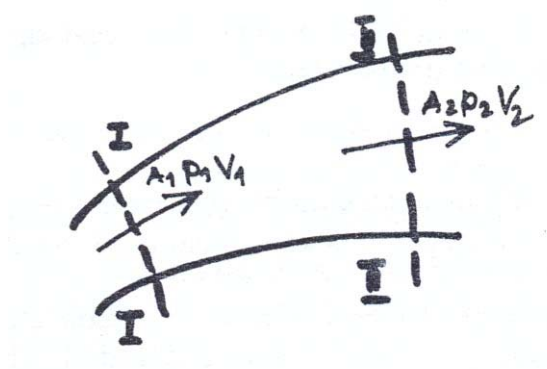
10.2 Osnovne veličine pri strujanju vazduha

Kod pneumatskih uređaja proces pretvaranja energije u mehanički rad ne obavlja se samo preko ekspanzije vazduha, već i preko strujanja komprimovanog vazduha. Strujanje vazduha pod pritiskom se koristi za prenošenje energije radi vršenja nekog rada. Vazduh struji iz oblasti višeg u oblast nižeg pritiska. Ako posmatramo kako vazduh struji između dva poprečna preseka (slika 98) neke zatvorene kontrolne zapremine, uočavamo da je količina vazduha koja protekne kroz oba preseka jednaka (jednačina kontinuiteta):

$$\dot{m}_I = \dot{m}_{II}$$

$$\rho_1 \cdot w_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot w_2 \cdot A_2$$

gde su: w_1 i w_2 srednje brzine strujanja vazduha u presecima I-I i II-II.



Slika 98: Strujanje vazduha u zatvorenoj kontrolnoj zapremini

Ako su pri tom i gustine vazduha u pomenutim presecima jednake, onda dolazimo i do jednakosti zapreminskim protoka (jednačina kontinuiteta za neštišljiv fluid).

$$\dot{V}_I = \dot{V}_{II}$$

U zavisnosti od brzine, strujanje može biti *laminarno ili turbulentno*. Kod laminarnog strujanja strujnice (putanje kretanja elementarnih delića vazduha) su paralelne, dok kod turbulentnog strujanja to nije slučaj. Laminarnom strujanju odgovaraju obično male brzine, a turbulentnom velike. Pri povećanju brzine laminarno strujanje prvo ulazi u tzv. prelazni režim

a onda postaje turbulentno. Kritična brzina pri kojoj dolazi do turbulencije određuje se iz izraza:

$$w_{kr} = Re \cdot \frac{\nu}{d}$$

gde su: Re (-) – Reynoldsov broj koji za strujanje u pravoj i glatkoj cevi može biti: 1) $Re < 2300$ - laminarno strujanje, 2) $2300 < Re < 10^4$ prelazni režim strujanja, 3) $Re > 10^4$ turbulentno strujanje;

ν (m²/s) – kinematička viskoznost koja predstavlja merilo unutrašnjeg trenja vazduha o zidove cevi.

Kako je ukupni pritisak u nekom preseku jednak zbiru statičkog i dinamičkog pritiska tj:

$$p_t = p + \rho \frac{w^2}{2},$$

onda bi razlika totalnih pritisaka u jednom i drugom preseku (sl. 98) tj. ukupni pad pritiska između dva preseka u cevovodu bio:

$$\Delta p_t = p_{t1} - p_{t2} = p_1 - p_2 + \frac{\rho}{2} \cdot (w_1^2 - w_2^2)$$

Strujanje vazduha kroz cev uglavnom ima karakter turbulentnog strujanja. Zato se u tehničkoj praksi ukupan pritisak između dva posmatrana preseka iskazuje zbirom pada pritiska usled trenja i lokalnih otpora tj.:

$$\Delta p_t = \sum \Delta p_{tr} + \sum \Delta p_l$$

Pad pritiska usled trenja pri strujanju vazduha kroz cev unutrašnjeg prečnika (d) i dužine (l) računa se kao:

$$\Delta p_{tr} = \rho \cdot \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{w^2}{2}$$

gde su:

λ (-) – koeficijent trenja vazduha o zidove cevi koji zavisi od hrapavosti cevi, odnosa l/d i Re broja

w (m/s) – srednja brzina strujanja

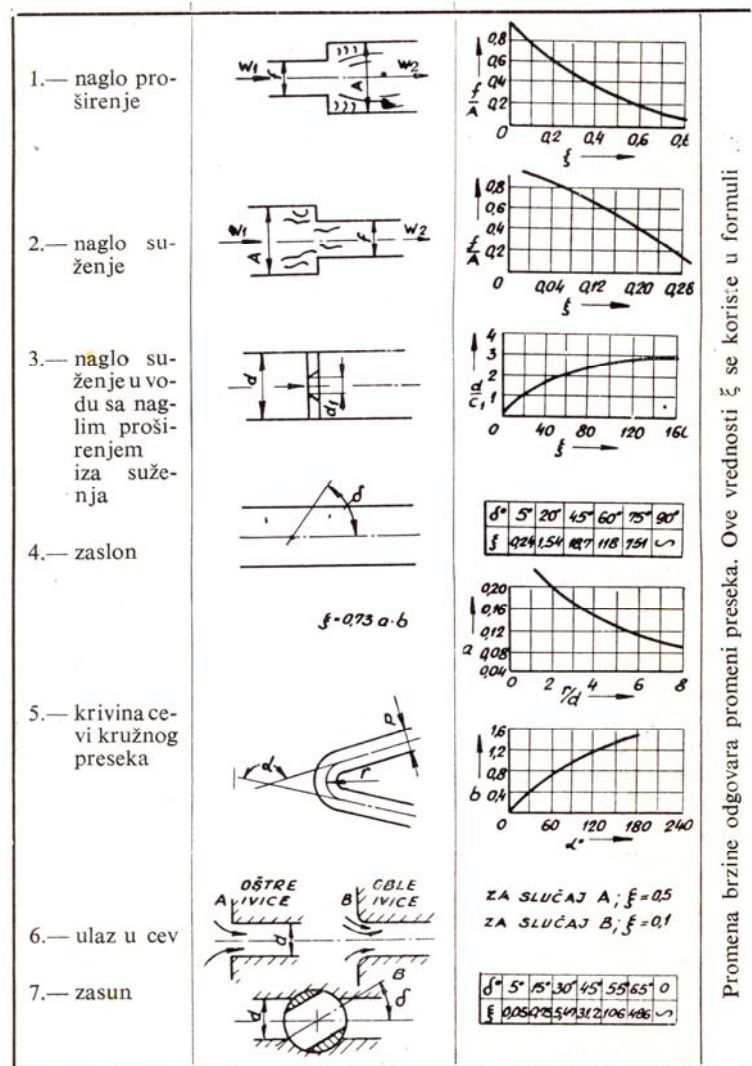
Pad pritiska usled lokalnog otpora (ventila, krivine, račve i sl.) pri strujanju vazduha kroz cev bio bi:

$$\Delta p_{tr} = \rho \cdot \xi \cdot \frac{w^2}{2} \tag{1}$$

gde je:

ξ (-) – koeficijent lokalnog otpora, čije su vrednosti date u tabeli 10.1.

Tabela 10.1: Koeficijent lokalnog otpora u zavisnosti od vrste otpora

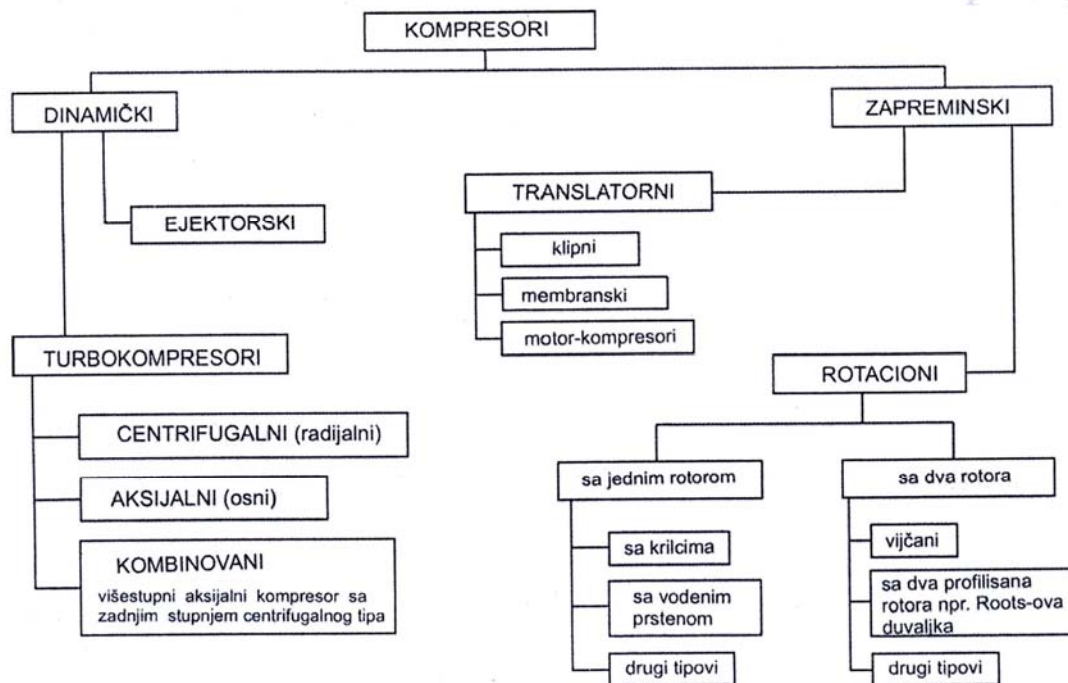


10.3 Kompresori

Kako je ranije već naglašeno, kompresor je najvažniji deo pneumatske instalacije. U njemu se vazduh sabija na pritisak znatno viši od atmosferskog. Prema konstrukciji i načinu predaje energije gasu tj. njene transformacije u pritisnu energiju kompresori se dele na: *zapreminske (volumetrijske) i dinamičke (sl. 99).*

Kod zapreminskih kompresora gas se sabija (raste mu pritisak) usled smanjenja zapremine radnog prostora. Zapremina radnog prostora se periodično povećava i smanjuje, pri čemu se vrši usisavanje, odnosno sabijanje gasa. Promena zapremine radnog prostora nastaje usled periodičnog (naizmeničnog) kretanja klipa ili membrane kod kompresora naizmeničnog dejstva, ili rotacionim kretanjem posebno oblikovanih rotora kod rotacionih kompresora. Prema protoku, ovi rotacioni su neprekidnog dejstva.

Kod dinamičkih kompresora, koji su prema protoku neprekidnog dejstva, povećanje energije gasnoj struji i transformacija u pritisnu energiju vrši se na dinamičkoj osnovi. U ovu grupu kompresora spadaju turbo kompresori i ejektorski kompresori.



Slika 99: Podela kompresora prema ISO 5390 standardu

U narednim poglavljima biće više reči samo o: klipnim, turbokompresorima, krilnim i vijčanim; jer se oni najviše sreću u domaćoj industriji prerade drveta.

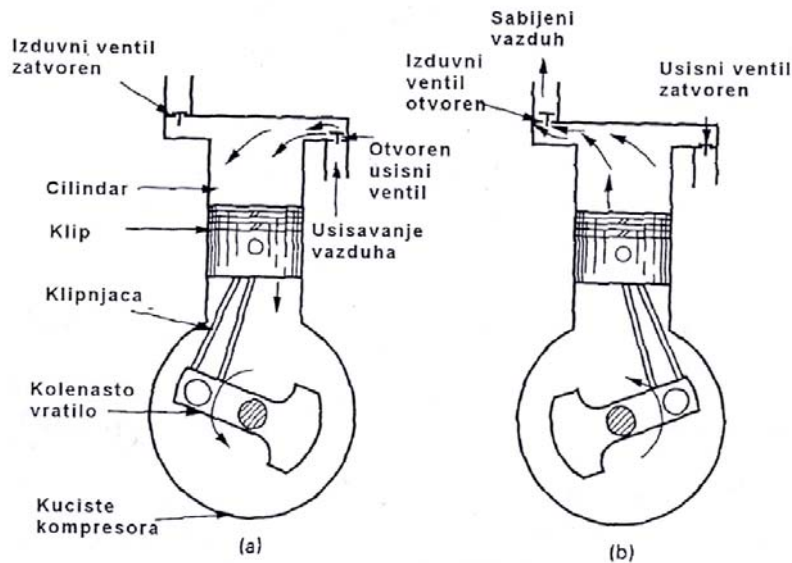
10.3.1 Klipni kompresori

Kod klipnih kompresora vazduh se sabija pod dejstvom klipa koji se kreće u cilindru. Postoji više vrsta klipnih kompresora i to:

- 1) Kompresori jednosmernog dejstva koji vrše usisavanje i sabijanje vazduha samo sa jedne strane klipa. Obično dosežu pritiske do 6bar.
- 2) Kompresori dvosmernog dejstva koji vrše usisavanje i sabijanje vazduha sa obe strane klipa. Imaju veći kapacitet od jednosmernih, obično su stacionarni i koriste se u sklopu centralne kompresorske stanice.
- 3) Višecilindrični kompresori koji mogu biti izradjeni u dve varijante. Prva je da se za isti kapacitet vazduha treba ostvariti viši pritisak, i tada su cilindri kompresora u rednoj vezi, odnosno reč je o višestepenom kompresoru. Druga varijanta je kada se za isti pritisak treba dobiti veća količina sabijenog vazduha, pa je reč o paralelnom vezivanju kompresora.

Poprečni presek kompresora jednosmernog dejstva prikazan je na slici 100. Radi se o dvotaktnom kompresoru kod koga se u prvom taktu vazduh usisava iz atmosfere, a u drugom sabija i potiskuje ka rezervoaru. Usisavanje počinje kretanjem klipa na niže (sl 100a). Zapremina u cilindru iznad klipa se povećava, a pritisak opada. Ovaj pad pritiska otvara usisni ventil i atmosferski vazduh ulazi u cilindar, pri čemu je izduvni ventil sve vreme zatvoren jer je pritisak u rezervoaru viši od onog u cilindru. Kada klip dodje do svog krajnjeg donjeg položaja (unutrašnja “mrtva” tačka), menja smer kretanja i kreće ka gore. Pri tome se usisni ventil zatvara i počinje takt sabijanja. Kada pritisak sabijenog vazduha u cilindru dostigne pritisak u potisnom (izlaznom) vodu, izduvni ventil se otvara i vazduh struji u rezervoar. Ovo potiskivanje sabijenog vazduha traje sve dok klip ne dostigne krajnji položaj (gornju ili spoljnu “mrtvu” tačku) u kome opet menja smer kretanja i kreće na dole. Time je

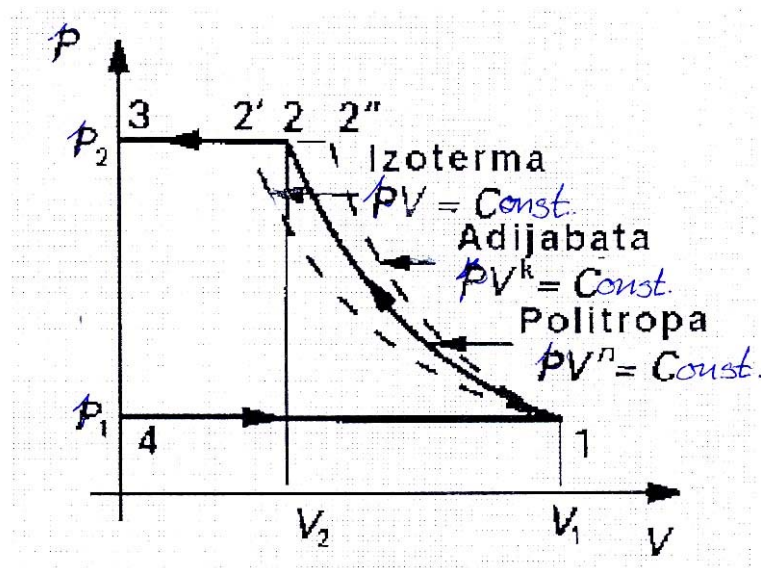
završen takt sabijanja i potiskivanja, i ponovo počinje usisavanje. Dakle reč je o kružnom ciklusu koji može biti predstavljen u p-V dijagramu.



Slika 100: Rad jednostepenog kompresora jednosmernog dejstva: a) usisavanje b) sabijanje i istiskivanje

Teorijski ciklus jednostepenog kompresora jednosmernog dejstva u p-V dijagramu dat je na slici 101. Ciklus se sastoji iz sledećih osnovnih procesa:

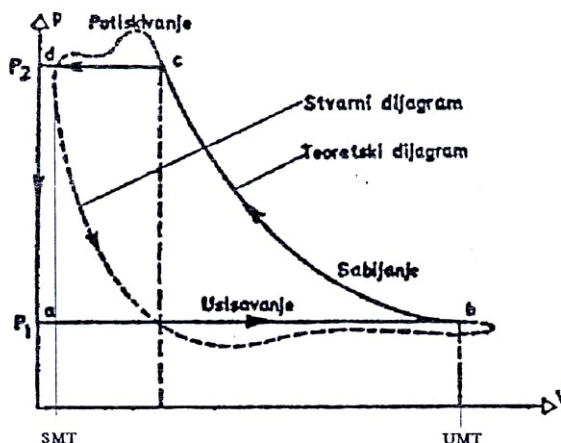
- 4-1 izobarsko usisavanje do zapremine V_1 atmosferskog vazduha
- 1-2 politropsko (najčešće izotersko ili adijabatsko) sabijanje vazduha od p_1 do p_2
- 2-3 sabijeni vazduh stanja 2 potiskuje se ka rezervoaru



Slika 101: Ciklus jednostepenog kompresora jednosmernog dejstva u p-V dijagramu

Usled sabijanja u delu 1-2 dolazi do povećanja temperature vazduha, pa je često neophodno i prinudno hladjenje. Ono može biti vazdušno (putem ventilatora) ili preko rashladne tečnosti (vode, antifrizu i sl.).

Na slici 102 dat je i teorijski i stvarni ciklus (isprekidanom linijom) u p-V dijagramu radi poredjenja. Količina usisanog vazduha ne odgovara teoretskoj vrednosti pre svega zbog: inercije ventila pri radu, vlažnosti vazduha (odstupa od osobina idealnog gasa), postojanja kompresione zapremine u glavi cilindra, pojave potpritiska u cilindru kod usisavanja, većeg pritiska od zadatog u momentu otvaranja izduvnog ventila, i sl.



Slika 102: Teorijski i stvarni ciklus rada kompresora u p-V dijagramu

Kapacitet kompresora jednosmernog dejstva zavisi od dimenzija cilindra i broja obrtaja kompresora:

$$\dot{V} = \lambda \cdot \frac{D^2 \pi}{4} \cdot s \cdot n \text{ (m}^3/\text{min)}$$

gde su: $\lambda(-)$ – koeficijent punjenja kompresora (0,7-0,88), $D(\text{m})$ – unutrašnji prečnik cilindra, $s(\text{m})$ – hod klipa, $n(\text{min}^{-1})$ br. obrtaja.

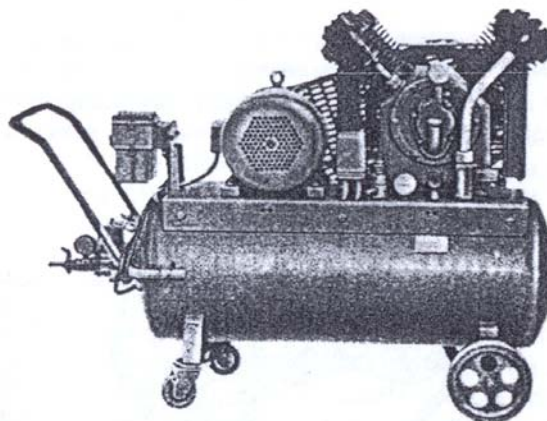
Za kompresor dvosmernog dejstva sa prečnikom klipnjače (d) kapacitet se računa kao:

$$\dot{V} = \lambda \cdot \frac{(2D^2 - d^2) \cdot \pi}{4} \cdot s \cdot n \approx 1,96 \cdot \lambda \cdot \frac{D^2 \pi}{4} \cdot s \cdot n \text{ (m}^3/\text{min)}$$

Takodje, moguće je odrediti i snagu potrebnu za pogon kompresora na osnovu približnog obrasca:

$$P_{EM} = 7,2 \cdot \dot{V} \text{ (kW)}$$

Izgled manjeg klipnog kompresora koji je pokretan zajedno sa rezervoarom prikazan je na slici 102'. Dosta često je prisutan u pogonima finalne prerade drveta, naročito pri uklanjanju sitnog drvnog otpatka nakon završetka rada na alatnoj mašini.



Slika 102': Spoljni izgled potpuno opremljenog kompresorskog agregata za vazduh

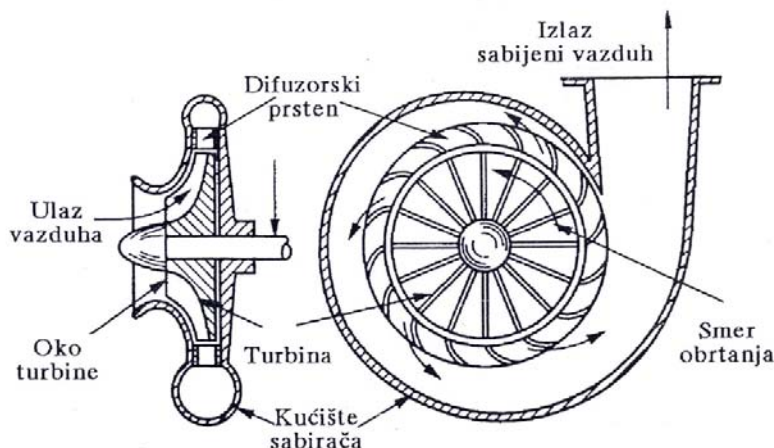
10.3.2 Rotacioni kompresori

Iz samog naziva se može zaključiti da je reč o kompresorima kod kojih se mehanička energija obrtnog kretanja “troši” na povećanje pritiska u potisnom vodu u odnosu na usisni.

Postoje dva osnovna tipa rotacionih kompresora:

- 1) radijalni (centrifugalni) kompresori
- 2) aksijalni kompresori

Izgled radijalnog ventilora prikazan je na slici 103. Sa slike se vidi da se sastoji iz obrtnog dela – rotora (turbine) koji se obrće u oblikovanom kućištu (statoru). Zbog velike brzine obrtanja nema razmene toplote sa okolinom tako da je sabijanje skoro adijabatsko.

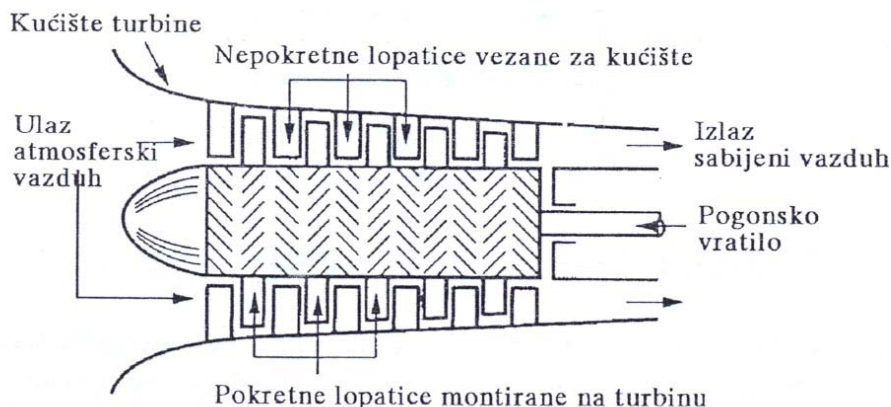


Slika 103: Prikaz radijalnog kompresora

Turbina predstavlja disk na kome su radijalno postavljene lopatice. Lopatice prilikom obrtanja potiskuju vazduh ka obodu u ćelije difuzora – sprovednog aparata (sl. 102), koji se obrće kada se i turbina obrće. Centrifugalne sile koje se tom prilikom javljaju potiskuju vazduh u ćelije difuzora, a njihovo mesto zauzima novi vazduh koji prolazi kroz turbinu. Sabijeni vazduh se skuplja u sabiraču i struji ka rezervoaru. Ose ulaznog i izlaznog otvora su

mimoilazne i zaklapaju ugao od najčešće 90° . Radi se o kompresorima velikog kapaciteta čiji se stepen sabijanja kreće između 4 i 6.

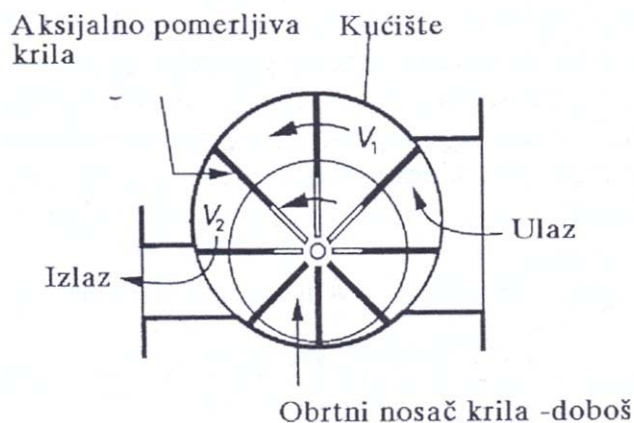
Aksijalni kompresor prikazan je na slici 104. Za razliku od radijalnih ovde su ose usisnog i potisnog otvora međusobno paralelne. Pokretne lopatice rotora vezane su za pogonsko vratilo, a nepokretne za kućište kompresora i naizmenično su postavljene jedne u odnosu na druge. Princip rada je sličan gasnim turbinama kod aviona. Vazduh struji aksijalno iz jednog u drugi stepen i u svakom se sabije za neku vrednost. Broj obrtaja turbine kreće se između 10000 i 30000 min^{-1} , a stepen sabijanja ide preko 10. Radi se o kompresorima velikog kapaciteta sa adijabatskim sabijanjem vazduha.



Slika 104: Šematski prikaz aksijalnog kompresora

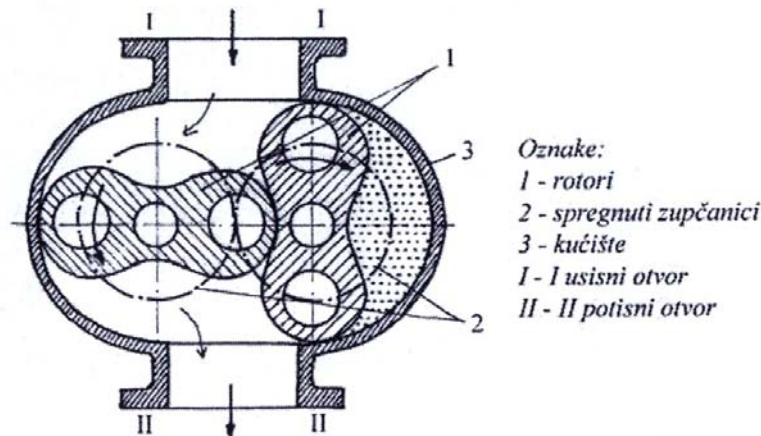
10.3.3 Krilni kompresori

Postoji više konstrukcionih rešenja krilnih kompresora. Jedno od njih je rešenje prikazano na slici 105. Rotor (doboš) koji se obrće je ekscentrično postavljen u odnosu na kućište, tako da se krilca koja se nalaze na njemu naizmenično izvlače i uvlače. Pri ovome zapremina vazduha ostaje zarobljena između dva krilca i kako se doboš obrće prema potisnom otvoru ta zapremina se smanjuje uz povećanje pritiska. Na ovaj način se stalno segmentno (od komore do komore) i to od ulaznog (usisnog) otvora gde se uvlači nova količina vazduha do izlaznog (potisnog) otvora sabija vazduh i potiskuje u njega.



Slika 105: Šematski prikaz krilnog kompresora

Još jedno tehničko rešenje krilnog kompresora predstavlja Rutsov kompresor (sl. 106). Za razliku od prethodnih kompresora, Rutsov kompresor se sastoji iz dva rotora, koji su u kontaktu. Oba rotora su istog profila, specifičnog oblika, a suprotnosmerno obrtanje rotora izazivaju dva spregnuta zupčanika nasadjena na rotore. Vazduh koji se sabija od usisnog ka potisnom otvoru biva zarobljen u zapremini V . Na izlaznoj (potisnoj) strani vazduh se meša sa već ranije sabijenim vazduhom i time se njegov protok povećava i do $4 \dot{V}$ po jednom obrtu, a stepen sabijanja iznosi oko 2.



Slika 106: Šematski prikaz Ruts-ovog kompresora

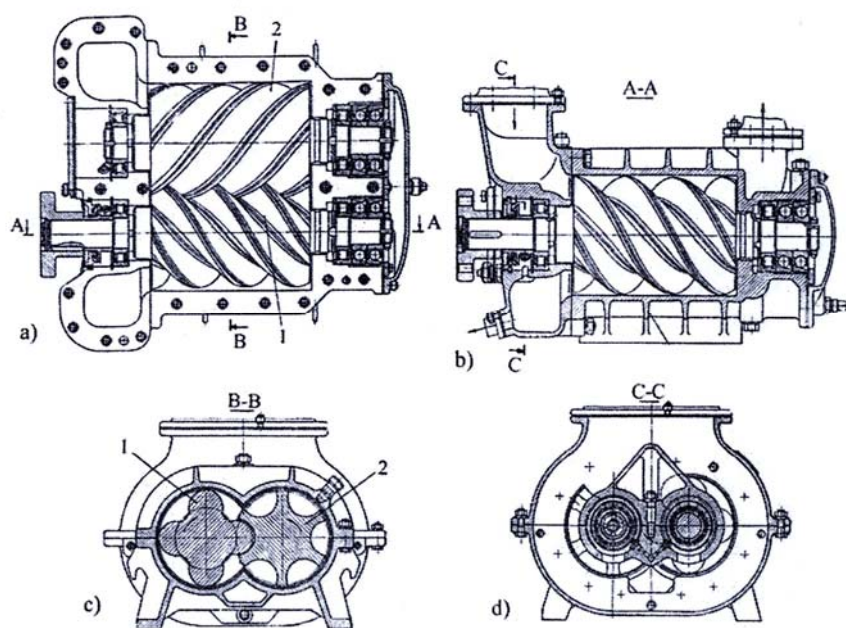
10.3.3 Vijčani kompresori

Vijčani kompresori spadaju u grupu zapreminskih rotacionih kompresora sa dva rotora (sl. 107). U poslednje vreme se sve više primenjuju u kompresorskim stanicama pogona za prerađu drveta.

Rotori su u obliku vijaka sa cilindričnim kosozubim zupčastim profilima specijalnog oblika. Jedan od rotora je pogonski i povezan je sa elektromotorom, a drugi je vodjeni (gonjeni). Da bi se izbeglo habanje rotora postoje konstrukcije vijčanih kompresora kod kojih se sinhrono obrtanje rotora ostvaruje preko dva spregnuta zupčanika nasadjena na rotore, kao kod Rutsovog kompresora. Na slici 107 dati su odgovarajući preseki jednog vijčanog kompresora sa vodećim i vodjenim rotorom, namenjenog za sabijanje vazduha.

Vazduh (gas) se potiskuje od usisne ka potisnoj komori vijčanog kompresora i usput sabija u rotirajućim zavojnim žljebovima, koje formiraju rotori i kućište kompresora. Prema protoku, ovi kompresori su neprekidnog (kontinualnog) dejstva.

Velika primenljivost ovih kompresora u poslednje vreme ogleda se pre svega u njihovoj dobroj karakteristici (tačno ostvarenom pritisku pri velikom stepenu iskorišćenja koji doseže i do 0,96), kao i visokom pouzdanošću u radu. U poredjenju sa klipnim i turbokompresorima, vijčani kompresori se odlikuju bešumnim radom i relativno malim gabaritima, što se svakako uslovljeno kapacitetom kompresora koji diktira sam potrošač.



Slika 107: Vijčani kompresor: 1-vodeći rotor, 2-vodjeni rotor
 a) horizontalni presek; b) presek po vodećem rotoru (A-A); c) poprečni presek preko rotora;
 d) poprečni presek preko usisne komore

10.4 Rezervoar za vazduh

Rezervoar za vazduh ima više namena kada se postavlja iza kompresora, a ispred razvodne mreže. Nije prvenstveni zadatak rezervoara da umiri pulzirajuću struju klipnog kompresora, jer bi za to bila dovoljna samo 10-50 struka zapremine cilindra poslednjeg stupnja. Mnogo veći zadatak sastoji se u tome da reguliše rad kompresora prema potrošnji vazduha. U rezervoaru se izdvaja kondenzovana voda iz vazduha i kapljice ulja od kompresora. Zbog toga se obično rezervoari postavljaju 10-15 m od kompresora na severnoj strani kompresorske stanice.

Veličina rezervoara zavisi pored ostalog i od načina rada kompresora. Ako kompresor ima automat za isključivanje pogonskog elektromotora, broj isključivanja i isključivanja može biti maksimalno 15 puta na čas za razliku pritiska od 1 bar. U tom slučaju zapremina rezervoara se određuje po sledećem obrascu:

$$V = 0.9 \cdot \dot{V} \quad (\text{m}^3)$$

gde je: V zapremina rezervoara u (m^3), a $\dot{V}$ kapacitet kompresora u (m^3/min) usisanog vazduha.

Ako regulator rada kompresora, kada je dostignut dovoljan pritisak, na isključuje pogonski motor, već omogućuje rad kompresora na prazno, bez opterećanja, onda broj uključivanja na čas ide do 100, a zapremina rezervoara u tok slučaju može biti kontrolisana prema obrascu:

$$V = 0.4 \cdot Q \quad (\text{m}^3)$$

Ako više kompresora rade u kompresorskoj stanici, veličina zapremine rezervoara se određuje prema najvećem kompresoru, dok se ostali uključuju u rad prema potrošnji vazduha.

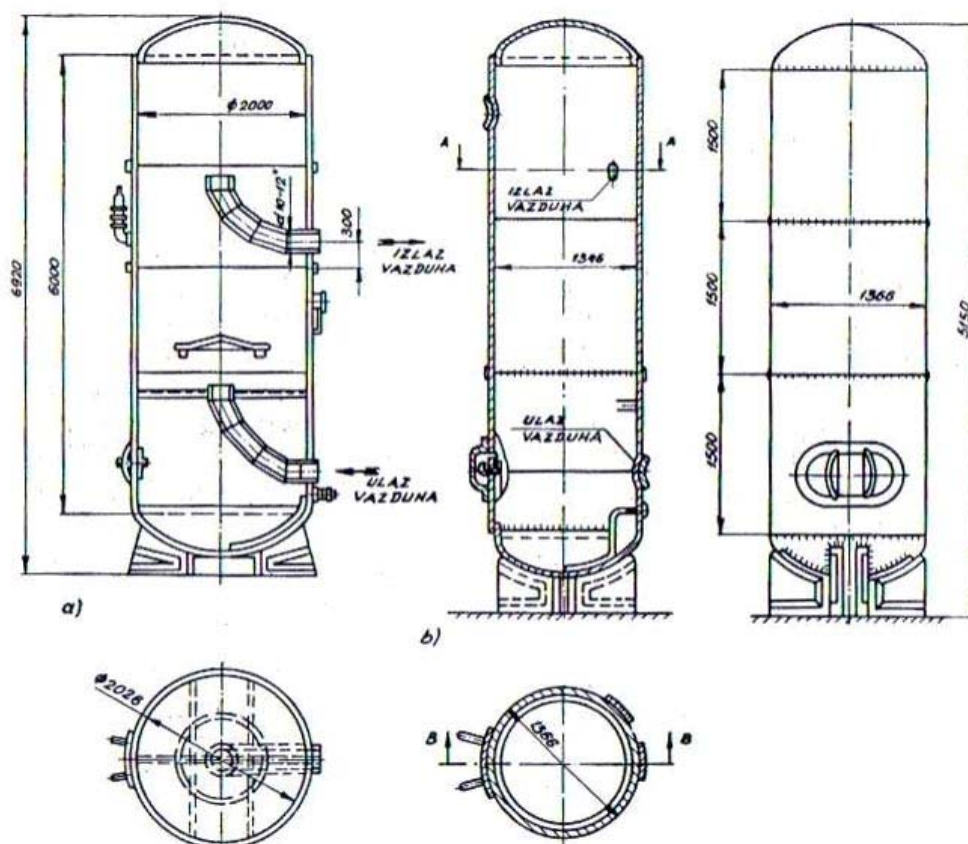
Rezervoari se izrađuju u vidu cilindričnih sudova (sl.107.) koji se postavljaju horizontalno ili vertikalno na temelje. Kao sudovi pod pritiskom podležu propisima državne kontrole i tek posle izdatog atesta mogu se pustiti u pogon. Konstrukcija rezervoara je dužna da obezbedi niz uslova.

Pre svega rezervoar mora biti tako postavljen da je sa svih strana pristupačan radi kontrole unutra i spolja, rešenja i čišćenja.

Radi boljeg odvajanja kapljica ulja i vlage na vertikalno postavljen rezervoar ulaz vazduha je oko sredine, a odvod pri vrhu rezervoara. U unutrašnjosti rezervoara postavlja se pregrada ili odbojnik da bi ulazni vazduh pravio što oštrije skretanje kako bi odvajanje kapljica ulja i vlage bilo što bolje.

Svaki rezervoar mora imati:

- a) priključene otvore za dovod i odvod vazduha
- b) priključeni otvor za vezu sa regulatorom
- c) ventil sigurnosti
- d) manometar
- e) slavinu za ispuštanje vode i ulja
- f) otvor za ulaz radi čišćenja unutrašnjosti rezervoara
- g) ventil za isključenje rezervoara od mreže



Slika 107: Izgled vertikalnog rezervoara za vazduh

Osim toga preporučuje se da ima još po jedan ili dva otvora za naknadno uključivanje razvodne mreže i mesta za postavljanje termometra. Ventil sigurnosti na rezervoaru se reguliše na najveći radni pritisak uz 10% povećanja. Debljina zida rezervoara se izračunava prema prečniku i maksimalno dozvoljenom pritisku.

10.5 Cevovod i armatura

Radi međusobnog povezivanja pneumatskih elemenata, koriste se čelične ili bakarne cevi, zatim creva i u poslednje vreme plastične cevi. Kada se povezuju pokretni delovi sa nepokretnim onda se moraju upotrebljavati creva. Za vazduh i naročito kod malih prečnika koriste se bakarne cevi koje se lako savijaju. Kada pneumatski uređaj nije izložen velikim razlikama temperature a pneumatske komponente se smeštaju u relativno mali prostor koriste se cevi od plastične mase.

Čelične cevi se najčešće koriste u pneumatskim instalacijama. Pored toga koriste se bakarne bešavne vučene cevi od materijala prema standardu SRPS C.D5.50. Spoljni i unutrašnji prečnici čeličnih i bakarnih cevi nalaze se u tabeli 10.2.

Tabela 10.2: Spoljni i unutrašnji prečnici čeličnih i bakarnih cevi

Spoljni prečnik (mm)	6	8	10	12	15	18	22
Unutrašnji prečnik (mm)	4	6	8	10	12	15	19

Cevi predviđene ovoj tabeli koriste se za radne pritiske do 6bar. Temperatura fluida ili okoline može biti 70°C.

Gumena creva koja se koriste u pneumatskim instalacijama primenjuju se za pritiske do 6bar i temperature od -30 do +80°C. Cevi od plastične mase primenjuju se za pritiske od 6bar (max pritisak 10bar) i temperature od -10 do +60°C.

Dimenzije gumenih creva su date u tabeli 2.

Tabela 10.3: Dimenzije gumenih creva

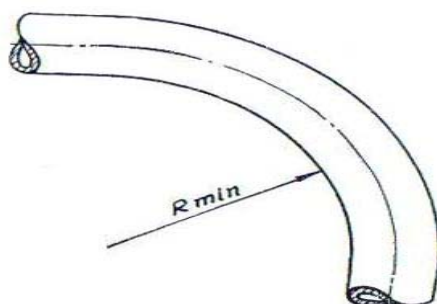
Nazivni prečnik (mm)	4	6	8	10	12	16	20
Unutrašnji i spoljašni prečnik (mm)	4,5x8,5	6x10	8x14	10x16	13x24	16x24	20x28

Plastične savitljive cevi se izrađuju od plastičnih masa tako da zadovoljavaju odgovarajuća mehanička, termička i hemijska svojstva. Koriste se uglavnom tamo gde nema velike razlike u temperaturama i gde je prostor za smeštaj instalacije ograničen. Dimenzije plastičnih cevi date su u tabeli 10.4.

Tabela 10.4: Dimenzije plastičnih cevi

Unutrašnji nazivni prečnik cevi (mm)	4	6	8	10	12	15	20
Spoljni prečnik cevi (mm)	6	8	11	13	16	19	24
Debljina zida cevi (mm)	1	1	1,5	1,5	2	2	2
Poluprečnik savijanja (R_{min}) (mm)	30	40	50	70	90	110	150

Kod upotrebe gumenih i plastičnih cevi, treba obratiti pažnju na hemijske osobine materijala naročito kada se za pneumatske instalacije u procesnoj ili hemijskoj industriji. Tabela sadrži i minimalni prečnik savijanja (slika 108).

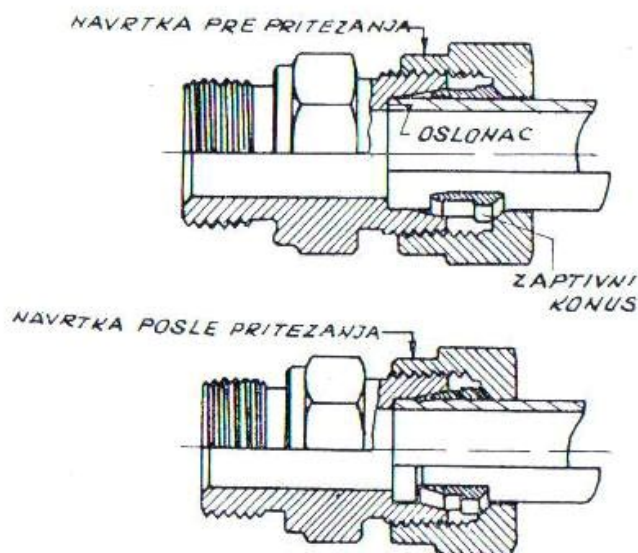


Slika 108: Minimalni prečnik savijanja

10.5.1 Priključci za cevi

Veza cevovoda i pneumatskog elementa se ostvaruje priključcima. Oni mogu biti različitog konstruktivnog rešenja. Danas se najčešće primenjuju priključci izrađeni po sistemu Ermeto.

Na slici 109 se vidi jedan priključak sa navrtnom i krajem cevi. Gornja slika pokazuje moment pre početka pritezanja navrtke a donja kada je navrtka dobro pritegnuta. Na ravno presečenu cev bez obrade navuče se prvo navrtka pa zaptivni konus.



Slika 109: Vezivanje pomoću Ermeto priključaka

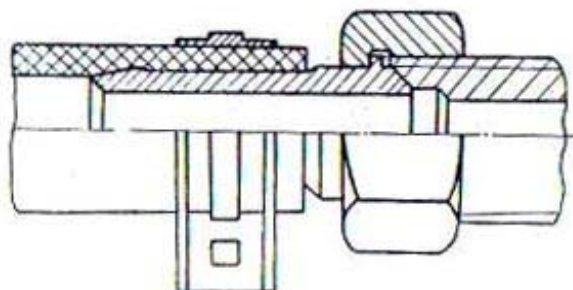
Zaptivni konus se navuče tako da kraj cevi viri oko 0,5cm. Zatim se kraj cevi potisne preko konusa priključka do oslonca. Navijanjem navrtke zap.konus klizi prvo do konusne površine, a zatim daljim potiskivanjem zaptivnog konusa, konusna površina priključaka usmerava

oštru unutrašnju ivicu zaptivnog konusa ka cevi. Dobrim zatezanjem navrtke, ivica zaptivnog konusa se ukopa u spoljnu površinu cevi što ustvari i obezbeđuje zaptivanje. Tako ostvarena veza ima prednosti i u tome što se bez posebnog alata može izvesti. Za slučaj potrebe lako se može postaviti cev od priključka upotrebom samo ključa.

10.5.2 Priključci za gumena creva

Kada treba spojiti pokretne delove mašina sa nepokretnim, gumena creva uspešno zamenjuju bilo koja druga rešenja a da pri tome zaptivanje potpuno zadovoljava. Proizvođači u svom programu imaju gumena creva sa priključcima standardnih dužina.

Na slici 110 je prikazan priključak sa crevom.

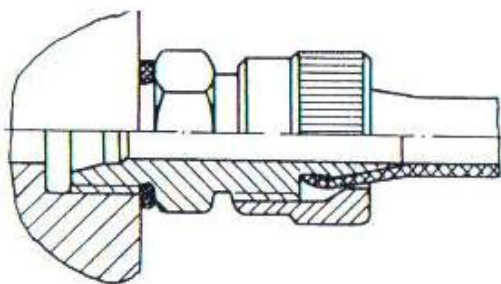


Slika 110: Priključak za crevo sa kupastim završetkom

Na priključak za crevo sa kupastim završetkom navučene se gumeno crevo i pričvrsti čeličnom obujmicom. Pomoću navrtke pričvrsti se priključak za drugi standardni priključak. Pritezanjem navrtke do kraja, konus priključaka čvrsto prilegne uz unutrašnji konus drugog priključka i tako obezbedi zaptivanje. Kod ovakve veze crevo sa priključkom stoji nepomično kako pri spajanju tako i pri razdvajanju. Odvajanje se obavlja jednostavno odvrtanjem navrtke.

10.5.3 Priključci za plastične cevi

Za primenu cevi od plastične mase koriste se priključci čiji navoji i oblik odgovaraju ostalim standardnim priključcima.

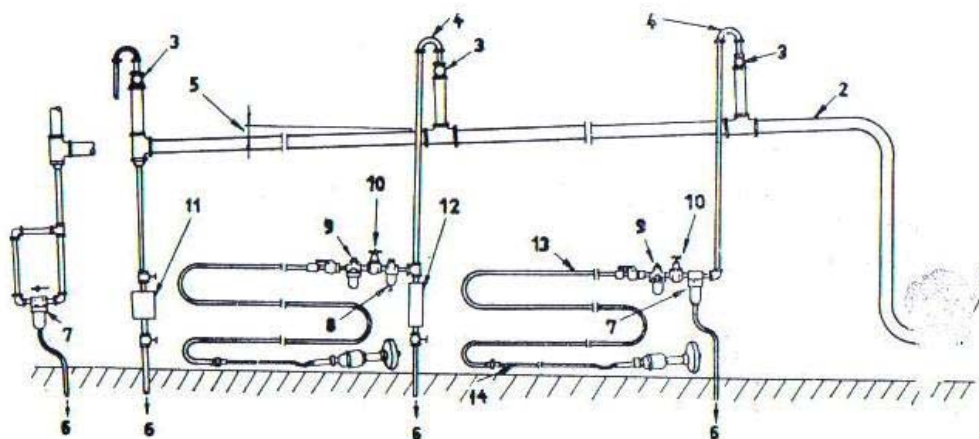


Slika 111: Priključak za plastično crevo

Na slici 111. je prikazano rešenje kada je priključak uvrnut u telo. Na drugom kraju priključka se nastavlja plastična cev. Kraj plastične cevi se navuče na konusni završetak priključka. Zatim se već navučena navrtka na cev pomeri do početka navoja priključka. Ručnim navrtanjem navrtke prilazi konus navrtke uz konus priključka, a zid cevi između njih se priteže. Samo ručnim pritezanjem navrtke dovoljno je da se ostvari uspešna veza.

10.6 Prečišćavanje vazduha

Vazduh pod pritiskom koji dolazi iz kompresorske stanice sadrži u sebi uljme i vodene pare. da bi se komprimirani vazduh mogao koristiti u pneumatskim uređajima treba da bude očišćen od svih stranoh sastojaka. Nečistoća ili prisustvo uljnih para i kapljica vode štetno deluje na pneumatske uređaje, a u nekim slučajevima ne mogu ni ispravno funkcionisati. Zbog toga je potrebno već kod projektovanja razvodne mreže komprimiranog vazduha instalaciju izvesti tako da do potrošača dospe očišćeni vazduh. Na sli.31 je prikazana mreža razvoda vazduha sa karakterističnim elementima.



Slika 112: Mreža razvoda komprimovanog vazduha sa karakterističnim elementima

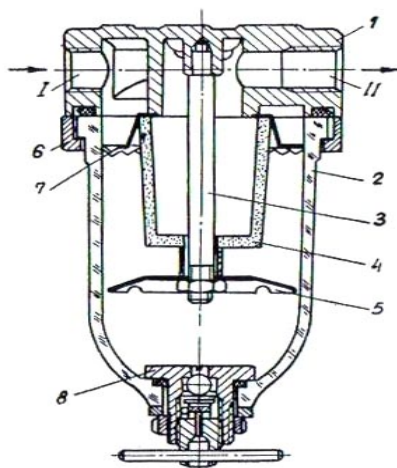
Na početku (1) glavnog voda (2) dolazi vazduh pod pritiskom od rezervoara kompresorske stanice. Glavni vod se postavlja pod nagibom ($1/2^\circ$) radi slivanja kondezovane vode, kako je to već objašnjeno u uvodnom poglavlju (sl. 96). Nagib se izvodi u smeru strujanja vazduha. Odvodna cev do potrošača se postavlja sa gornje strane glavnog voda. Pre luka (4) predviđa se mesto (3) za priključak nekog drugog potrošača. Radi odvajanja kondenzata, postavljaju se odvajači sa ručnim ispuštanjem vode (11, 12) i automatskim pražnjenjem (7). Pored odvajača vode postavlja se prečistač, regulator pritiska i zauljivač. Od slavine za vazduh pa nadalje produžava se cevni vod (13) da bi na kraju preko savitljivog creva bio priključen potrošač. Kako se može videti iz ove principijelne šeme razvodne mreže, izdvajanja nepoželjnih sastojaka iz vazduha počinje već kod projektovanja razvoda vazduha.

10.6.1 Prečistač

Udaljavanjem vazdušnog voda od glavnog voda dolazi do hlađenja vazduha pa zbog toga i stvaranja vodenih kapljica. Da bi do potrošača došao vazduh oslobođen kondenzata, postavlja se prečistač.

Na slici 113. je prikazano jedno od konstruktivnih rešenja prečistača tj. odvajanje kapljica vode i ulja i mehaničkih nečistoća. Ulaz vazduha dolazi kroz otvor I. Zatim struja vazduha prolazi preko rešetke koja usmerava vazduh na niže. Posle toga vazduh ponovo skreće ka metalno-keramičkom cilindru 4. Praveći luk, kapljice vode i ulja zbog centrifugalne sile padaju na času 2 i slivaju se ka dnu. One kapi koje padaju na zaštitnik 5 takođe klizaju na dno časice. Mehanička nečistoća se zadržava na spoljnim zidovima metalno-keramičkog cilindra. Ispuštanje kondenzata se vrši preko ventila 8. Zajedno sa kondenzatom, spiraju se i mehaničke čestice. Kod izvesnih konstruktivnih rešenja čišćenje prečistača se izvodi automatski kada kondenzat dostigne određeni nivo.

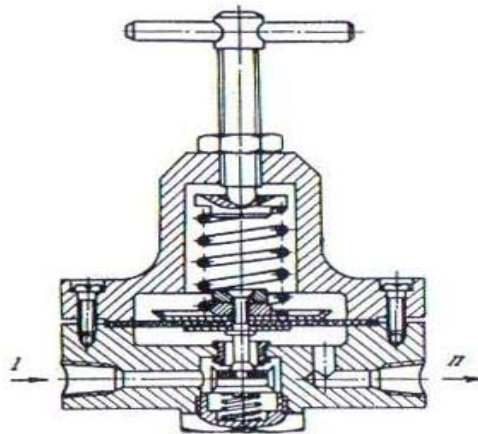
Na taj način vazduh dalje odlazi kroz otvor II prečišćen i relativno osušen. Postoje i druga konstruktivna rešenja prečistača zavisno od toga do kog stepena je potrebno prečistiti tj. osušiti vazduh.



Slika 113: Prečistač vazduha

10.6.2 Regulator pritiska

Vazduh iz rezervoara kompresorske stanice dolazi sa pritiskom oko 7bar ili više. Zavisno od opterećenja razvodne mreže, pritisak vazduha u mreži može da varira što može da bude smetnja ispravnom radu pneumatskih uređaja. Zbog toga se ispred instalacije postavlja regulator pritiska sa manometrom. Regulator pritiska na slici 114 održava konstantan pritisak u instalaciji bez obzira na oscilacije pritiska iznad regulisanog. Vazduh pod pritiskom dolazi kroz priključak I i dospeva ispod membrane. tako se stvori sila koja diže membranu. Sa suprotne strane nalazi se opruga čija se seila može podešavati uvijanjem ili odvijanjem vretena. Za jedno konstruktivno rešenje sve veličine su konstantne, sem pritiska. Vazduh iz komore ispod membrane produžava ka potrošaču. Jednoga momenta pritisak vazduha ispod membrane daveće jednu silu koja će se uravnotežavati sa silom opruge iznad membrane. Kada pritisak vazduha iza regulatora počinje da raste opruga se sabija pa se postepeno zatvara dalje priticanje vazduha u regulator. Kada zbog potrošnje, pritisak vazduha iz regulatora počinje da opada, opruga potiskuje membranu na niže i ventil se otvara. Otvaranjem ventila ponovo dočazi vazduh pod pritiskom u regulator. Na taj način se održava uvek jednak pritisak u vodi iza regulatora. U kojim granicama se pritisak održava zavisi od konstruktivnog izvođenja samog regulatora.



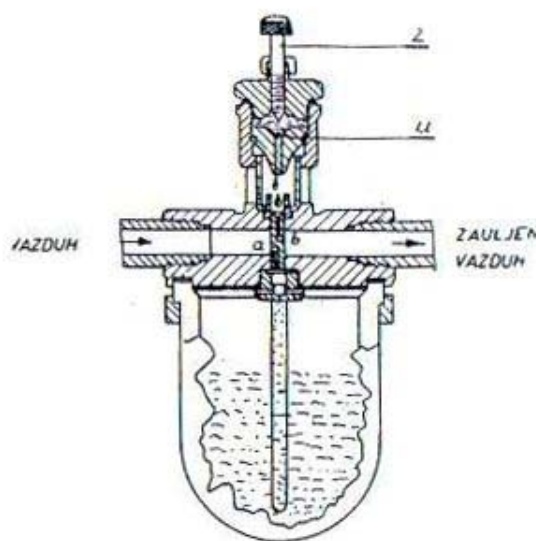
Slika 114: Regulator pritiska

10.6.3 Zauljivač

Oslobođen vodenih i uljnih kapi kao i mehaničkih nečistoća, vazduh pod pritiskom posle regulatora pritiska prolazi kroz zauljivač da noseći finu maglu ulja u kontrolisanim količinama dođe do pokretnih delova pneumatskih komponenata. Radi pravilnog rada pneumatskih komponenata podmazivanje svežom uljnom maglom nošenom vazduhom postaje neophodno. Međutim, iako takav vazduh koriste najveći broj instalacija ima slučajeva gde se zauljivač izostavlja ((vazduh za farbarske pištolje, veoma precizni merni instrumenti i dr.). Zauljivač ne sme da stvara veliki otpor kretanju vazduha a treba da ga obogati finom uljnom maglom. To se može postići samim konstruktivnim rešenjem (slika 115).

Vazduh ulazi sa strane označene strelicom (strelica je označena na telu zauljivača). Vazduh koji struji, dolazi u časicu sa uljem. Time stvara pritisak na površinu ulja.

Zbog pritiska, ulje se kroz vertikalnu cevčicu penje do prostora "u", odakle kapanjem silazi kroz kanal "b" na struju vazduha. Pri izlazu iz kanala "b", kapljica se rasprašuje u finu maglu. Na taj način na izlazu vazduha iz zauljivača, struji zauljeni vazduh koji će na svom putu podmazivati taruće površine pokretnih delova pneumatskih komponenata, uređaja. Koliko će kapi ulja dospeti u kanal "b" zavisi od toga koliki će se ostaviti otvor za prolaz posle podešavanja zavrtnja "z". Koju vrstu ulja treba sipati u zauljivač uslovljenio je materijalom koji dolazi u dodir sa vazduhom. Što se tiče viskoznosti preporučljivo je da to bude ređe ulje. Konstruktivna izvođenja zauljivača mogu biti različita ma da namena i funkcija ostaju isti.



Slika 116: Zauljivač

10.6.4 Suvi i prečišćeni vazduh

Nekada se postavlja zahtev da se vazduh pored odstranjivanja mehaničkih nečistoća i "potpuno osuši". Kvalitet bojenja sa pneumatskim pištoljima ne bi bio zadovoljavajući ako bi vazduh, koji se kod farbanja koristi, sadržavao vlagu i ulje kapljice. Hlađenje vazduha ispod temperature radne atmosfere u kojoj se nalaze pneumatski uređaji obezbeđuje, dolaskom u prostor više temperature, stvaranje pregrejane pare u vazduhu koji prolazi kroz pneumatske komponente.

Za sušenje vazduha postoje specijalni uređaji koji se u ovakvim slučajevima koriste. Postoji mehanički odvajač (filter) koji sa jednim finim sitom zadržava kapljice tečnosti koja se izdvaja iz magle. Zavisno od finoće sita zadržava se manje ili više kapljica. Tako ima filtera koji mogu i "potpuno da osuše vazduh".

10.6.5 Filter sa aktivnim ugljem

U slučajevima gde je potrebno što efikasnije izdvojiti kondenzovanu vodu i ulje iz vazduha pod pritiskom postavljajući sredstvo za sušenje kao uložak u filter. Za adsorpciju pare

primenjuje se aktivni ugalj. Dejstvo aktivnog uglja se meri dužinom vremena za koje ugalj može da vrši adsorpciju ulja iz vazduha. Umesto uglja to može biti aktivni koks ili sito koje se pojavljuje kao mehanički filter. Posle zasićenja aktivnog uglja, treba punjenje zameniti. Tokom vremena iskustvo je pokazalo da aktivni ugalj adsorbuje uljne pare, dok se uljna magla i kapljice mogu uspešno mehaničkim filtrom odstraniti.

10.6.6 Gel-filter (adsorber)

Za adsorpciju vodene pare primenjuje se "Gel"-tj. sredstva za sušenje vazduha, a prodaju se pod raznim imenima. Svi oni imaju jedno zajedničko: adsorbiranje vodene pare iz vazduha ili gasa vrši se preko kapilarnosti sredstava za sušenje. Step en sušenja odgovara tački rošenja od -55° do -60°C . Podaci o sposobnosti Gel-a daju se od proizvođačkih firmi tabelarno ili dijagramski u zavisnosti od relativne vlažnosti vazduha. Kod adsorpcije vodene pare na Gel-u se osloboda toplota. Ako se stvorena toplota ne odvodi, temperatura adsorbera raste, pa se sposobnost adsorpcije smanjuje. Vazduh visokog pritiska ima dovoljan toplotni kapacitet, pa je i sposobnost adsorpcije Gel-a visoka. U adsorberu se postiže porast temperature za Δt . Sušenje je povoljnije pri visokom pritisku vazduha. Na usisanoj strani može porast temperature Δt pri nepovoljnoj temperaturi usisnog vazduha da učini adsorber nesposobnim, jer temperatura adsorbera dostiže 100°C i više. U takvim slučajevima mora se ili adsorber ili vazduh ispred adsorbera hladiti.

Kada punjenje adsorbera dođe do zasićenja, treba vršiti regenerizaciju. Tačka zasićena se određuje indikatorom. Plavi indikator pri zasićenju postaje crven. Kroz stakleni otvor gel-aparata može se posmatrati promena boje indikatora pa prema tome utvrditi potrebu regenerisanja uloška u aparatu. Regeneracija se izvodi toplim vazduhom temperature $150-180^{\circ}\text{C}$. Vazduh za regenerizaciju se dobija od ventilatora sa dovoljnim statičkim pritiskom. Ako se vazduh za regenerisanje uzima iz mreže, onda mora biti odmašćen. Vazduh za regenerisanje struji kroz aparat odozgo na niže. Adsorbovana voda isparava i sa toplim vazduhom izlazi napolje. Regeneracija je završena kada temperatura na izlazu dostigne vrednost oko 100°C , tj. kada indikator postane ponovo plave boje. Zagrevanje vazduha za regeneraciju vrši se u razmenjivaču toplote pomoću pare ili električne struje. Vreme regenerisanja se podešava prema pogonu na osnovu uputstva proizvođača. Kontinualni pogon koristi dva adsorbera pri čemu dok jedan radi, drugi se regeneriše. Uključivanje jednog ili drugog adsorbera može da se izvodi ručno ili automatski električno ili pneumatski. Izbor prebacivanja, ne režim rada ili regenerisanje je pitanje cene. Automatsko prebacivanje zahteva poseban uređaj. Ručno prebacivanje je rentabilnije u primeni iako operacija traje nekoliko minuta. Ako bi ova pauza činila smetnje, onda se primenjuje automatsko prebacivanje. Sa tačno određenim adsorberom postiže se sušenje čija je tačka rošenja -55 do -60°C .

Jedno punjenje Gel-a iam dugi vek trajanja, oko 5 godina i više, uz napomenu da se ne zaprlja tokom rada od ulja.

U slučajevima kada vazduh pod pritiskom dolazi sa uljem iz kompresora, treba prvo propustiti struju vazduha kroz filter sa aktivnim ugljem da bi kroz punjenje Gel-a prolazio vazduh praktično bez ulja.

Izbor odvajачa ili vrste filtera zavisi od uslova koje postavljaju pneumatski radni ili regulacioni organi s obzirom na step en suvoće vazduha i to:

- a) Odvajač sa grubim odvajanjem jednostavne konstrukcije
- b) Fino odvajanje kroz fini filter posebne konstrukcije
- c) Izdvajač uljnih kapljica sa umetkom filtera sa aktivnim ugljem

d) Odvajač ulja i vod epreko filtera sa aktivnim ugljem i umetkom u Gel-aparatu

Veličina filtera se određuje prema protoku, a konstrukcija i tip prema zahtevima u odnosu na stepen suvoće vazduha.

10.7 Razvodnici

Razvodnici su pneumatske komponente za upravljanje izvršnim organima(cilindrima). Da bi se u pneumatskom cilindru dobila sila na klipnjači, vazduh pod pritiskom prolazi kroz razvodnik. Cilindri koji se koriste u pneumatskim instalacijama mogu biti jednosmernog i dvosmernog dejstva. U prvom slučaju povratni hod klipa u cilindru vrši se pomoću opruga,a u drugom slučaju oba hoda (radni i povratni) se ostvaruju dejstvom komprimiranog vazduha. U razvodniku se vazduh usmerava ka cilindru ili se cilindar preko razvodnika povezuje sa atmosferom. Razvodnikom se upušta vazduh u jednu ili drugu stranu pneumatskog cilindra dvosmernog dejstva. Po ovome zadatku da se razvodnikom usmerava – raspoređuje struja vazduha po vremenu, pravcu i količini ova pneumatska komponenta je dobila ime.

Razvodnici se mogu grupisati,bez obzira na konstruktivno rešenje, prema svojim osnovnim karakteristikama a to su:

1. protok vazduha
2. način aktiviranja
3. funkcija.

Razvodnici za cilindre jednosmernog dejstva omogućavaju prolaz vazduha do cilindra da bi ovaj preko klipnjače izvršio nekirad. Tom prilikom se vrši radni hod klipa u cilindru. Kada se u razvodniku uspostavi veza cilindar-atmosfera,pod dejstvom opruge u cilindru klip se vraća čime se izvršava povratni hod. Razvodnici za cilindre dvosmernog dejstva su povezani sa obe strane cilindra, tako da se i radni i povratni hod vrši pod dejstvom pritiska vazduha koji se preko razvodnika usmerava jedanput u jednu,a drugi put u drugu stranu cilindra.

10.7.1 Označavanje razvodnika

Označavanje razvodnika kao i drugih pneumatskih komponenata šematski kod izrade projekta, vrši se simbolima prema evropskom standardu. Tako razvodnik za cilindar dvosmernog dejstva pored simbola nosi oznaku 4/2 ili 5/2. Prva brojka pokazuje koliko dato konstruktivno rešenje ima otvora za priključke, a druga brojka koliko položaja zauzima razvodni klip za izvršenje zadatka. Tako npr.razvodnik označen sa 4/2 ima 4 priključka i dva položaja razvodnog klipa. Razvodnik 5/2 ima 5 priključaka i dva položaja razvodnog klipa.

Pored toga, treba razlikovati razvodnike kod kojih posle aktiviranaj vazduh prolazi ka izvršnom organu i one, kroz koje stalno postoji prolaz vazduha,a kada se aktiviraju prekida se struja vazduha. Prema tome postoje razvodnici koji su normalno zatvoreni i normalno otvoreni.

U prvom slučaju kad je razvodnik neaktiviran nema prolaza vazduha kroz razvodnik, a u drugom slučaju kroz razvodnik postoji veza sa izvršnim organom.

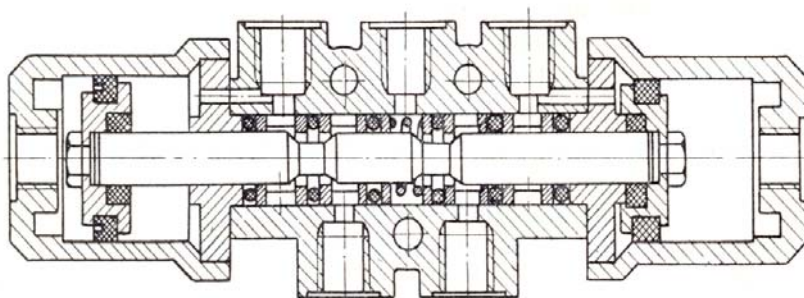
Ova veoma važna karakteristika razvodnika posebno sa tekstom označava u prospektu proizvođača. Oba rešenja koriste u pneumatskim instalacijama zavisno od toga kakav funkcionalni zadatak treba da izvršava postavljeni sistem.

10.7.2 Konstruktivna rešenja razvodnika

Iako razvodnici u funkcionalnom smislu moraju izvršavati isti zadatak, u konstruktivnom pogledu oni se razlikuju. Jedna konstruktivna koncepcija ima slobodan klip sa zaptivkama na klipu ili u posebnom umetku. Po drugoj razvodnici su ventilskog tipa. Nekat pojedini proizvođači daju i kombinovana rešenja.

- Razvodnici sa slobodnim klipom

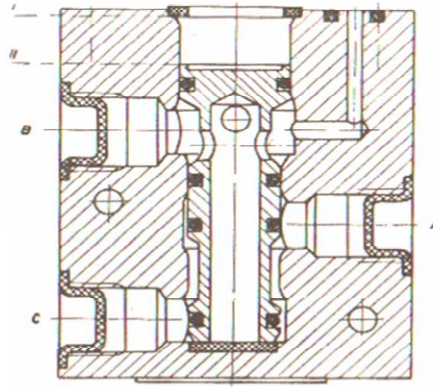
Razvodnik sa slobodnim klipom 5/2 (sl. 117) se sa obe strane pneumatski aktivira. Posle prestanka pneumatskog impulsa razvodni klip ostaje na mestu i obezbeđuje postignuti smer protoka kroz razvodnik sve dok pod uticajem impulsa sa suprotne strane razvodni klip ne zauzme drugi krajnji položaj. Okrugle zaptivke se nalaze u posebnom prstenastom umetku koje obezbeđuju zaptivanje s jedne strane na klip, a sa druge strane u srednjem otvoru u telu razvodnika.



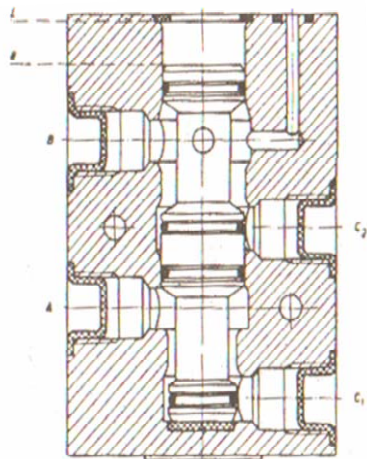
Slika 117: Razvodnik 5/2

Razvodnik 3/2 (sl. 118) povezuje cilindar jednosmernog dejstva sa atmosferom. Ručnom ili nekom drugom komandom koja se postavlja sa gornje strane tela razvodnika, ispušta se vazduh iz prostora iznad klipa a zatvara dalje priticanje komprimiranog vazduha. Zbog toga klip prelazi u gornji položaj pa se tok strujanja vazduha kroz razvodnik menja.

Razvodnik 4/2 (sl. 119) propušta vazduh u drugu stranu cilindra, a prethodnu prazni. Razvodnik 3/2 upušta vazduh u cilindar, a prekida vezu sa atmosferom. To je tzv. aktivirano stanje razvodnika.



Slika 118: Razvodnik 3/2



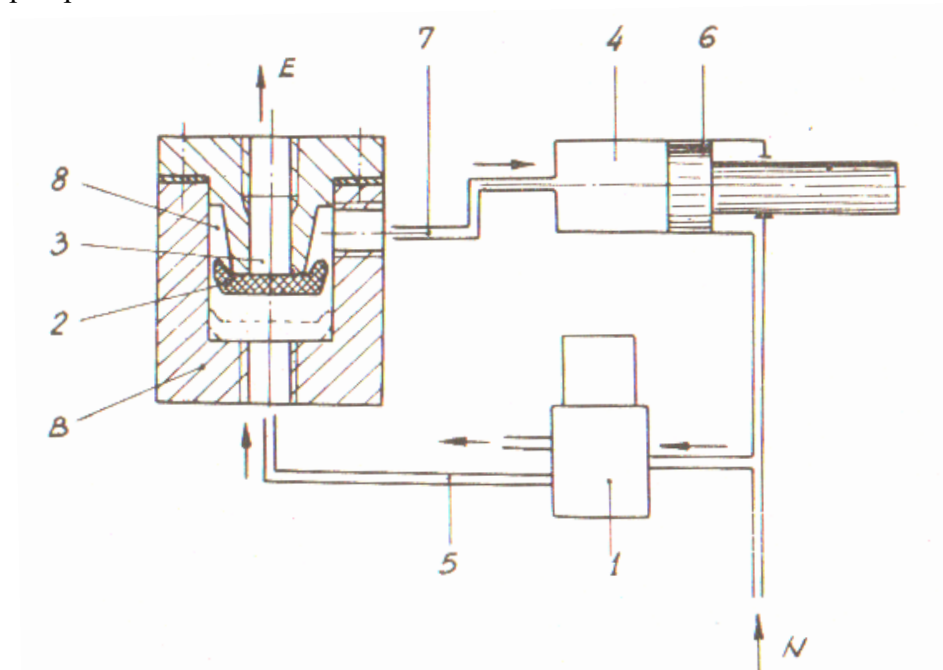
Slika 119: Razvodnik 4/2

10.8 Ventili

Mogu imati različite zadatke u pneumatskoj instalaciji, a ovde će se spomenuti samo neki od njih koji su najviše zastupljeni. Obično se nalaze između razvodnika i izvršnog elementa, mada se mogu naći i iza kompresora a pre razvodnika (nepovratni ventil, ventil za ograničenje pritiska i sl.).

10.8.1 Brzoispusni ventil

Kada je potrebno brzo isprazniti cilindar kroz razvodnik, primenjuje se brzoispusni ventil. Ako su dugački pneumatski vodovi između razvodnika i cilindra, a pražnjenje cilindra i vazduha u vodu treba da bude brzo izvedeno, onda se blizu cilindra postavlja brzoispusni ventil. Tako se vazduh iz cilindra prazni preko brzoispusnog ventila, a vazduh iz voda kroz razvodnik. Pre nego što je vod ispražnjen, cilindar je zahvaljujući brzoispusnom ventilu oslobođen vazduha pod pritiskom.



Slika 120: Funkcionisanje brzoispusnog ventila

Na slici 120. šematski je prikazana funkcija brzoispusnog ventila povezanog na mreži sa razvodnikom i cilindrom. Iz mreže N dolazi vazduh do razvodnika 3/2 (1) i jedne strane cilindra (4). Na vodu (5) bliže cilindru postavljen je brzoispusni ventil B. Pod strujom komprimiranog vazduha specijalna manžetna (2) stoji uz sedišta ispusnog kanala (3) i omogućuje prolaz vazduha ka cilindru. Kada prestane aktivirano stanje razvodnika (1), u vodu (5) opadne pritisak, manžetna se odvajaju od sedišta zahvaljujući razlici pritisaka. Manžetna zatvara otvor za dovod vazduha, a cilindar (4) se kroz vod (7) preko kanala (3) povezuje sa atmosferom.

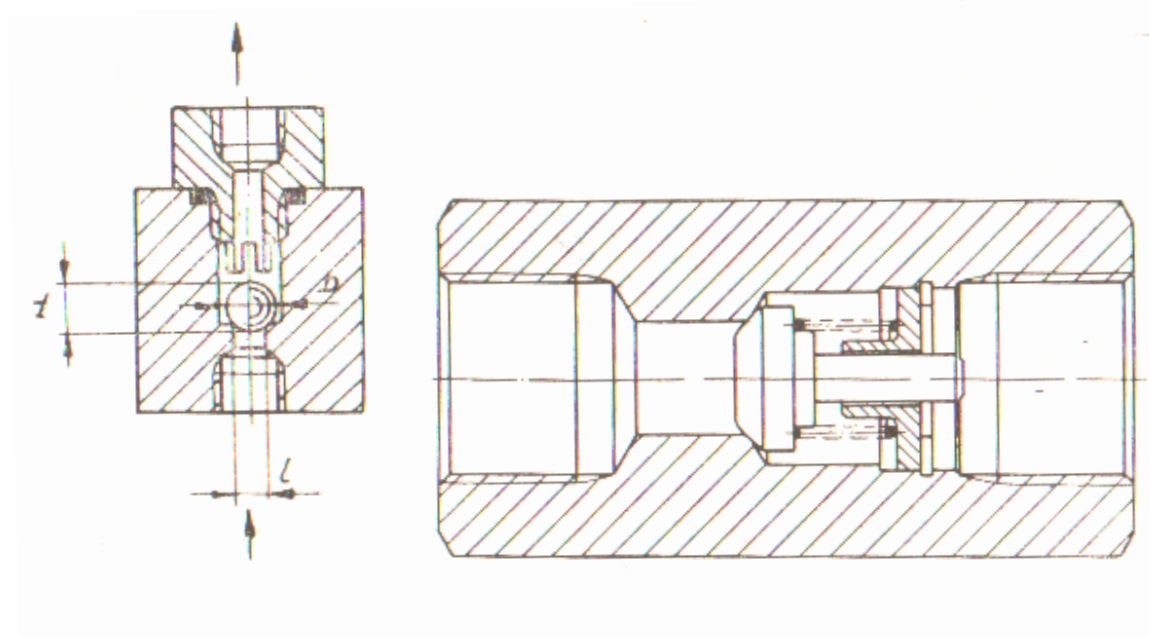
Zbog pritiska vazduha sa suprotne strane, klip u cilindar (4) se kroz vod (7) preko kanala (3) povezuje sa atmosferom. Ponovnim upuštanjem vazduha preko razvodnika, manžetna zatvara vezu sa atmosferom u brzoispusnom ventilu i klipnjača cilindra vrši radni hod.

10.8.2 Nepovratni ventil

Propuštanje vazduha kroz cevnu mrežu u jednom smeru bez mogućnosti suprotnog strujanja, obezbeđuje se nepovratnim ventilom. Nepovratni ventili se izводе sa kuglicom (sl. 121) ili klipom (sl. 122) koji je obično sa jedne strane potiskivan oprugom.

U hidraulično-pneumatskim instalacijama obično se postavlja kuglica kao zaporni element ventila.

Ako se jedan rezervoar snabdeva vazduhom određenog pritiska, onda se postavlja nepovratni ventil pre ulaza u rezervoar. Sve dok je u cevovodu pritisak vazduha veći nepovratni ventil je otvoren i propušta vazduh u rezervoar. Kada opadne pritisak vazduha u mreži, zbog dejstva opruge zaporni element nepovratnog ventila zatvara prolaz vazduha u suprotnom smeru. Nepovratni ventil se primenjuje i na krajevima ogranka vazdušnog razvoda. Kad se crevo odvije, ventil zatvara izlaz vazduha iz mreže.



Slika 121: Nepovratni ventil sa kuglicom

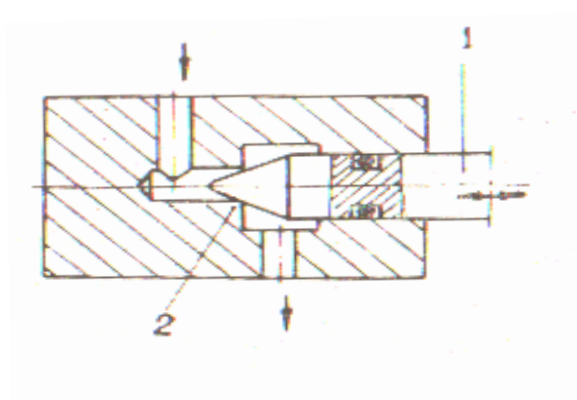
Slika 122: Nepovratni ventil sa klipom

10.8.3 Prigušni ventil

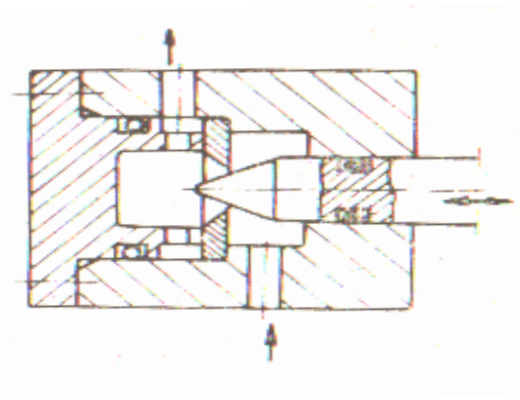
Prigušivanje vazduha u protoku primenjuje se za regulisanje brzine klipa u cilindru, za meko prilaženje klipa do krajnjeg položaja, pri izradi vremenskog pneumatskog relea itd. Ovakvi slučajevi su sve češći naročito od kada se šire primenjuje automatizacija mašina i uređaja.

- Prigušni ventil jednostavne konstrukcije

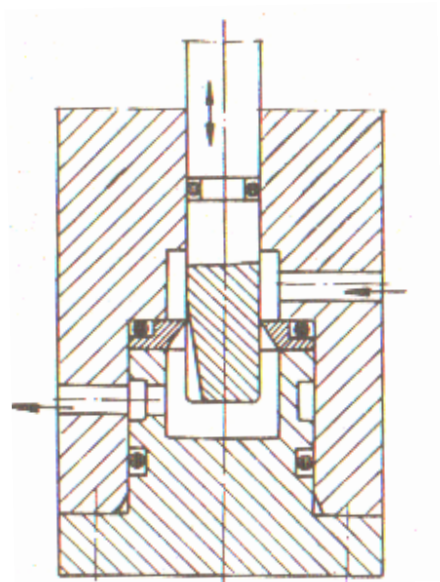
Ventil kod koga konus pokretnog klipa prilazi više ili manje sedištu u telu ventila (sl. 123). Na taj način se ostvaruje veće ili manje prigušivanje protočne struje. Prigušnik može biti sa konusom na pokretnom klipu (sl. 125) ili sa blendom kao sedištem (sl. 124). Ova konstrukcija obezbeđuje finije regulisanje protoka. Radi finog podešavanja regulisanja prigušenja sa minimalnom protočnom količinom fluida, primenjuje se prigušni ventil. Na pokretnom klipu usečen je sa strane trouglasti kanal čija se površina preseka smanjuje ka kraju kanala. Sa ovakvim rešenjem prigušivanja moguće je izvesti finije prigušenje sa napomenom da suženje otvora može da se poveća zbog mehaničkih nečistoća.



Slika 123: Prigušnik jednostavne konstrukcije



Slika 124: Prigušnik sa blendom



Slika 125: Prigušnik za fino regulisanje blendom

10.9 Pneumatski motori

Energija pritiska sadržana u komprimiranom vazduhu pretvara se u mehanički rad u mašinama specijalne konstrukcije. Vazduh pod pritiskom deluje na sve zidove prostora u kome se nalazi. Ako jedan deo može da se kreće pod dejstvom pritiska vazduha, nastupiće kretanje sve dok postoji pritisak koji pomnožen površinom na koju deluje daje veću silu nego što je sila otpora. Pokretanjem dela povećava se zapremina, pa se pritisak smanjuje prema jednačini stanja gasa.

Na bazi toga mogu se pneumatski motori podeliti u dve osnovne grupe i to :

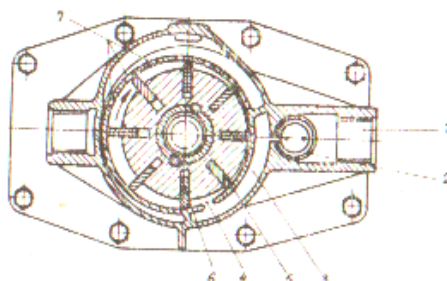
1. Rotirajući
2. Pravolinijski

10.9.1 Rotirajući pneumatski motori

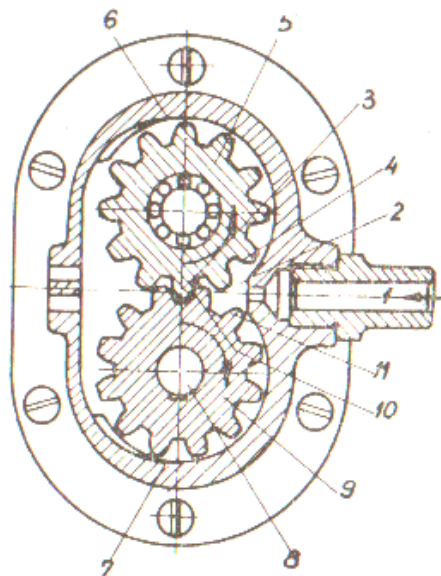
Pneumatski alati i mašine (bušilice, nareznice, brusilice, mašine za glačanje) pretvaraju direktno energiju pritiska u mehanički rad. Pneumatski motori mogu da se koriste i kao pogonski motori za pokretanje drugih mašina i uređaja.

Obrtno kretanje izlaznih vratila može se ostvariti različitim konstruktivnim rešenjem pneumatskog motora. Prva rešenja su bila izvedena kao klipne mašine. Vazduh koji deluje na klip (dva ili više) preko klipnjače koja je vezana za kolenasto vratilo vrši obrtanje izlaznih vrata. Obrtno kretanje pogonskog vratila mašine može se ostvariti *sa krilcima* (sl. 126). Na ekscentrično postavljenom rotoru mašine ugrađena su krilca. Vazduh pod pritiskom ulazi u mašinu kroz otvor 1. Kada je preoz na cilindru 2 postavljen, vazduh dolazi u komoru 3 da bi odatle kroz kanal 4 dospeo u prostor između krilaca 5 i 6. Pošto je lamela 6 većom površinom izložena pritisku, to će rotor krenuti u smeru strelice. Okretanjem rotora povećava se zapremina između krilaca čime se iskorišćava osobina ekspanzije komprimiranog vazduha. U svakom položaju rotora, prednja krilca imaju izloženu veću površinu pritiska vazduha tako da se javlja jedna sila koja tangencijalno deluje na obrtnu osu i vrši obrtanje rotora sa krilcima. Usled obrtanja rotora, krilca izlaze iz svog ležišta priljubljujući se svojom spoljnom površinom po cilindričnom zidu statora, telu mašine, i tako se ostvaruje zaptivanje pri radu. Tokom okretanja rotora prostor između krilaca dolazi do otvora 7 koji ovaj prostor vezuje sa atmosferom. Otpori kojim je opterećeno izlazno vratilo mogu biti samo manji od obrtnog momenta koji se dobija u mašini. Kada mašina radi bez opterećenja, broj obrtaja može dostići nedozvoljenu vrednost. Broj obrtaja se smanjuje, pa uređaj upušta veću količinu komprimiranog vazduha u komore motora.

Pogonski motor koji kao pogonsku energiju koristi vazduh pod pritiskom može biti izveden kao mašina *sa dva spregnuta zupčanika* (sl. 127). Jedan zupčanik je pričvršćen za pogonsko vratilo, a drugi se slobodno okreće. Komprimirani vazduh koji dolazi iz mreže deluje na bočne strane zubaca čime se postiže obrtno kretanje oba zupčanika. Na zupčanik koji se slobodno okreće deluje takođe pritisak vazduha pa se zbog sprege ova dva zupčanika skoro udvostručuje obrtni moment na izlaznom vratilu. Kada treba dobiti pneumatske alate relativno male snage, ali velikog broja obrtaja koriste se *turbomašine*. Kod ovih mašina za pokretanje turbine koristi se kinetička energija komprimiranog vazduha koji izlazeći iz mlaznice struji prema lopaticama turbine.



127: Rotacioni motor
sa krilcima



Slika 128: Rotacioni motor
sa spregnutim zupčanicima

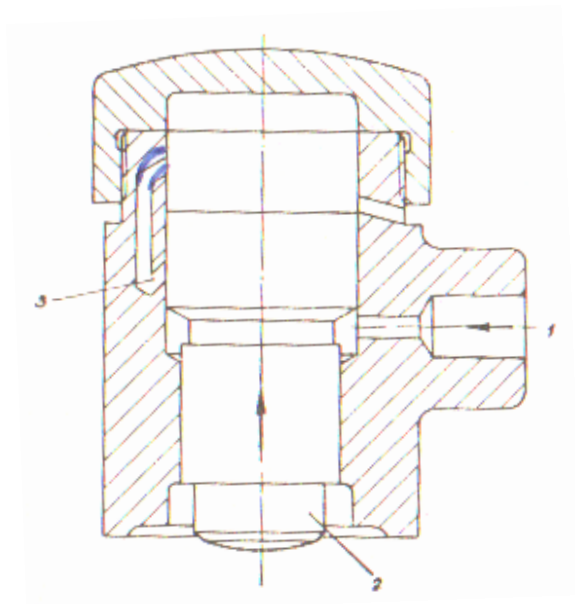
Slika

10.9.2 Pravolinijski pneumatski motori

Ako komprimirani vazduh deluje na površine koje izvide pravolinisko kretanje, onda se takvi uređaji nazivaju pravoliniski pneumatski motori. To mogu biti pneumatski alati udarnog dejstva, izvršni organi membranskog tipa i pneumatski cilindri.

- *Pneumatski alati udarnog dejstva*

U ovu grupu spadaju pneumatski čekići, sekači i dr. Ovakvi su alati vrlo rasprostranjeni u metalnoj industriji kod oblikovanja komada, vezivanja dva dela zakivcima, u građevinarstvu, rudarstvu itd. Kinetička energija slobodnog klipa se iskorišćava da preko udarnog dejstva izvršava rad. Pneumatski alati koji rade na ovom principu mogu biti različite konstrukcije zavisno od toga za koju su svrhu namenjeni. Način ostvarivanja udarnog dejstva pneumatskih alata, dat je na slici 129. Komprimirani vazduh dolazi u alat preko otvora 1. Pod dejstvom pritiska vazduha slobodan klip 2 se podiže. Već na početku svog kretanja na više, klip zatvara izduvni kanal, da bi ostatak puta prešao sabijajući vazduh u zapremini iznad klipa. Tokom daljeg kretanja klipa na više, otvor kanala 3 se povezuje sa dovodom komprimiranog vazduha. Tako se sa gornje strane slobodnog klipa stvara sila koja snažno potiskuje klip na niže. Kretanje klipa na niže se ostvaruje zahvaljujući većoj napadnoj površini sa gornje strane. Pri kretanju klipa na niže zatvara se dovod vazduha pod pritiskom u prostor iznad klipa, ali se kretanje nastavlja zahvaljujuću ekspanziji vazduha. Pre nego što klip dođe do svoje krajnje donje tačke, gornja ivica klipa oslobodi prolaz vazduha ka atmosferi čime se zbog nastale situacije omogućuje ponovo kretanje klipa na više kao i na početku. Oscilatorno kretanje klipa će se ponavljati sve dok se ne prekine dovod vazduha u alat.



Slika 129: Šematski prikaz pneumatskih alata udarnog dejstva

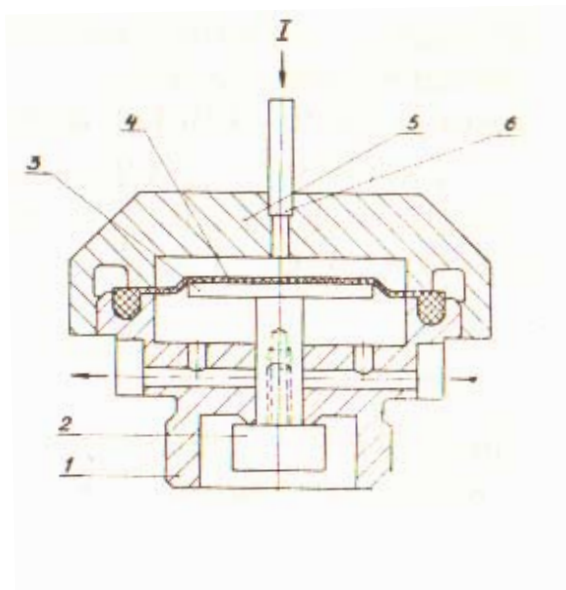
- Izvršni organi membranskog tipa

Kada su hodovi relativno mali primenjuje se rešenje sa membranom za vršenje nekog rada sa pravolinijskim kretanjem. Membranska komanda za upravljanje razvodnicima data je na sl. 130. Telo komande 1 se uvršne u servokomandu pneumatskog razvodnika da bi pri radu klip 2 zatvarajući i otvarajući dovod vazduha za komandovanje obezbedio funkciju razvodnika. Pravolinijsko kretanje klipa 2 se ostvaruje kada se kroz dovod I upusti vazduh pod pritiskom iznad membrane. Membrana pritiska na stablo klipa 2 zbog čega klip prelazi kratko rastojanje (svega oko 1 mm). Posle uspostavljanja veze između prostora iznad membrane i atmosfere klip 2 se priljubljuje uz gornje sedište. Rad membranske komande se svodi na funkciju cilindra jednosmernog dejstva.

- Pneumatski cilindri

Pneumatski cilindri mogu biti tako izvedeni da pod dejstvom komprimiranog vazduha vrše neki rad u jednom ili dva smeru. Pneumatski cilindar se sastoji od :

- Tela cilindra
- Poklopca
- Klipa
- Klipnjače
- Manžetne



Slika 130: Membranska komanda

Ako se komprimirani vazduh upušta u cilindar sa jedne strane klipa, klip će se kretati u stranu manjeg pritiska.

Kada se upuštanje vazduha vrši samo sa jedne strane onda se vraćanje klipa posle prestanka dejstva vazduha izvodi pomoću opruge koja je smeštena sa suprotne strane klipa. To je cilindar jednosmernog dejstva. U tom slučaju radni hod klipa odnosno klipnjače je onaj koji se ostvaruje pomoću komprimiranog vazduha. Povratni hod klipa se postiže oprugom smeštenom u cilindru ili spolja. Kada se u cilindar naizmenično upušta vazduh sa obe strane klipa, kretanje klipa u oba smera je prinudno pod dejstvom pritiska vazduha. Svaki od hodova klipa, odnosno klipnjače je radni hod zato što se sa obe strane dobija određena sila na klipnjači.

To je cilindar dvosmernog dejstva. Sila koja se dobija na klipnjači cilindra dvosmernog dejstva se koristi za vršenje rada i ta efektivna sila se daje izrazom:

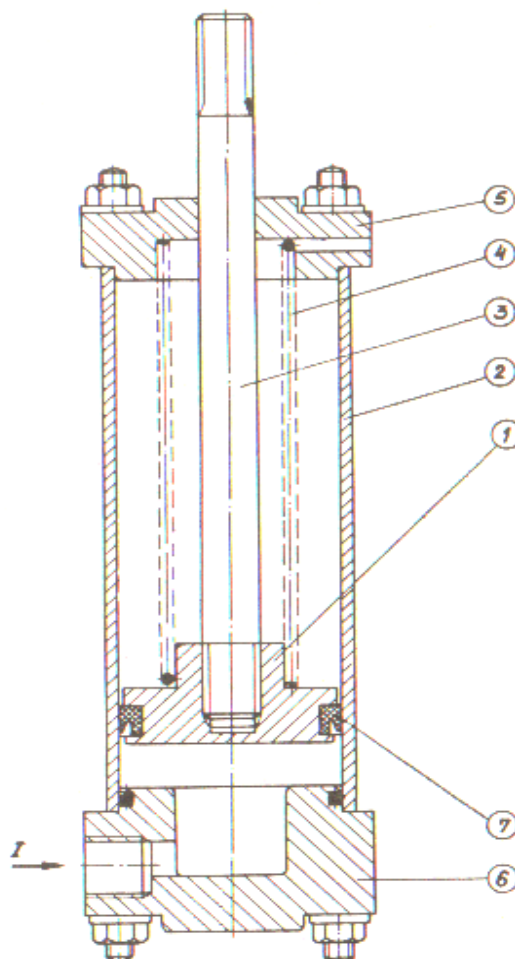
$$F = p \cdot (D^2 - d^2) \cdot \pi / 4 - F_0 ,$$

gde su: D - unutrašnji prečnik cilindra, d - prečnik klipnjače, p - pritisak vazduha, F_0 - sila otpora.

- Pneumatski cilindri jednosmernog dejstva

Kada vazduh pod pritiskom dolazi u cilindar samo s jedne strane da bi klip izvršio radni hod, onda je to cilindar jednosmernog dejstva (slika 131). Cilindar se sastoji iz klipa 1 koji se kreće kroz telo cilindra 2 kada komprimirani vazduh dospe u cilindar kroz otvor I. Preko klipnjače 3 sila proizvedena na klipu vrši van cilindra neki rad. Pomeranjem klipa 1 sabija se opruga 4, a vazduh ispred klipa izlazi u atmosferu kroz poklopac 5. Ova strana cilindra je uvek u vezi sa atmosferom. Kada se ulazni kanal i veze preko razvodnika sa atmosferom, pod dejstvom opruge klip se vraća u početni položaj. Telo cilindra je sa poklopcima 5 i 6 učvršćeno pomoću četiri duga zavrtnja. Na strani pritiska, postavlja se okrugla zaptivka radi zaptivanja kada je cilindar ispunjen komprimiranim vazduhom. Klip ima manžetnu 7 koja služi za zaptivanje.

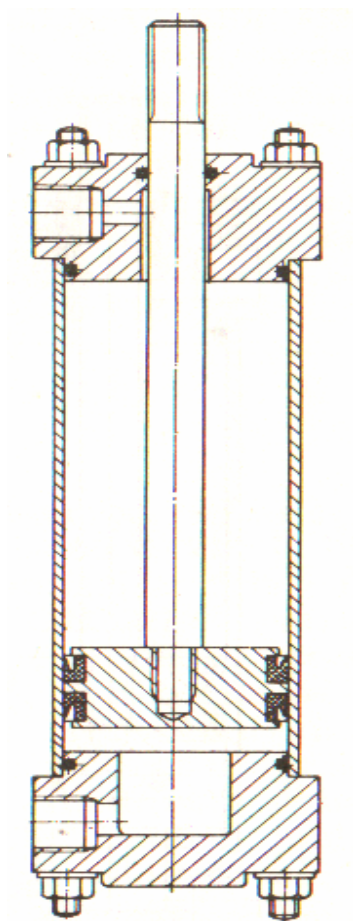
Kod cilindra jednosmernog dejstva klipnjača je uvek uvučena kada u cilindru nema pritiska vazduha.



Slika 131: Pneumatski cilindar jednosmernog dejstva

- Pneumatski cilindri dvosmernog dejstva

Cilindar dvosmernog dejstva je onaj za čije je kretanje klipa potrebno da se dovode vazduh sa jedne ili druge strane klipa u zavisnosti od toga u kome smeru ga treba pokrenut (sl. 132). Pošto se u ovom slučaju može koristiti sila kod oba smera kretanja klipa, ovakav cilindar se naziva:. Na klipu su ugrađene dve manžetne zbog zaptivanja obe strane cilindra. U telu poklopca na strani klipnjače ugrađena je okrugla zaptivka radi zaptivanja. Kretanje klipa od jednog do drugog krajnjeg položaja omogućeno je upuštanjem komprimiranog vazduha sa jedne ili druge strane klipa. Kad se u jednu stranu upušta vazduh druga se povezuje sa atmosferom. Brzina kretanja klipa se može regulisati prigušenjem izlaznog vazduha.



Slika 132: Pneumatski cilindar dvosmernog dejstva

10.10 Primeri primene pneumatike u drvnoj industriji

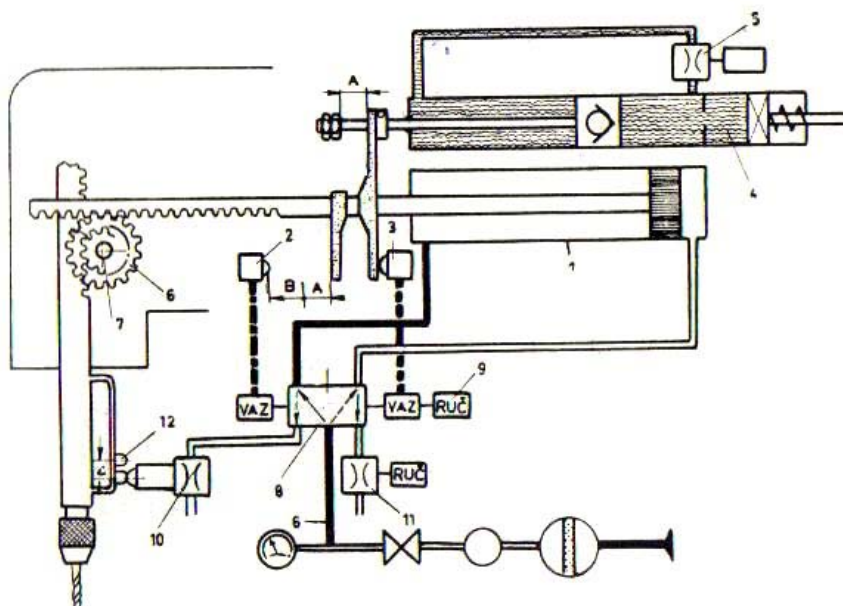
Pneumatika se naširoko primenjuje u svim granama industrije: mašinskoj, građevinskoj, industriji boja i lakova, prehrambenoj, konditorskoj, farmaceutskoj itd.; kao i u uslužnim delatnostima vezanim za život i rad ljudi. Ovde će biti govora samo o primeni pneumatike u drvnoj industriji, kroz tri primera koji se često sreću u praksi.

Radna jedinica za bušenja, prikazana na slici 133, sastoji se iz bušilice koja je pogonjena elektromotorom i pneumatskog cilindra pomoću koga bušilica vrši pravolinijsko primicanje i odmicanje od predmeta rada tj. radni i povratni hod.

Radi objašnjenja načina rada, delovanje jedinice delimo u dve faze:

- faza radnog hoda
- faza povratnog hoda.

Kretanjem klipa pneumatskog cilindra prema strani klipnjace izvršava se radni hod, dok se u suprotnom smeru obavlja povratni hod. Dužina radnog hoda određuje se prema dimenzijama radnog predmeta.

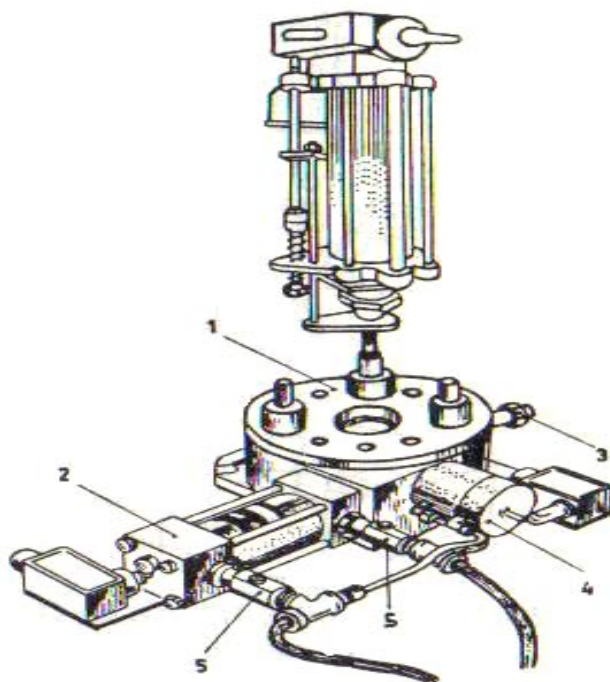


Slika 133: Funkcionalna šema radne jedinice za bušenje

Pošto se utvrdi dužina hoda, pričvršćuju se graničnici za zupčastu letvu klipnjače. Brzina radnog i povratnog hoda se određuje prema vrsti materijala, a reguliše se pomoću prigušivača (5, 10 i 11). Jedinicom za posmak uz pomoć cilindra za prigušivanje obezbeđuje se brzo primicanje burgije i usporeno vršenje radne operacije kao i brzi povratni hod.

Za izvršavanje radnog hoda, razvodnik (8) propušta vazduh u zadnju stranu cilindra (1) i klip počinje da se kreće u levo. Vazduh ispred klipa izlazi u atmosferu preko razvodnika (8) i prigušivača (10). Na hodu dužine A klip ima ubrzano kretanje. Ostali deo hoda se obavlja u zajednici sa prigušnim cilindrom (4). Brzina kretanja na dužini B reguliše se pomoću prigušivača (5). Dodirom graničnog prekidača (2) klip u razvodniku (8) menja položaj i zbog toga nastaje promena kretanja klipa u pneumatskom cilindru, znači počinje povratni hod. Cilindar za prigušivanje nema uticaj na brzinu povratnog hoda. Brzina povratnog hoda se reguliše preko prigušnog ventila (11). Klip pneumatskog cilindra vrši povratni hod sve dok se ne dodirne dugme graničnog prekidača (3), posle čega nastaje promena smera kretanja. Od tog momenta nastupa ponovo radni hod kako je ranije opisano. Dokle god se vazduh pod pritiskom nalazi u instalaciji, jedinica vrši automatski radne pokrete. Ako jedinica za posmak kod bušenja radi sa nekim drugim uređajem ili radnom jedinicom, potrebno je ostvariti sinhronizaciju rada jednog i drugog uređaja. Rešenje sinhronizacije zavisiće od radnih jedinica koje treba zajedno da rade.

Na slici 134 je prikazan primer primene obrtnog radnog stola na jednoj stonoj busilici. Burgija se ritmički kreće gore-dole pomoću automatskog pneumatskog cilindra. Rad obrtnog stola i oscilatorno kretanje burgije je povezano na istim električnim kontaktima. Funkcionisanje obrtnog radnog stola obezbeđuje elektro-pneumatski razvodnik, a rad cilindra jedan drugi pneumatski razvodnik. Jedan deo hoda je brzo primicanje burgije radnom komadu, a drugi deo je jednak brzini rezanja (brzina prodiranja burgije u materijal). Radi okretanja radnog stola, upušta se vazduh u instalaciju preko slavine na glavnom vazdušnom vodu. Okretanje stola i oscilatorno kretanje burgije je sinhronizovano. Prekid radnog obrtnog stola nastaje onda kada se preko slavine za vazduh prekine dovod vazduha. Za slučaj prekida strujnog kola burgija se zaustavlja u gornjem položaju, čime se postiže bezbednost u radu.



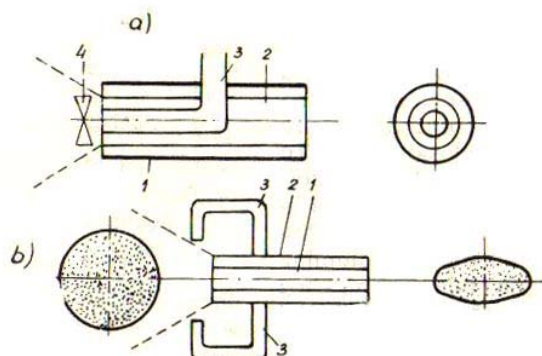
Slika 134: Obrtni sto koga okreće pneumatski cilindar

Kako se na slici 134 vidi, posao radnika koji opslužuje mašinu sastojao bi se u tome da postavlja i skida radne predmete sa ploče obrtnog stola. To stvara mogućnost da se od strane jednog radnika može opsluživati više mašina čime se povećava efektivno vreme rada radnika. Način pričvršćivanja radnog komada za obrtnu ploču zavisi od oblika predmeta. Veza radnog predmeta na stolu mora biti takva da se lako može postavljati i skidati, a pri tome da stoji čvrsto za vreme izvršenja radne operacije.

Komprimirani vazduh se koristi za raspršivanje tečnosti, kao na primer nabacivanje boje kod farbanja ploča od medijapana i masiva, raspršivanje vode kod vlaženja tkanina, hartije i drugih materijala u tehnološkom procesu izrade. Pored toga ima primene kod nanošenja tankih slojeva parafina u grafičkoj industriji i tako dalje. Uređaji koji se koriste kod raspršivanja mogu biti izrađeni na mehaničkom, pneumomehaničkom ili čisto pneumatskom principu.

Sa slici 135 su šematski prikazani principi raspršivača sa pneumomehaničkim i čisto pneumatskim načinom izvođenja. Mlaznica (slika 135a) se sastoji iz 3 cevi postavljenih jedna u drugu. Na izlazu iz mlaznice postavljen je leptir 4 koji se okreće pod dejstvom mlaza vazduha iz cevi 2. Tečnost izlazi kroz cevčicu 3 i pada na leptir 4 koji vrši raspršivanje. Dopunsko raspršivanje se vrši vazdušnom strujom koja izlazeći iz cevi 1 stvara mlaz smeše vazduha i tečnosti oblika konusa.

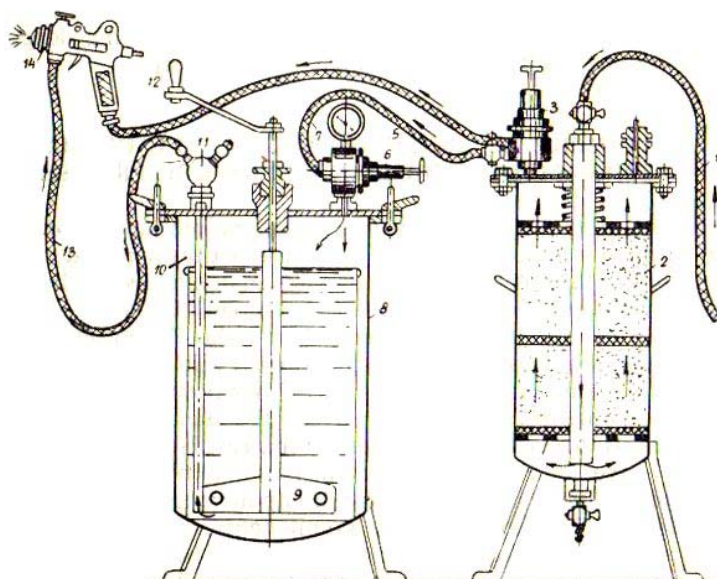
Mlaznica koja radi na principu čisto pneumatskog raspršivanja prikazana je na slici 135b. Sastoji se iz dve cevi koje su postavljene jedna u drugoj. Kroz unutrašnju cev 1 izlazi tečnost, a kroz spoljnu cev komprimirani vazduh koji izlazeći iz mlaznice pravi konus raspršujuće tečnosti.



Slika 135: Principi raspršivača sa: a) pneumomehaničkim i b) pneumatskim načinom izvodjenja

Poprečni presek na osu konusa je krug. Ako se propusti kroz cevi 3 vazduh, poprečni presek konusa dobija oblik elipse kako je na slici i prikazano. Opisana mlaznica daje ravnomernu mešavinu po poprečnom preseku što kod mehaničkog raspršivača nije slučaj. Brzina kretanja raspršene tečnosti je vrlo bliska brzini vazduha na izlazu koja iznosi od 10-50 m/s, za pritisak 1-5bar. Prečnici kapljica zavise od brzine kretanja vazduha i njegovog pritiska ali i od fizičko-hemijskih svojstava tečnosti.

Na slici 136 prikazan je farbarski pištolj. Vazduh iz mreže preko creva 1 dolazi u prečistač 2. Prolazeći kroz njega, vazduh se oslobađa vlage i čestica ulja. Ovako prečišćen preko reducir ventila 3 odlazi kroz crevo 4 u pištolj 14 odnosno kroz crevo 5 i reducir ventila 6 sa manometrom 7 rezervoar 8 u kome se nalazi boja. U rezervoaru 8 se održava pritisak 0,8-1,5bar. Pomoću ručice 12 i zastora 9 boja u rezervoaru se povremeno meša. Pod dejstvom pritiska vazduha, boja kroz cev 10 odlazi do ventila 11 i crevom 13 dospeva do pištolja 14.



Slika 136: Farbarski pištolj sa ostalim priborom

10.11 Klasifikacija i princip rada ventilatora

Pod ventilatorom podrazumevamo uređaj u kome se vrši razmena energije između radnog fluida (vazduha, gasa, zaprašenog vazduha, hemijski agresivnog gasa i sl.) i njegovih pokretnih delova (lopatice rotora). Zapravo mehanička energija obrtnog kretanja lopatica rotora koju stvara elektromotor kao pogonski deo uređaja, se pretvara u povećanje strujne energije vazduha – pritisne i kinetičke.

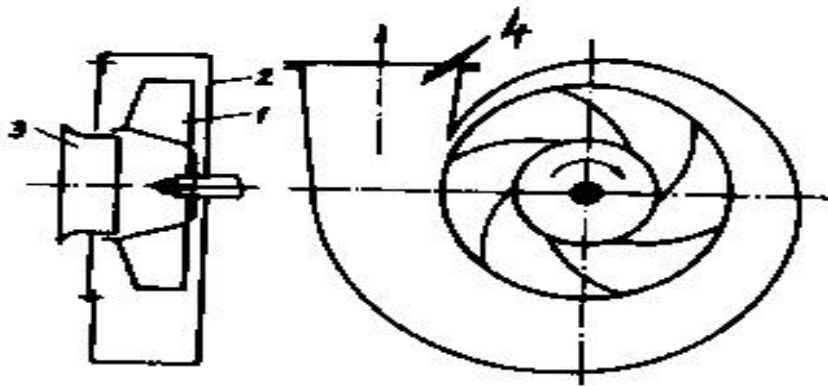
U preradi drveta ventilatori su našli primenu kod usmeravanja strujanja vlažnog vazduha, kao i kod ubacivanja svežeg i izbacivanja izradjenog vlažnog vazduha, u sušarama za drvenu gradju. Druga oblast široke primene ventilatora u preradi drveta je u pneumatskom transportu drvnog otpatka od njegovog mesta nastanka bilo u primarnoj ili finalnoj preradi drveta, pa sve do mesta gde se skladišti (silosa i sl.) radi korišćenja u energetske svrhe.

Osnovna podela ventilatora je prema smeru strujanja vazduha u njemu, i to na:

- 1) radijalne
- 2) aksijalne

10.11.1 Radijalni ventilatori

- Kod radijalnih (centrifugalnih) ventilatora (slika 137) pravci ulaska i izlaska vazduha iz ventilatora leže u dvema međusobno upravnim ravnima. Koriste se za transport vazduha i drugih gasova pri totalnom pritisku (Δp) do 12kPa. Ovaj pritisak predstavlja razliku ukupnog pritiska (kao zbira statičkog i dinamičkog pritiska) neposredno pre i posle ventilatora.



Slika 137: Šema radijalnog ventilatora

Prema veličini ovog totalnog pritiska koji mogu da ostvare se i dele na:

- ventilatore za oblast niskog pritiska do 1kPa
- ventilatore za oblast srednjeg pritiska 1-3kPa
- ventilatore za oblast visokog pritiska 3-12kPa

Radno kolo (rotor), pozicija 1 na slici 137, sastoji se iz većeg broja lopatica koje se projektuju tako da ostvare što bolju razmenu energije sa vazduhom, čime se stepen korisnosti

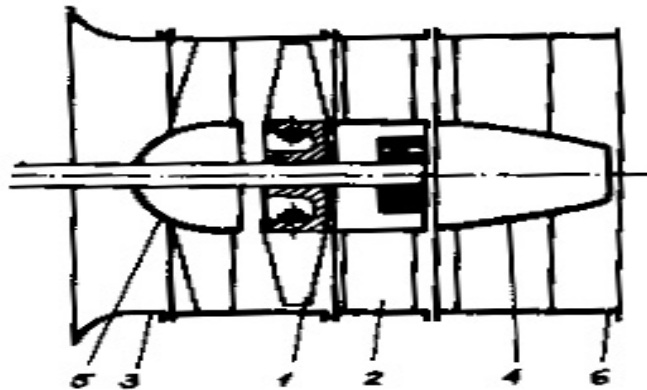
ventilatora viši, a utrošak električne energije za pogon ventilatora niži. Kućište (pozicija 2 na sl. 1) je spiralnog oblika, pravougaonog poprečnog preseka, i zadatak mu je da usmerava strujanje radnog fluida od ulaznog otvora ka izlaznom. Obično se izrađuje od čeličnog lima ili pocinkovanog ukoliko je izložen dejstvu spoljašnje sredine. Na ulazu u kućište je predviđen konfuzor (3), a na izlazu iz kućišta oformljen je difuzioni otvor (4), koji je obično zavaren na konstrukciju kućišta.

Prema uslovima rada u eksploataciji mogu biti:

- 1) usisni – kada preovladjuju gubici energije strujanja samo u usisnoj strani ventilatora i vazduh iz potisnog dela tj. difuzora odlazi direktno u atmosferu
- 2) potisni – kada preovladjuju gubici u potisnom delu ventilatora, a vazduh se “usisava” direktno iz atmosfere
- 3) usisno-potisni – kada se gubici pojavljuju i u usisnom i u potisnom delu ventilatora
- 4) bez pritiska – kada ventilator služi samo da poveća brzinu strujanja vazduha.

10.11.2. Aksijalni ventilatori

Koriste se za velike protoke, a relativno niske pritiske (kod jednostepenih mašina do 2,5kPa). Osnovni delovi prikazani su na slici 138.

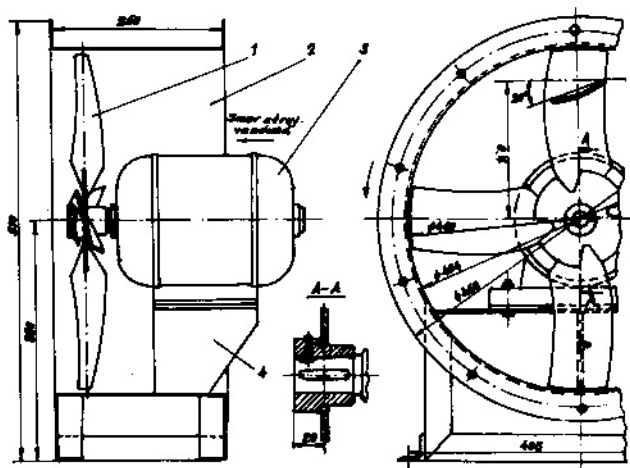


Slika 138: Šema aksijalnog ventilatora

Iz radnog kola (1) vazduh ulazi u zakolo (difuzor) (2), a potom u potisni deo (6). Ispred radnog kola obično je postavljen prednji deo glavčine (5), a iza zakola je zadnji deo glavčine (4). Namene ovih elemenata je da osiguraju ravnomerno strujanje radnog fluida sa malim gubicima, odnosno stepenom iskorišćenja. Svi pobrojani elementi smešteni su u oklopu – kućište (3) ventilatora.

U ulaznom delu vazduh se usisava iz mirne sredine (okoline), pa mu brzina raste, a shodno Bernulijevoj jednačini pritisak mora da opadne. U radnom kolu (1) usisanoj vazdušnoj struji raste pritisak i brzina, jer se putem lopatičnog kola prenosi rad sa vratila elektromotora na radni fluid. U zakolu (2) se vrši dalja transformacija kinetičke energije koju je fluid izneo iz radnog kola u energiju pritiska i istovremeno ispravlja strujanje fluida, ali se ukupna energija nešto smanjuje zbog trenja. Na kraju difuzora zakola se smanjuje aksijalna brzina strujanja, a povećava pritisak.

Aksijalni ventilator je često konstrukcije da je radno kolo konzolno nasadjeno na vratilo elektromotora (slika 139). Ovo je prisutno upravo kod sušara i sistema za ventilaciju.

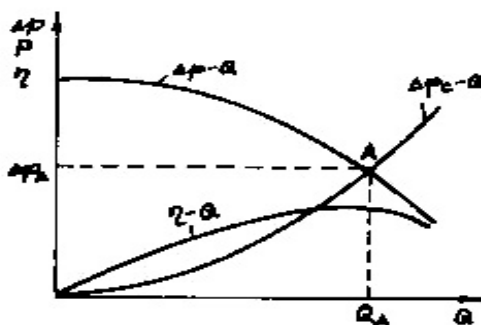


Slika 139: Aksijalni ventilator sa elektromotorom

- Radne krive i zajednički rad ventilatora

Pod radnim krivama ventilatora podrazumevaju se grafici karakteristika koji daju zavisnost totalnog pritiska (napora) Δp , ili potrebne snage na vratilu P , ili stepena korisnosti ventilatora η od protoka Q , pri konstantnoj brzini obrtanja rotora i normalnoj gustini vazduha ($\rho=1,2\text{kg/m}^3$). Ove karakteristike se još zovu i individualne jer se odnose samo na dati ventilator.

Od posebnog značaja je zajednički rad ventilatora i ventilacionog sistema (npr. cevovoda u kome se ventilator nalazi kod unutrašnjeg transporta). Karakteristika ventilatora ($\Delta p-Q$) podrazumeva parabolu “na dole” (slika 140), dok karakteristika cevovoda (Δp_c-Q) predstavlja parabolu “na gore”, sa temenom u koordinatnom početku.



Slika 140: Karakteristika ventilatora i cevovoda sa radnom tačkom

U preseku karakteristike ventilatora ($\Delta p-Q$) i karakteristike cevovoda dobija se radna tačka A (slika 4). Ona predstavlja protok pri kome su totalni pritisak (napor) ventilatora i

sistema (cevovoda) jednaki tj. u njoj je zadovoljen materijalan i energetske bilans instalacije. Pri tome je radni režim određen tačkom A stabilan, a odgovara mu radna kriva η -Q maksimalnog stepena korisnosti. Ovo daje odgovor na čest slučaj u praksi sa pneumatskim transportom kad se dodavanjem novog cevovoda i izvora nastajanja drvnog otpatka (mašina i sl.), u već postojeći sistem, napravi zagušenje i onemogućiti transport. Ovim koeficijent parabole karakteristike cevovoda (Δp_c -Q) raste, ona postaje “strmija”, a radne tačka A se pomera ulevo u oblast manjeg protoka a većeg potrebnog napora. Da do zagušenja ne bi došlo potrebno je promeniti ventilator (sistem ventilatora) u mreži, ili pak smanjiti gubitke u već postojećoj instalaciji što je često teže i manje efikasnije od promene ventilatora.

10.12 Održavanje pneumatskih instalacija

Da bi pneumatske instalacije ispravno i pouzdano radile u predviđenom radnom veku potrebno je brižljivo i periodično održavanje kompresorske stanice i razvodne mreže. Ovo podrazumeva redovno servisiranje kompresora i ventilatora u za to predviđenom roku, svakodnevno ispuštanje kondenzata iz rezervoara i cevovoda, kontrola sastava cevi najmanje dva puta godišnje, remont razvodne mreže bar svake tri godine i sl.

Takodje, treba naglasiti da svaka kompresorska stanica i rezervoari pod pritiskom moraju biti izvedeni po propisima koji važe za sudove pod pritiskom.

Razvodnici za cilindar dvosmernog dejstva prema evropskom standardu nose oznake 4/2 ili 5/2. Prvi broj pokazuje koliko razvodnik ima otvora za priključke, a drugi koliko položaja može zauzeti klip razvodnika za izvršenje zadatka. Ovoga se proizvođači razvodnika moraju strogo pridržavati jer samo pod tim uslovima moguća je montaža razvodnika u pneumatsku instalaciju.

10.13 Energetska efikasnost pneumatskih sistema

Vazduh pod pritiskom može zbog nepravilne upotrebe, i pored svih prednosti, da postane najskuplji oblik energije za obavljanje rada u industrijskim postrojenjima. Troškovi vazduha pod pritiskom su često nepoznati ili skriveni medju dugim troškovima rada. U većini fabrika iskoristi se samo jedan deo proizvedenog vazduha pod pritiskom. Problemi sa pritiskom u sistemu su neretko prouzrokovani nedostatkom kapaciteta kompresora ili nedovoljnim pritiskom koji oni ostvaruju. Najčešće uzroci problema leže u radu upravljačkog sistema, nerealno definisanim zahtevima sa strane potrošača, neodgovarajuće projektovanom i održavanom sistemu distribucije i neusklađenom kapacitetu rezervoara.

10.13.1 Mere za povećanje energetske efikasnosti pneumatskih sistema u industriji

Prema istraživanjima koje je objavilo Ministarstvo energije SAD, na osnovu većeg broja realizovanih projekata racionalizacije potrošnje energije u pneumatskim sistemima, energetska efikasnost je poboljšana od 5 % do čak 40 % (u jednom slučaju) dok se u najvećem broju slučajeva ušteda energije kretala oko 18 %.

Poboljšanje pogona

Integracija pogona sa promenljivom brzinom (VSD) u kompresore može dovesti do poboljšanja energetske efikasnosti zavisno od karakteristika opterećenja. Integracija kontrolera brzine (frekventnih regulatora) u sisteme vazduha pod pritiskom je veoma troškovno isplativa mera pri uslovima promenljivog opterećenja, a procene su da je

takvih sistema u industriji oko 25%. Njihova primena će u velikoj meri biti ograničena na nove kompresorske sisteme, jer retrofiting pogona sa promenljivom brzinom na postojeće mašine nosi niz tehničkih problema.

Optimalni izbor tipa kompresora

U segmentu tržišta kompresora koji obuhvata snage od 10 do 300 kW sada dominiraju vijčani kompresori sa ubrizgavanjem ulja - procenjuje se da oko 75% prodanih kompresora u EU pripada ovoj kategoriji. Pored toga prisutni su i drugi tipovi kompresora koji imaju određene pri nekim karakteristikama potrošnje.

Poboljšanje tehnologije kompresora

Čitav niz napora se ulaže u poboljšanje tehnologije postojećih familija kompresora, ali i u razvoj novih tipova, obično prilagođenih posebnim segmentima industrije. Drugi aspekt istraživanja se tiče poboljšanja proizvodnih metoda, na primer primena užih tolerancija kako bi se redukovala unutrašnja curenja u kompresoru.

Primena sofisticiranih upravljačkih sistema

Sofisticirani upravljački sistemi se primenjuju kako bi se izlazni protok kompresora prilagodio potrebama potrošača. Oni štede energiju optimizacijom tranzicije između radnog stanja pod opterećenjem, bez opterećenja i neradnog stanja kompresora. Kako cena elektronskih upravljačkih tehnologija pada, a familijarizacija sa ovim tehnologijama u industriji raste, njihova se primena rapidno širi i njihove aplikacije na kompresorima su sve češće.

Regeneracija otpadne toplote

Kompresori, po prirodi svog rada, generišu toplotu koja se može pod određenim uslovima iskoristiti za druge funkcije. Kako je ova toplota, uslovno rečeno, besplatna, preporuke za njeno korišćenje zavise od postojanja termičkih potrošača čije karakteristike odgovaraju generisanoj toploti i za koju su, po razumnoj ceni u poređenju sa alternativnim rešenjima, dostupni odgovarajući uređaji (izmenjivači toplote, cevovodi, regulatori, itd.).

Poboljšanje pripreme vazduha pod pritiskom

Oprema za hlađenje, sušenje i filtriranje izaziva pad pritiska, a sušači najčešće troše i električnu energiju ili deo vazduha pod pritiskom za rad i regeneraciju.

Moguće mere su:

- dinamički podesiti stepen sušenja prema spoljnim temperaturnim uslovima. Ovo je primenljivo samo kada se sušenje radi kako bi se održavala temperatura vazduha iznad tačke rose da bi se sprečila kondenzacija u sistemu. Ovo može biti neodgovarajuća mera ako se od sušenja zahteva da zadovolji tačno određene potrebe procesa u pogledu kvaliteta vazduha pod pritiskom.
- Podesiti stepen filtriranja ulja i čvrstih čestica da tačno odgovaraju potrebama sistema. Preterano filtriranje nepotrebno troši energiju.
- Povećati kapacitet filtera. Povećanje broja filtera u paralelnom radu smanjuje brzinu vazduha i time redukuje pad pritiska. Ovo može biti veoma isplativa investicija kako za nove, tako i za postojeće sisteme.

- Povećati ili optimizovati frekvenciju zamene filtera. Zaprpljani filteri povećavaju pad pritiska. Procedure održavanja bi trebalo da obuhvate regularne provere filtera i zamene kada je to nužno. Oprema za automatsko registrovanje i alarmiranje radi upozoravanja da je pad pritiska prešao dozvoljene vrednosti može biti veoma isplativa.

Projektovanje celokupnog sistema

Dva primera problematike sistemskog projektovanja su:

- jedan nivo pritiska ili više nivoa pritiska u sistemu. Tipični sistemi su projektovani da isporučuju vazduh na najvišem pritisku i kvalitetu neophodnom nekom krajnjem korisniku. Ovakav pristup može da izazove nepotrebne troškove energije ako je tako pripremljen vazduh potreban samo malom procentu potrošača. Alternativna rešenja mogu biti:
 - Izgraditi sistem koji isporučuje niži pritisak i dodati pojačivač pritiska za one potrošače kojima je potreban viši pritisak.
 - obezbediti odgovarajuću filtraciju za većinu aplikacija i dodati namensko filtriranje na mestima primene za one uređaje kojima je to potrebno.
- ograničiti varijacije pritiska u sistemu. Neadekvatni upravljački sistem mogu dovesti do velikih oscilacija pritiska što nepotrebno troši energiju. Kada pojedini krajnji korisnici imaju veoma stohastičke zahteve u pogledu potrošnje vazduha pod pritiskom, može biti korisno da se postavi dodatni rezervoar blizu tih uređaja kako bi redukovao varijacije pritiska.

Redukcija gubitaka pritiska zbog trenja u cevovodima

Gubici pritiska u mrežama distribucije vazduha pod pritiskom zavise od više faktora:

- topologije (prsten ili mreža, itd.),
- geometrije (prečnik cevovoda, radijus krivina),
- korišćenih materijala, itd.

Korektno projektovanje i izvođenje distributivne mreže može optimizovati frikcione gubitke. Bez obzira na značaj mreže većina postojećih sistema vazduha pod pritiskom ima neoptimalne distributivne mreže.

- U vreme kada se fabrika izgrađuje, mrežu za distribuciju vazduha pod pritiskom često instaliraju firme koje rade i sve ostale instalacione poslove vezane za fluide. Ova preduzeće često nisu dovoljno kvalifikovana za projektovanje i instalaciju mreže za distribuciju vazduha pod pritiskom.
- Poddimenzionisani cevovodi su veoma čest slučaj. Čak i sistemi koji su inicijalno bili dobro projektovani postaju "gutači energije", ako se potrošnja vazduha pod pritiskom neprekidno povećava i pređe preko nivoa za koji je sistem inicijalno bio projektovan.
- Nedostatak slavina za prekid dovodenja vazduha pod pritiskom u delove sistema koji su van upotrebe ili za mašine koje ne rade tokom druge i treće smene.

Kako je teško i skupo poboljšavati postojeću mrežu, korektno projektovanje i instalacija, što uključuje i pretpostavke za buduća proširenja sistema, predstavljaju značajan faktor za izgradnju dobrog sistema.

Redukcija curenja vazduha

Korektno projektovanje i instalacija mreže mogu u velikoj meri eliminisati mesta curenja vazduha, na primer, primenom savremenih uređaja za odstranjivanje kondenzata bez gubitaka vazduha ili specificiranjem brzorastavljajućih spojnika visokog kvaliteta. Primena ultrazvučnih pištolja za otkrivanje mesta curenja u velikoj meri smanjuje gubitke.

Merenje i praćenje performansi sistema

Merenje i praćenje performansi sistema, samo po sebi, ne povećava energetske efikasnosti, ali obično predstavlja prvi korak u poboljšanju energetske efikasnosti zbog dva osnovna razloga:

- Merenje potrošnje vazduha i energije za njegovu proizvodnju je od suštinskog značaja pri ustanovljavanju da li su promene u praksi održavanja ili investiranja u opremu troškovno opravdane, ili ne. Sve dok je cena jedinice potrošenog vazduha pod pritiskom nepoznata, teško je inicirati menadžerski proces neophodan za poboljšanje sistema.
- Praćenje performansi sistema je vredan alat za otkrivanje degradacije performansi ili promena u količini ili kvalitetu korišćenja vazduha pod pritiskom.

Tri osnovna parametra - protok vazduha, pritisak vazduha i potrošnja električne energije, moraju se meriti i beležiti radi evaluacije performansi sistema. Mada ovo izgleda jednostavno u principu, interpretacija ovih podataka može biti teška, naročito pri promenljivim uslovima potrošnje.

Merenje protoka vazduha pod pritiskom takođe povlači određene tehničke probleme i retrofit pouzdane merne opreme može biti težak ili čak i nemoguć zadatak ako se o tome nije vodilo računa u vreme projektovanja i instalacije sistema. Na primer, najčešći tip merača protoka mora se instalirati u deo cevovoda gde nema turbulencija, a koji mora biti nekoliko puta duži od njegovog prečnika. U nekim sistemima, nema adekvatnog mesta za instalaciju protokomera. Zbog toga se predlaže da veliki sistemi i sistemi srednje veličine moraju da se projektuju i instaliraju tako da se omogući merenje protoka vazduha.

- Potencijal primene mera za povećanje energetske efikasnosti

Akcije koje se odnose na održavanje i rad sistema, a naročito frekvencija zamene filtera i detekcije mesta curenja predstavljaju glavne mogućnosti za uštedu energije. Ove mere se takođe mogu primeniti u bilo kom trenutku životnog ciklusa komponenti sistema vazduha pod pritiskom.

U američkoj studiji je data procena primenljivosti ovih mera na osnovu mišljenja većeg broja eksperata. U tabeli 10.5 date su samo procene prosečnih ušteda u odnosu na najznačajnije mere za povećanje energetske efikasnosti pod uslovom da je povraćaj investicije najviše tri godine.

Tabela 10.5: Prosečne uštede u odnosu na najznačajnije mere za povećanje energetske efikasnosti

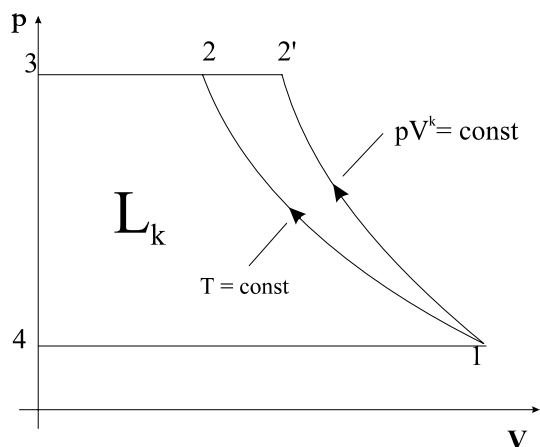
Mere za uštedu energije	Primenljivosti %		Dobitak %	Potencijalni doprinos
	Od-do	Prosečno		
Smanjenje ukupnih sistemskih zahteva	20 - 40	30	20	0.6
Usklađivanje kompresora sa opterećenjem	5-15	10	3	0.3
Poboljšavanje upravljanja kompresorima	15-40	25	10	2.5
Poboljšavanje komponenti kompresora	5-20	15	5	0.8
Rad i održavanje	50-80	75	10	7.5
Ukupne uštede				17.1

- **Primeri zadataka:**

1. Klipni kompresor usisava vazduh ($R = 287 \text{ J/kgK}$) pritiska $p_1 = 1 \text{ bar}$ i temperature $t_1 = 20^\circ\text{C}$ i sabija ga do $p_2 = 6 \text{ bar}$. Ako je kapacitet kompresora $\dot{V} = 1200 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ odrediti :

- 1) Masu usisanog vazduha u toku 1 h
- 2) Teorijsku snagu kompresora pri izotermnom i adijabatskom sabijanju pri kome je temperatura nakon sabijanja $t_2 = 240^\circ\text{C}$.
- 3) Potrošnju vode za hlađenje kod ciklusa sa izotermnim sabijanjem ako se ista zagreje za $\Delta t = 10^\circ\text{C}$
- 4.) Hod klipa u cilindru i zapreminu rezervoara ako je koef. punjenja $\lambda = 0.87$; prečnik cilindra $D = 120 \text{ mm}$, br. obrtaja $n = 400 \text{ obr./min}$.

Rešenje :



1-2 - Kompresija (sabijanje)

2-3 - Izduvavajne komprimovanog vazduha

3-4 - U 3 se zatvara izduvni ventili , a u 4 otvara usisni ventil

4-1 - Usisavanje vazduha

1) u toku 1h kompresor usisa :

$$\dot{m} = \frac{p_1 \dot{V}}{RT_1} = \frac{10^5 \cdot 1200}{287 \cdot 293} = 1427 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

2) Rad sabijanja 1kg vazduha pri izotermnom procesu :

$$l_i = RT_1 \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) = 287 \cdot 293 \ln \frac{1}{6} = -150671 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cong -150.67 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

a pri adijabatskom :

$$l_a = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2) = \frac{287}{1.4-1} (293 - 513) = -157850 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cong -157.85 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Snaga kompresora u jednom i drugom slucaju je :

$$P_i = \dot{m} \cdot |l_i| = \frac{1427}{3600} \cdot 150.67 = 59.7 \text{ kW}$$

$$P_a = \dot{m} \cdot |l_a| = \frac{1427}{3600} \cdot 157.85 = 62.6 \text{ kW}$$

3) Potrošnja vode za hlađenje bice :

$$\dot{m}_v = \frac{\dot{Q}}{c \cdot \Delta t} = \frac{215006}{4.19 \cdot 10} = 5131.4 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q = \dot{m} |l_i| = 1427 \cdot 150.67 = 215006 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

$$4) \dot{V} = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot \lambda \cdot s \cdot n \left[\frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right]$$

ili praktičniji obrazac :

$$\dot{V} = 47 \cdot D^2 \cdot \lambda \cdot s \cdot n \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$$

pa je hod klipa :

$$s = \frac{\dot{V}}{47 \cdot D^2 \cdot \lambda \cdot n} = \frac{1200}{47 \cdot 0.12^2 \cdot 0.87 \cdot 400 \cdot 60} = 0.085 \text{ m} = 8.5 \text{ cm}$$

Zapremina rezervoara pri broju uključivanja i isključivanja pogonskog elektromotora maksimalno 15 puta na čas :

$$V = 0.9 \cdot \dot{V} = 0.9 \cdot 20 = 18 \text{ m}^3$$

$$\text{gde je: } \dot{V} = \frac{1200}{60} = 20 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

Zapremina rezervoara pri broju uključivanja i isključivanja motora od 15-100 je :

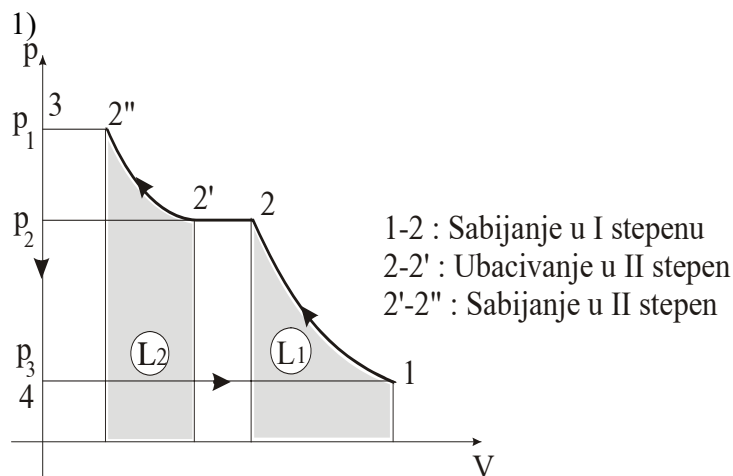
$$V = 0.4 \cdot \dot{V} = 0.4 \cdot 20 = 8 \text{ m}^3$$

2. Dvostepeni klipni kompresor usisava vazduh pritiska $p_1=1\text{bar}$ i temperature $t_1=15^\circ\text{C}$ i sabija ga u prvom stepenu do $p_2=8\text{ bar}$, a potom u drugom do $p_3=12\text{ bar}$. Kapacitet

kompresora je $\dot{V} = 1000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$. odrediti :

- 1) Nacrtati p-V dijagram ciklusa kompresora
- 2) Masu usisanog vazduha u toku 3h rada
- 3) Naći odnos jediničnih radova kod prvog i drugog stepena izotermnog sabijanja

Rešenje :



2) $m=3629\text{ kg}$

3) $\frac{l_1}{l_2} = 5.13$

3. Metar kubni vazduha sabija se adijabatski.

Ako su : $p_1 = 1\text{bar}$; $T_1 = 300\text{ K}$; $p_2 = 12\text{ bar}$

Potrebno je naći :

- 1) Parametre stanja u tački 2.
- 2) Tehnički rad sabijanja

Rešenje

1) $p_1 V_1^k = p_2 V_2^k$

$$V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1/k} = 1 \cdot \left(\frac{1}{12} \right)^{1/1.4} = 0.1695 \text{ m}^3$$

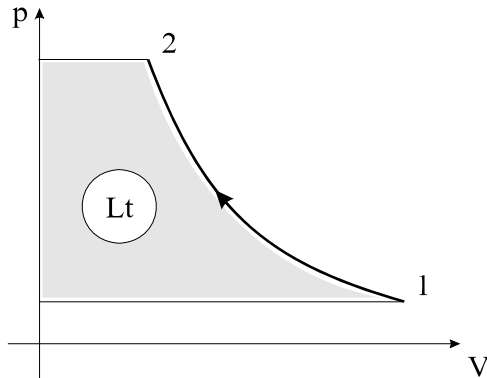
Iz jednačine stanja se dobija :

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

$$T_2 = T_1 \cdot \frac{p_2 V_2}{p_1 V_1} = 300 \cdot \frac{12 \cdot 0.1695}{1 \cdot 1} = 610.2 \text{ K}$$

2) Za tehnički rad je merodavna promena pritiska tj. :

$$L_t = \int_{p_1}^{p_2} V(p) \cdot dp$$



U opstem slučaju za politropski proces je :

$$L_t = n \cdot L$$

gde je :

n - koeficijent politrope

L - zapreminski rad za politropski proces

S toga , za adijabatsko sabijanje imamo :

$$L_t = k \cdot L = \frac{k}{k-1} (p_1 V_1 - p_2 V_2) = \frac{1.4}{1.4-1} \cdot (1 \cdot 10^5 \cdot 1 - 12 \cdot 10^5 \cdot 0.1695) = -3.619 \cdot 10^5 J = -361.9 kJ$$

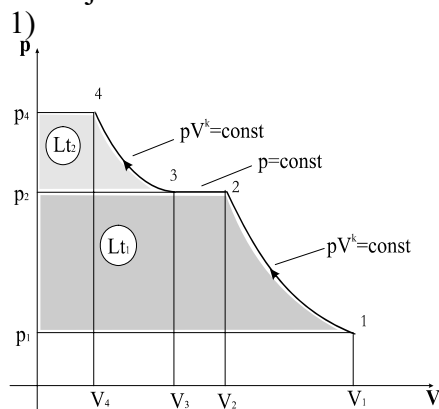
4. Metar kubni vazduha sabija se adijabatski u dvostepenom kompresoru sa medjustepenim hladnjakom. Ako su:

$$p_1 = 1 \text{ bar} ; T_1 = 300 \text{ K} ; p_2 = p_3 = 6 \text{ bar} ; T_3 = T_1 ; \rho_1 = 1.29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} ; c_{p_v} = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

Potrebno je naći :

- 1) Predstaviti promene vazduha u p-V dijagramu
- 2) Ukupan tehnički rad sabijanja
- 3) Odvedenu količinu toplote u medjuhlادjenju

Rešenje :



$$2)V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1/k} = 1 \cdot \left(\frac{1}{6}\right)^{1/1.4} = 0.278 \text{ m}^3$$

$$T_2 = T_1 \frac{p_2 V_2}{p_1 V_1} = 300 \frac{6 \cdot 0.278}{1 \cdot 1} = 500 \text{ K}$$

$$L_{t_1} = \frac{k}{k-1} (p_1 V_1 - p_2 V_2) = \frac{1.4}{1.4-1} \cdot (1 \cdot 10^5 \cdot 1 - 6 \cdot 10^5 \cdot 0.278) \cong -233.8 \text{ kJ}$$

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_3 V_3}{T_3} \text{ i uslov } T_1 = T_3 \text{ daju:}$$

$$V_3 = \frac{p_1 V_1}{p_3} = \frac{1 \cdot 0.278}{6} = 0.0463 \text{ m}^3$$

$$V_4 = V_3 \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{1/k} = 0.0463 \cdot \left(\frac{6}{12}\right)^{1/1.4} = 0.0463 \cdot 0.6095 = 0.02822 \text{ m}^3$$

$$L_{t_2} = \frac{k}{k-1} (p_3 V_3 - p_4 V_4) = \frac{1.4}{1.4-1} (6 \cdot 10^5 \cdot 0.0463 - 12 \cdot 10^3 \cdot 0.02822) \cong -21.3 \text{ kJ}$$

Ukupan tehnički rad bice:

$$L_t = L_{t_1} + L_{t_2} = -(233.8 + 21.3) = -255.1 \text{ kJ}$$

$$3)m = \rho_1 \cdot V_1 = 1.29 \cdot 1 = 1.29 \text{ kg}$$

$$Q = mc_{pv}(T_3 - T_2) = 1.29 \cdot 1 \cdot (300 - 500) = -285 \text{ kJ}$$

5. Piljevina koja nastaje u procesu rezanja na kružnoj pili se pneumatski transportuje putem ventilatora (2) od usisne kape (1) koja je postavljena iznad mašine do separatora-ciklona (3) silosa (4). Ista sagoreva u ložištu kotla (5). Odrediti porast pritiska (napon) na ventilatoru, ako su:

- o kapacitet ventilatora $V^\circ = 10 \text{ m}^3/\text{h}$
- o pritisak na ulazu u separator $p_4 = 1,2 \text{ bar}$
- o razlika visina između usisne kape i vrha separatora $h_4 = 8 \text{ m}$
- o brzina piljevine na ulazu u separator $W_4 = 10 \text{ m/s}$
- o unutrašnji prečnik cevovoda $d = 140 \text{ mm}$, a njegova dužina 40 m
- o koeficijent lokalnog otpora: suženja i proširenja 0,9; ventila 0,8; kolena 0,6; a koeficijent otpora trenja $\lambda = 0,035$.

Rešenje:

Bernulijeve jednačine za preseke 1÷2 i 3÷4 daju:

$$\begin{aligned} p_1 + \rho g \cdot h_1 + \rho W_1^2/2 &= p_2 + \rho g \cdot h_2 + \rho W_2^2/2 + \rho \cdot (\zeta_s + \zeta_k + \zeta_v + \lambda l_{12}/d_{12}) W_2^2/2 \\ p_3 + \rho g \cdot h_3 + \rho W_3^2/2 &= p_4 + \rho g \cdot h_4 + \rho W_4^2/2 + \rho \cdot (\zeta_v + 3\zeta_k + \zeta_p + \lambda l_{34}/d_{34}) W_3^2/2 \end{aligned}$$

Kako je napon razlika energija jedinične mase pre i posle pumpe i kako je:

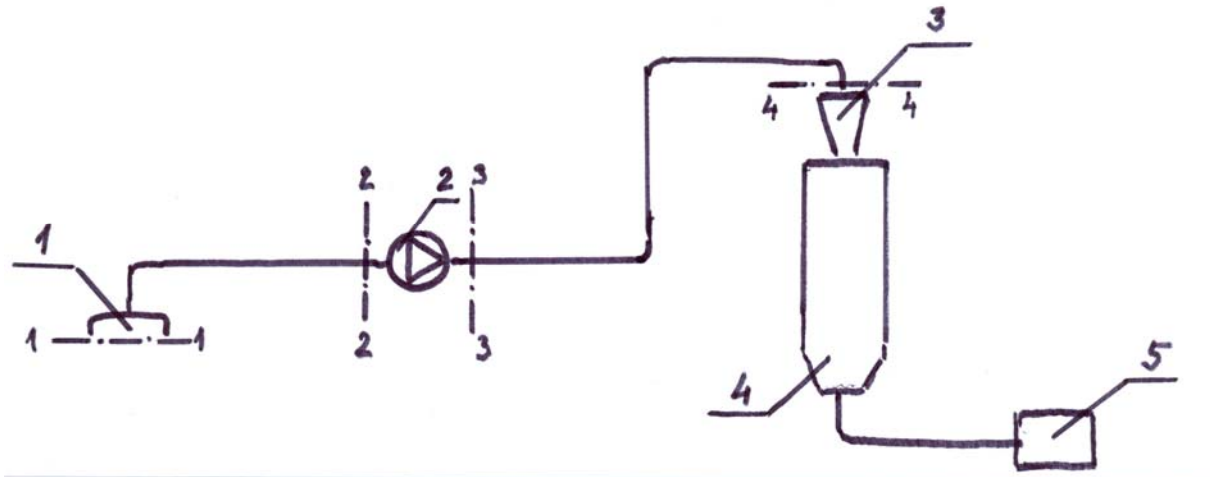
$$h_1 = 0$$

$$h_2 = h_3$$

$$W_1 = 0$$

dobija se:

$$p_3 - p_2 + \rho/2 \cdot (W_3^2 - W_2^2) = p_4 - p_1 + \rho g \cdot h_4 + \rho/2 W_4^2 + \rho/2 \cdot [(\zeta_v + 3\zeta_k + \zeta_p + \lambda l_{34}/d_{34}) \cdot W_3^2 + (\zeta_s + \zeta_k + \zeta_v + \lambda l_{12}/d_{12}) W_2^2]$$



Kako je za $d_{12} = d_{34} = d$, $W_2 = W_3 = V^\circ/A = 4 V^\circ/d^2 p$ to je:

$$\Delta p = p_3 - p_2 = p_4 - p_1 + \rho g \cdot h_4 + \rho/2 W_4^2 + 8\rho/d^4 p^2 \cdot (\zeta_s + \zeta_p + 4 \zeta_k + 2 \zeta_v + \lambda l_{14}/d) \cdot V^{\circ 2} = 10^5 \cdot (1,2 - 1) + 1 \cdot 9,81 \cdot 8 + 10^2 + 8/0,14^4 p^2 \cdot (2 \cdot 0,9 + 4 \cdot 0,6 + 2 \cdot 0,8 + 0,035 \cdot 40/0,14) \cdot 10/3600 = 20271 \text{ Pa}$$

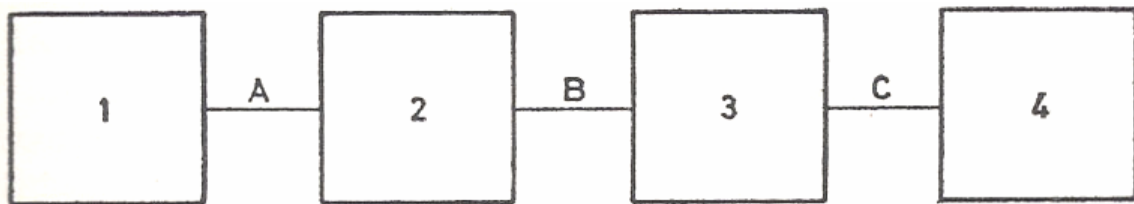
$$\Delta p = 20,27 \text{ kPa}$$

IV HIDRAULIKA

11. 1 Osnovni princip hidrostatičkog prenosa snage

Prenos energije fluidom, korišćenjem njegove potencijalne energije, može se vršiti u dva vida:

- pretvaranjem mehaničke energije u translatorno kretanje izlazne veličine i
- pretvaranjem mehaničke energije u obrtno kretanje izlazne veličine.



Slika 141: Principijelna šema hidrostatičkih sistema transmisije

Hidrostatički sistemi transmisije sastoje se iz (sl. 141):

- izvora mehaničke energije, gde je nosilac energije rotaciono kretanje (1);
- pretvarača mehaničke energije u hidrostatičku energiju (2);
- pretvarača hidrostatičke energije u mehaničku energiju (3);
- potrošača mehaničke energije (4).

U zavisnosti od pretvarača hidrostatičke u mehaničku energiju dobijaju se sistemi sa translatornim kretanjem (hidrocilindri) i obrtnim kretanjem (hidromotori).

Pojam hidrostatičke transmisije nije tačno određen, tako da se vrlo često ovim pojmom obuhvataju oba načina transmisije – i sa obrtnim i sa translatornim kretanjem izlazne veličine. U poslednje vreme, više se koristi pojam hidrostatičke transmisije samo kao sistema koji obezbeđuje obrtno kretanje izlazne veličine.

11.2 Hidrauličke komponente

Hidrauličke komponente predstavljaju hidraulične mašine i uređaji koji rade sa tečnostima pod pritiskom i njihov rad se zasniva na zakonima mehanike fluida. Za prenošenje energije između hidrauličkih komponenti u hidrauličkim sistemima koriste se mineralna i sintetička ulja, kao i njihove mešavine sa vodom (emulzije).

Mineralna ulja su do sada najčešće upotrebljavana zbog svojih karakteristika koja proizilaze iz prirodnih svojstava ulja. U novije vreme proučava se i primena emulzija i u industrijskim postrojenjima u kojima do sada nisu bila primenljivana. Pri odlučivanju za vrstu ulja, pored karakteristika samih ulja, odlučujuću ulogu ima cena i mogućnost nabavke.

Ulja u hidrauličkom sistemu treba da:

- budu stabilna u eksploataciji, i da zadržavaju hemijska i fizička svojstva pri promeni temperature, pritiska i brzine strujanja.
- budu neutralna u odnosu na plastične mase, zaptivke, metale i zaštitu (premaze, farbe, lakove i sl.)
- imaju dobra mazivna svojstva

- imaju malu promenu viskoznosti sa promenom temperature i pritiska u radnom opsegu
- imaju dobru toplotnu provodljivost
- imaju malu količinu i lako izdvajanje vazduha, brzo razlaganje pene, kao i niz drugih osobina.

11.3 Hidrauličke pumpe i motori

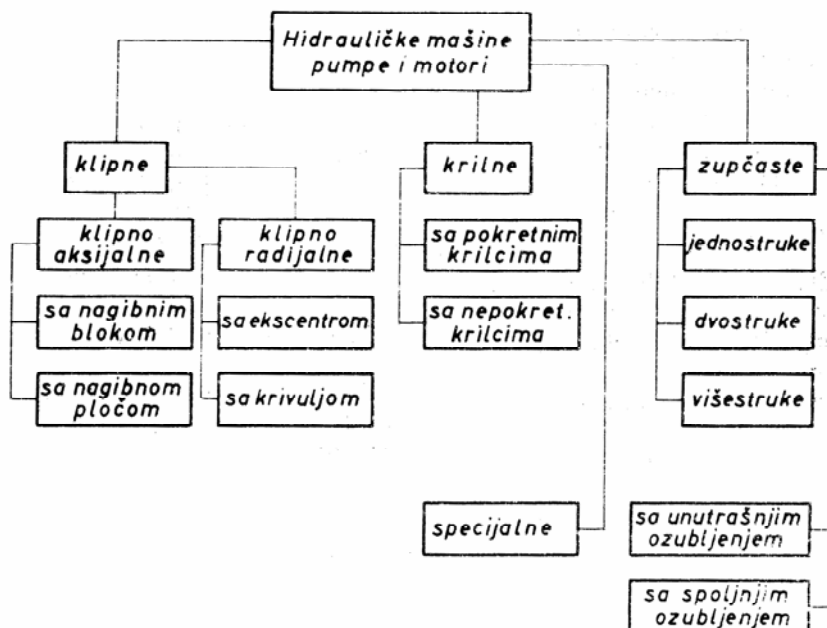
Pod ovim pojmom podrazumevamo mašine koje pretvaraju mehanički rad u hidrostatičku energiju (pumpe) i obratno, koje pretvaraju hidrostatičku energiju u mehanički rad (motori). Zbog sličnosti konstrukcije iste vrste pumpe i motora, karakteristike i osnovne relacije za proračun mogu se dobiti analizom samo jedne od njih.

Pumpa čini osnovni element pogonske grupe hidrauličkog sistema (kola). Radni element (rotor) pumpe može da izvodi: translatorno, rotaciono ili složeno rotaciono-translatorno kretanje. Periodičnim kretanjem rotora u radnoj komori ostvaruje se proces usisavanja i potiskivanja radnog fluida (ulja) u pumpi.

Prema načinu formiranja radne zapremine hidraulične mašine (pumpe i motori) se mogu podeliti kao što je to prikazano na slici 142.

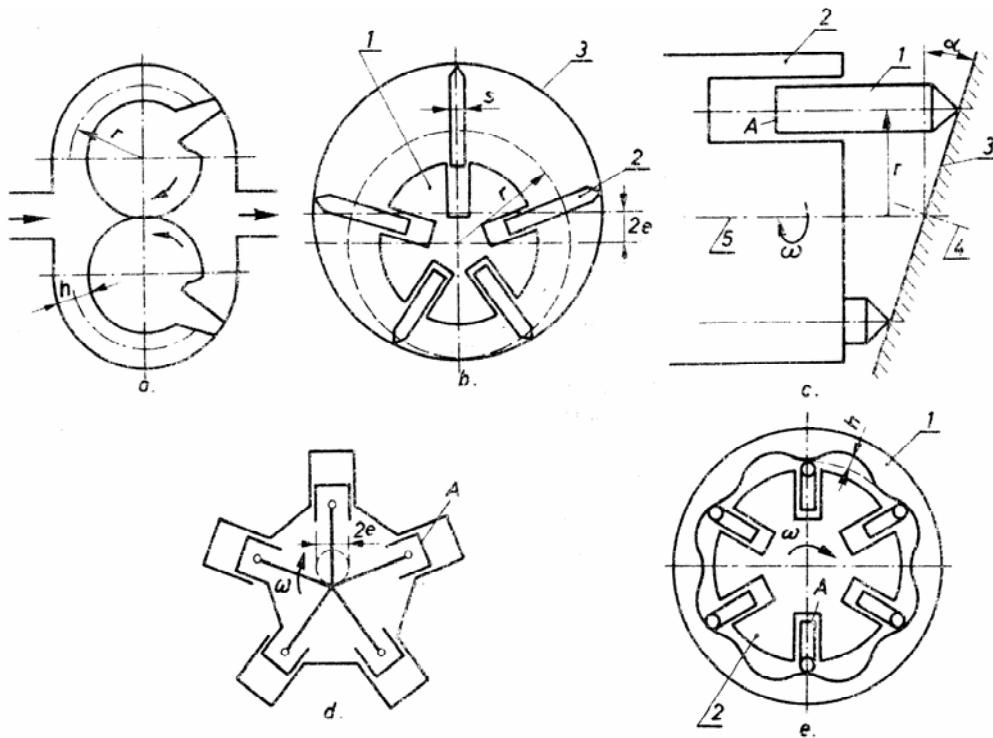
Pored ove najopštije klasifikacije hidrauličnih mašina, one se mogu podeliti i prema promeni radne zapremine na hidraulične mašine sa:

- konstantnom radnom zapreminom,
- promenljivom radnom zapreminom (kontinualno ili diskretno).



Slika 142: Klasifikacija hidrauličnih mašina

Načini promene radne zapremine i veličine koje je određuju kod osnovnih tipova hidrauličnih mašina dati su na slici 143.



Slika 143: Geometrijske radne zapremine različitih tipova hidrauličnih mašina

11.4 Osnovni parametri rada hidrauličnih mašina

Pod pojmom statički parametri podrazumevaju se parametri koji utiču na statičke karakteristike, tj. oni koji definišu stacionarni režim rada i opisuju mašine u osnovnoj funkciji. U tom smislu osnovni parametri su:

- specifični protok,
- pritisak,
- broj obrataja,
- ukupni stepen korisnosti (definisan kao proizvod zapreminskog i mehaničkog stepena iskorišćenja)

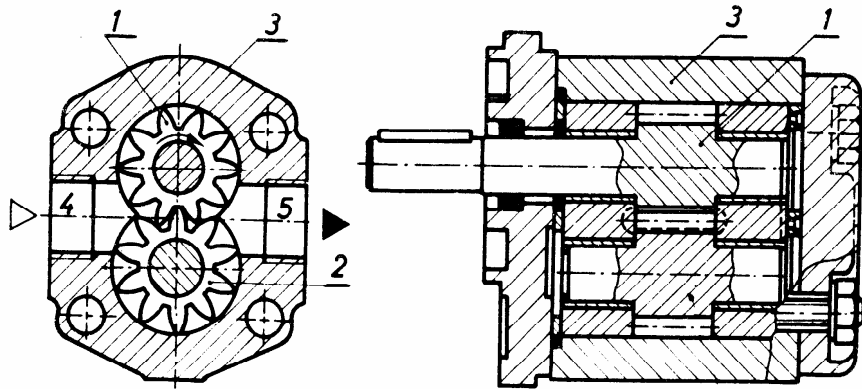
Zapreminski gubici se javljaju usled curenja izmedju prostora koji se nalazi pod različitim pritiscima i zbog nepotpunog popunjavanja radne zapremine usled povećanja hidrauličkih otpora izazvanih velikom brzinom kretanja rotora mašine.

11.5 Hidraulične mašine

a) Zupčaste pumpe

Zbog jednostavnosti konstrukcije (slika 144), niske cene i dobrog radnog veka uvek se ugrađuju u hidraulični sistem kada je to moguće. Spadaju u grupu hidrauličnih mašina sa konstantnom radnom zapreminom. Pri rotacionom (obrtnom) kretanju zupčastog para 1-2, od kojih je jedan pogonski (povezan sa elektro-motorom) a drugi gonjeni, transportuje se radni fluid u medjuzubljlama ovih zupčanika ograničenim kućištem 3. Pri ovome jedna manja

količina ulja ostaje zarobljena između zubaca jednog zupčanika i međuzublja drugog u samoj zoni sprezanja, pa se u cilju izbegavanja nemirnog rada pumpe ovaj deo ulja odvodi kroz posebne bočne kanale ka potisnom vodu. Radni fluid se inače uvlači preko ulaznog otvora 4, a nakon povećanja pritiska u pumpi se potiskuje kroz izlazni otvor 5.



Slika 144: Zupčasta hidraulična pumpa

Da bi se povećao kapacitet pumpe, a bez značajnijeg povećanja njenih gabarita, prave se pumpe sa više zupčanika koje dobijaju pogon od jednog centralnog, čime se dobijaju nekoliko međusobno nezavisnih mlazeva.

Zupčaste pumpe mogu se izvoditi i sa unutrašnjim ozubljenjem i sa promenjivim protokom, ali se ovo rešenje u praksi vrlo retko sreće.

Geometrijska zapremina pumpe imajući u vidu sliku 139. je:

$$V = 2h \cdot b \cdot 2r \text{ (cm}^3\text{)}$$

gde je:

b (cm) – širina radne zapremine (zupčanika).

Teorijski zapreminski protok pumpe sa dva zupčanika može se sračunati preko obrasca:

$$\dot{V}_T = 2\pi \cdot d_0 \cdot m \cdot n \cdot 10^{-6} \text{ (m}^3\text{/min)}$$

gde su:

d_0 (cm) – prečnik podeonog kruga pogonskog zupčanika

m (cm) – modul zupčanika

n (o/min) – br. obrtaja pogonskog zupčanika

Stvarni protok (kapacitet pumpe $\dot{V}$) dobija se množenjem teorijskog sa zapreminskim stepenom iskorišćenja (obično između 0,75÷0,98). Ukupni stepen iskorišćenja, u zavisnosti od veličine pumpe obično ne prelazi 0,9.

Jedinični protok predstavlja stvarni sveden je na jedični ugao:

$$q = \frac{\dot{V}_T \cdot \eta_V}{2\pi}$$

Pogonska snaga pumpe određuje se prema obrascu:

$$P = p \cdot \dot{V}$$

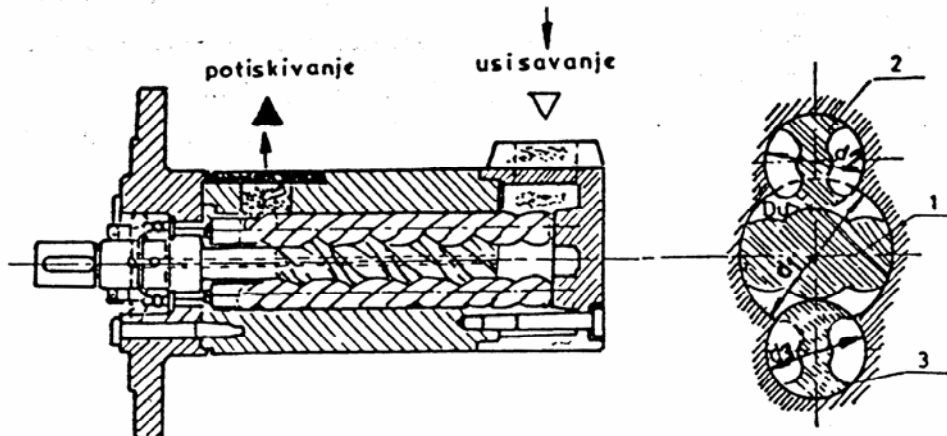
gde je:

p (Pa) – radni pritisak pumpe

Radni pritisak u zavisnosti od namene pumpe može biti različit i obično je u opsegu od 5 do 210 bar. Kod mašina od kojih se zahteva naročito miran rad kao na pr. kod mašine za precizno bušenje ili brusilice radni pritisak je oko 15bar, a brojevi obrtaja 400÷800 o/min. Takodje, kod korišćenja ovih pumpi za potiskivanje ulja za podmazivanje njihov br. obrta obično ne prelazi 300 o/min. Za pritiske između 50 i 120 bar, i za protoke između 10 i 80 l/min, primenjuju se brojevi obrtaja do 1500 o/min, a za visoke pritiske i male protoke, mogu dostići vrednost i od 3000 o/min.

b) Zavojne pumpe

Ove pumpe putem rotora koji je u vidu zavojnih vretena sabijaju i potiskuju radni fluid od ulaznog do potiskog otvora koji se nalaze na suprotnim krajevima rotora. Ovih zavojnih vretena može biti više (obično tri ili pet), gde su kod rešenja od tri zavojna vretena dva bočna vodjena, a srednje vodeće – pogonsko (slika 145).



Slika 145: Zavojna pumpa sa tri vretena: 1-vodeće vreteno, 2,3-vodjena vretena

Zavojne pumpe obezbeđuju bešuman i pouzdan rad, ravnomeran protok ulja, zbog čega su dosta primenjene u hidrauličnim sistemima. Naročitu primenu su našli kod automatizacije mašina i procesa, zbog lake regulacije i upravljanja njihovim radom. Pumpe se upotrebljavaju za pritiske od 25÷100 bar, a optimalan rad se postiže pritiskom od 50bar.

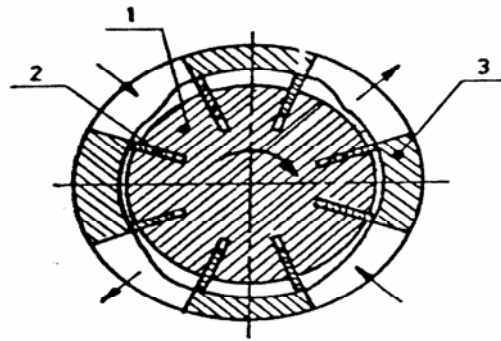
Nedostatak im je velika osetljivost na pritisak u usisnom vodu, što se primećuje po jakom šumu.

c) Krilne pumpe

Izgled ovakve pumpe (motora) prikazan je na slici 146.

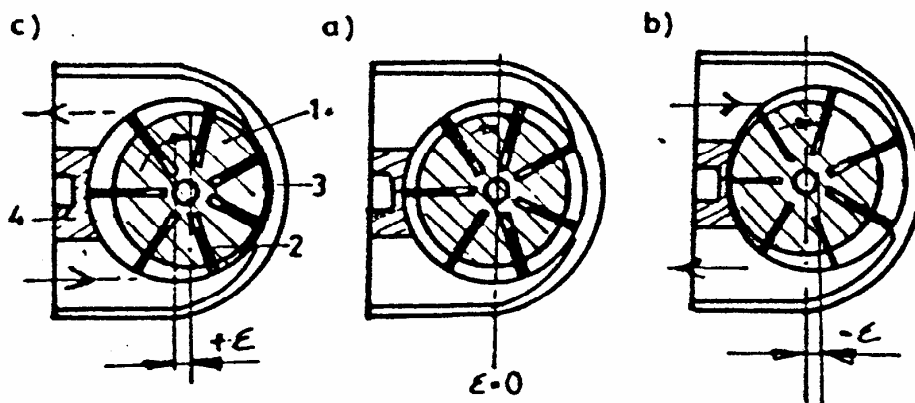
Rotor (1) ima radijalno urezane proreze u kojima se nalaze radijalno pomerljive lopatice (2) u vidu ploča. Prilikom obrtanja rotora, lopatice prate unutrašnju konturu kućišta (3) pri čemu svake dve lopatice formiraju po jednu čeliju, čija se zapremina po jednom obrtu dva puta povećava i dva puta smanjuje, ostvarujući na taj način dejstvo usisavanja i potiskivanja ulja.

Krilne pumpe se dosta često koriste za regulaciju brzine glavnog i pomoćnog kretanja kod mašina za preradu drveta. Uglavnom se projektuju za protoke 2-300 l/min pri 1500 o/min, a za pritiske 70÷140 bar.



Slika 146: Višećelijska krilna pumpa konstantnog kapaciteta: 1-rotor, 2-lopatice, 3-kućište

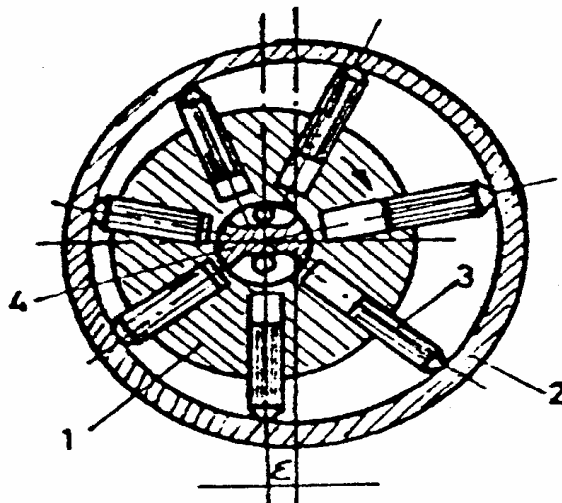
Kod krilnih pumpi moguća je regulacija protoka, a sa tim i promena smera kretanja i brzine proticanja radnog fluida. Ovo se postiže pomeranjem statorskog prstena (3) u odnosu na rotor (1), kao što je to prikazano na slici 147.



Slika 147: Krilna pumpa promenljivog kapaciteta

d) Radijalno klipne pumpe

Konstrukcija ove pumpe slična je krilnoj pumpi (slika 148).



Slika 148: Radijalno klipna pumpa

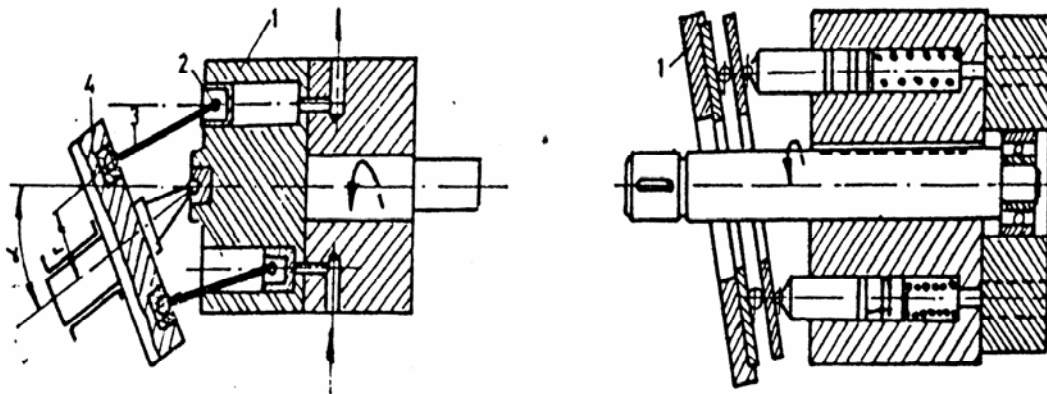
U radijalne otvore rotora (1) postavljeni su klipovi (3), koji se usled obrtanja ekscentrično postavljenog rotora izvlače i uvlače u njega. Rotor se obrće oko nepomičnog stožera (4), koji na mestu naleganja rotora sa gornje i donje strane usečen da bi se preko aksijalnih otvora sa gornje strane uspostavila veza sa usisnim vodom, a sa donje strane sa potisnim. Prilikom obrtanja rotora, klipovi koji se nalaze u gornjoj polovini rotora vrše kroz gornji aksijalni otvor stožera usisavanje tečnosti, a kad klipovi usled daljeg obrtanja bivaju radijalno potisnuti, oni kroz donji usek stožera potiskuju ulje u potisni vod.

Da bi se obezbedila ravnomernost u radu, ove pumpe se obično prave sa neparnim brojem klipova ($5 \div 11$). Omogućavaju veće radne pritiske (i do 350 bar), pri malim hidrauličnim gubicima zahvajući boljim mogućnostima zaptivanja cilindričnih površina klipa i cilindra.

e) Aksijalne klipne pumpe

Kod ovih pumpi, za razliku od radijalnih, klipovi su aksijalno pokretni. Postoje dve konstrukcije ovih pumpi (slika 149):

- a) sa nagibnim blokom (diskom)
- b) sa nagnutom pločom



Slika 149: Aksijalno klipna pumpa: a) sa nagibnim blokom: 1-rotor, 2-klip, 3-poluge, 4-disk; b) sa nagnutom pločom: 1-nepokretna nagnuta ploča.

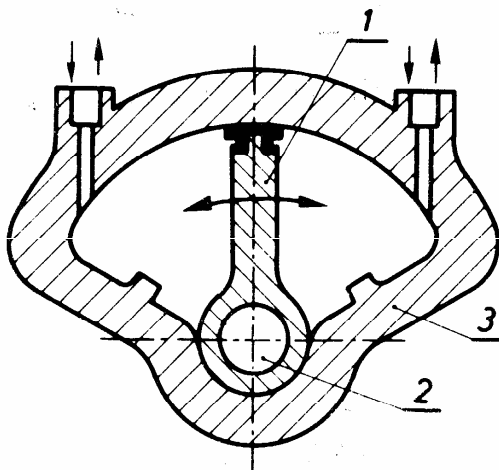
Kod pumpe sa nagibnim blokom (sl.149a) pri obrtanju rotora (1) se istovremeno obrće i disk (4) posredstvom centralnog zgloba, što izaziva pomeranje klipova u cilindrima, a time i usisavanje i potiskivanje radnog fluida. Kod druge varijante ove pumpe, sa nagnutom pločom (sl. 149b), hod klipova ostvaren je zahvaljujući nepokretno nagnutoj ploči (1) sa aksijalnim ležištem za čiji su pokretni prsten vezani klipovi.

Klipno aksijane pumpe kao i motori mogu biti konstantnog ili promenljivog protoka. U uređajima sa konstantnim protokom ne postoji mogućnost promene ugla α nagibnog bloka odnosno nagnute ploče, dok se kod mašina sa promenljivim protokom promenom ovog nagibnog ugla menja i hod klipa, a samim tim i radna zapremina odnosno protok.

Ove pumpe se takodje primenjuju za visoke pritiske (obično do 320 bar), pri brojevima obrta $1500 \div 6000$ o/min.

f) Krilni zakretni motor

Ovaj motor (slika 150) funkcioniše na taj način što se sa jedne strane krilca (1) dovodi ulje pod pritiskom koje krilce, zajedno sa izlaznim vratilom (2), zakreće u jednu stranu. Moment koji vrši ovo zakretanje je konstantan duž celog hoda krilca i zavisi od pritiska ulja, površine krilca i unutrašnjeg prečnika kućišta (3).



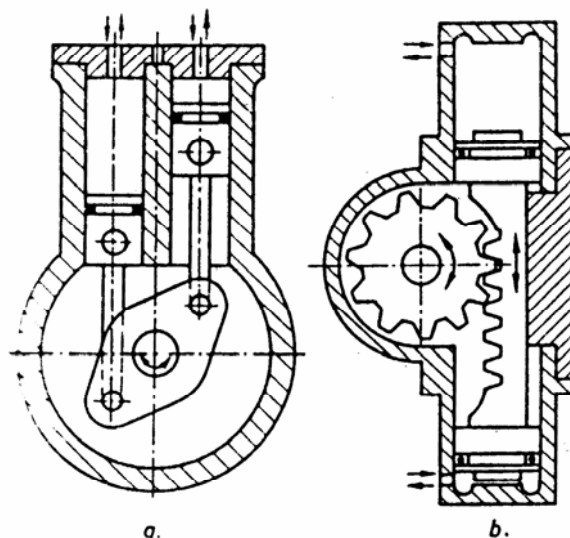
Slika 150: Zakretni motor (aktuator) sa krilcem

Ugao zaokretanja kod ovakvog motora može da iznosi i do 270° , ali se mora voditi računa o krutosti cele konstrukcije da ne bi došlo do lošeg zaptivanja usled deformacije kućišta.

g) Klipni zakretni motor

Za razliku od krilnog motora, ovaj motor ima klipove na koje deluje ulje pod pritiskom. Jedna od konstrukcija je da klipovi budu paralelni (slika 151a), a klipnjače povezane sa klackalicom koja pokreće vratilo. Ulje se dovodi naizmenično iznad jednog pa iznad drugog klipa koji obrću vratilo za određeni ugao. Moment kod ovog tipa motora zavisi od ugla zakretanja. On je obično zbog konstrukcije motora ograničen na max. 100° .

Drugi tip klipnog zakretnog motora (slika 151b) ima klip dvosmernog dejstva koji u sredini ima zupčastu letvu spregnutu sa zupčanicom na izlaznom vratilu. Dovodjenjem ulja pod pritiskom na jednu ili drugu stranu, klip se pomera i zakreće spregnuti zupčanik sa izlaznim vratilom. Moment je konstantan na celom hodu, a ugao zakretanja može iznositi do 180° .



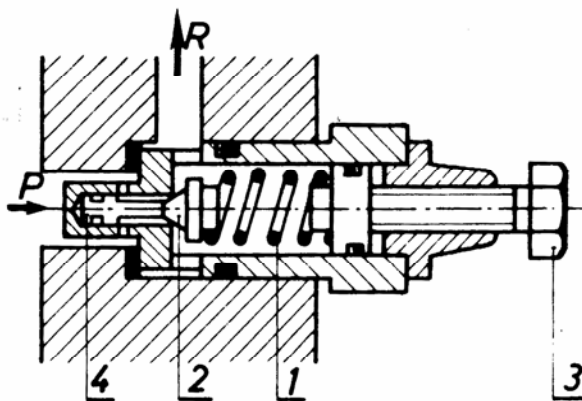
Slika 151: Zakretni motor sa klipovima: a) sa dva paralelno postavljena klipa; b) sa jednim klipom dvosmernog dejstva

11.6 Hidraulični ventili

a) Ventil sigurnosti

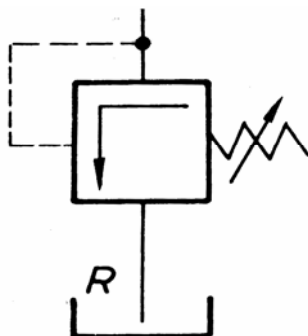
Ovaj ventil naziva se još i prelivni i zadatak mu je da spreči da pritisak u instalaciji predje zadanu vrednost. U zavisnosti od veličine protoka koji treba da propusti, upotrebljavaju se ventili direktnog i ventili indirektnog dejstva.

Ventil sigurnosti direktnog dejstva prikazan je na slici 152, a njegov simbol dat je na slici 153.



Slika 152: Ventil sigurnosti direktnog tipa

Zavrtanjem vijka (3) pritiska se opruga (1) i preko nje sila pritiska prenosi se na radno telo ventila (2). Ovim se zadaje maksimalna vrednost pritiska koja sme da bude prisutna u instalaciji, ali u slučaju prekoračenja te zadate vrednosti telo ventila (2) se otvara i dolazi do prelivanja ulja u pravcu "R".

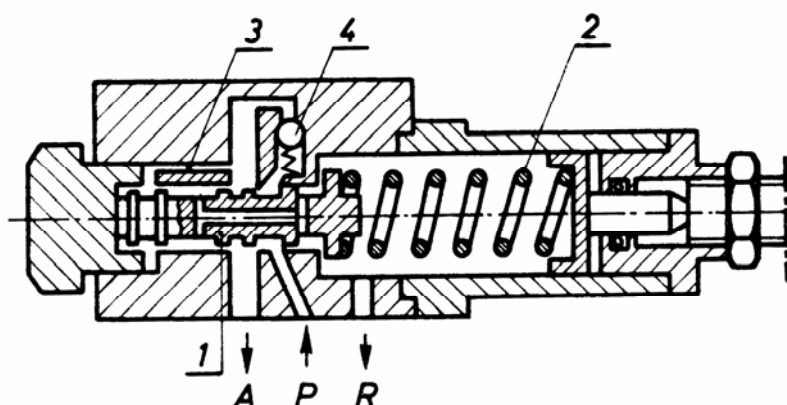


Slika 153: Simbol ventila sigurnosti

Zbog veličine otvora za proticanje i veličine opruge, ovi ventili pogodni su samo za manje protoke. Za veće protoke upotrebljavaju se ventili sigurnosti indirektnog dejstva, koji se inače upotrebljavaju i za puštanje u rad pumpi bez opterećenja.

b) Regulatori pritiska

Regulator pritiska (slika 154) je ventil čiji je zadatak da održava konstantan pritisak u instalaciji ili delu instalacije. Za razliku od ventila sigurnosti, kroz ove ventile tečnost protiče praktično bez otpora kada ventil nije pod pritiskom. Kada pritisak P naraste pomera radno telo (1) ventila u desno, opruga (2) se sabija i ulje ističe ka rezervoaru (R). Kao i kod ventila sigurnosti, i ovde postoje regulatori pritiska direktnog i indirektnog dejstva.

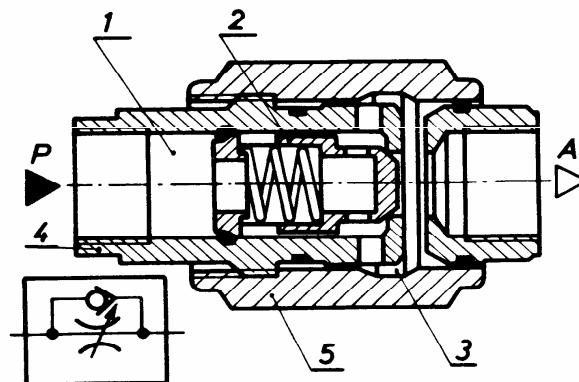


Slika 154: Regulator pritiska direktnog dejstva

Ventili za regulaciju pritiska pri radu deo energije kojom raspolaže radni fluid (ulje) pretvaraju u toplotnu energiju, i ove gubitke pritiska ulja treba imati u vidu prilikom projektovanja instalacije.

c) Prigušnica

Uloga prigušnog ventila (slika 155) je regulisanje protoka kod jednostavnijih instalacija sa pumpom konstantnog kapaciteta. Da bi se obezbedio konstantan protok, potrebno je na mestu prigušenja obezbediti konstantan pad pritiska.



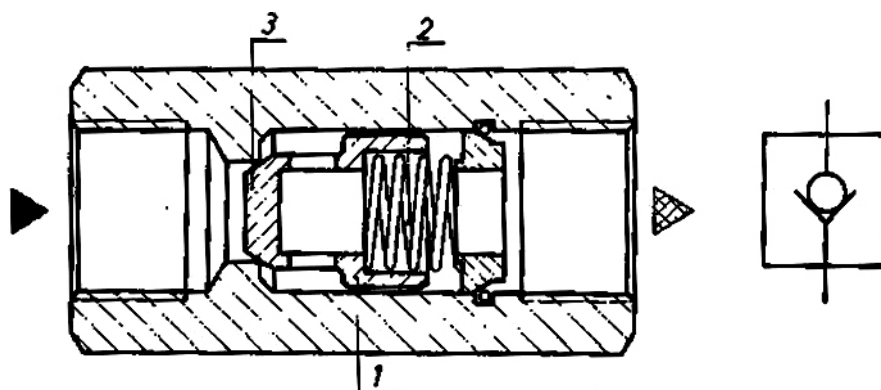
Slika 155: Ventil za prigušenje

Preko radnog tela ventila (2) reguliše se veličina otvora za proticanje a time i količina propuštenog ulja. Strelica u oznaci simbola ventila (slika 155), označava da se radi o podesivom prigušnom ventilu. Jedan od nedostataka ovakvih prigušnih ventila je brzina proticanja ulja kroz procep, usled čega se znatno povećava temperatura ulja i menja njegova viskoznost.

d) Nepovratni ventil

Zadatak ovog ventila je da propusti ulje u jednom, a da spreči njegovo proticanje u suprotnom smeru. Po konstrukciji, spadaju u ventile sa sedištem, tako da omogućavaju zatvaranje bez curenja.

Na slici 156 prikazan je nepovratni ventil kod kojeg je lement za zatvaranje konus (1), kojeg opruga (2) pritiska na sedište (3) u kućištu ventila. Fluid normalno struji u smeru prikazanom strelicama. U slučaju pada pritiska dolazi do njegovog zatvaranja tako da nema strujanja u suprotnom smeru.



Slika 156: Nepovratni ventil

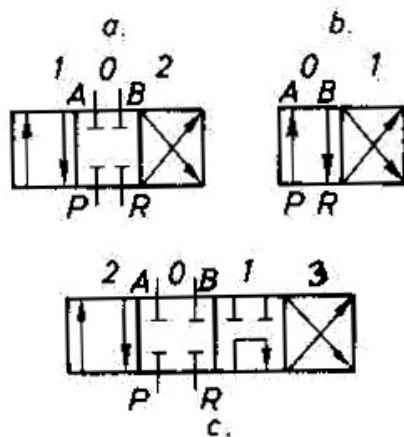
Pritisak otvaranja nepovratnog ventila je između $0,5$ i $3 \cdot 10^5$ Pa. Ovaj ventil može da se ugradi u instalaciju u bilo kom položaju.

Postoje konstrukcije nepovratnih ventila bez opruge, koji se obavezno ugradjuju u vertikalnom položaju, da bi konus, usled svoje težine, legao na sedištu.

11.7 Razvodnici

Uloga razvodnika je da usmeravaju ulje pod pritiskom u komore izvršnih organa, kako bi oni ostvarili pomeranje u željenom smeru. Za zaustavljanje i ponovno pokretanje radnog elementa izvršnog organa, takodje su odgovorni razvodnici.

Simbol razvodnika predstavlja pravougaonik podeljen u dva, tri ili više polja. Na slici 157. prikazani su osnovni simboli razvodnika tri razvodnika.



Slika 157: Simboli hidrauličkih razvodnika: a-tropoložajni, b-dvopoložajni, c-četvorpoložajni

Simbol je podeljen na onoliko polja koliko položaja ima razvodnik: oznakom 0 obeležen je položaj u koji razvodnik dolazi kad nema nikakve komande, dok u položaje 1, 2 i 3 dolazi po aktiviranju komande. Oznakom P i R obeleženi su priključci povezani sa pritiskom (P) i rezervoarom (R); dok su oznakama A i B označeni priključci spojeni sa potrošačem.

Razvodnik se obeležava sa dva broja odvojena kosom crtom. Na primer, oznaka 4/2 označava razvodnik sa 4 priključka i 2 položaja. Primenjuje se više načina aktiviranja tj. dovodjenja razvodnika u željeni položaj. Najčešće se koristi:

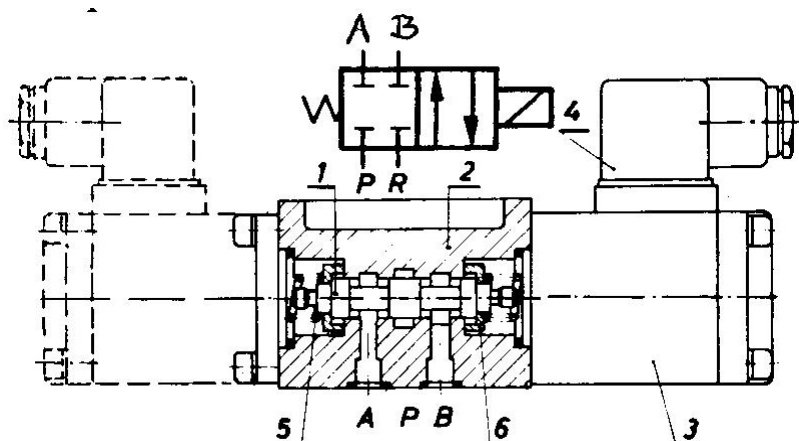
- 1) mehaničko (aktiviranje putem: pritiskivača, opruge, poluge, pedale i sl.)
- 2) električno (aktiviranje putem: releja (elektromagneta), elektromotora, podesivog pogona sa povratnom spregom i sl.)
- 3) pneumohidraulično (aktiviranje putem: komprimovanog vazduha, tečnosti pod pritiskom)
- 4) kombinovano

Prema načinu ostvarivanja funkcije koju obavljaju razvodnici mogu biti: diskretni i analogni.

a) Diskretni razvodnici

Ovi razvodnici se mogu naći u tačno odredjenom, unapred zadatom položaju, bez mogućnosti da zauzmu bilo koji međupoložaj i time utiču na količinu ulja koja protiče kroz razvodnik. Postoje više tipova diskretnih razvodnika kao što su: klipni, ventilski, pločasti i sl.

Od svih diskretnih razvodnika najviše se primenjuju klipni. Klipni razvodnici imaju jednostavnu tehnologiju izrade i lako upravljanje klipom razvodnika koji se kreće aksijalno. Jedan dvopoložajni klipni razvodnik sa četiri otvora (oznaka 4/2), zajedno sa hidrauličkim simbolom, prikazan je na slici 158.



Slika 158: Klipni razvodnik N06

U neaktiviranom položaju razvodnik je zatvoren tako da nema proticanja ulja kroz njega. U aktiviranom položaju vodovi su spojeni kao što to prikazuje desni kvadrat na šemi simbola, tj. vod koji je pod pritiskom pumpe (P) će biti spojen sa izlaznim otvorom (A), dok će vod na kome je rezervoar (R) biti spojen sa priključkom (B). Ovim razvodnikom se može upravljati cilindar dvosmernog dejstva, koji na pr. ima oprugu koja klip vraća u prvobitni položaj nakon prestanka dejstva aktivacije razvodnika.

Promena protoka kroz razvodnik može se ostvariti pogodnim izborom cilindričnih zaptivnih pojaseva na klipu. Ugradnjom još jednog magneta umesto poklopca (2) može se ostvariti i treći položaj razvodnika, tako što ga u srednji položaj dovode centrirajuće opruge (5) i (6). Pri strujanju tečnosti kroz razvodnik pojavljuje se hidrodinamička sila koja teži da zatvori razvodnik. Usled razlike pritiska na klipu javlja se i njegovo prijanjanje za telo razvodnika tzv. "lepljenje". Ova pojave umnogome zavisi od čistoće ulja. Da bi se sila "lepljenja" zadržala u normalnim granicama, preporučuje se filtriranje ulja na finoću od $25\mu\text{m}$.

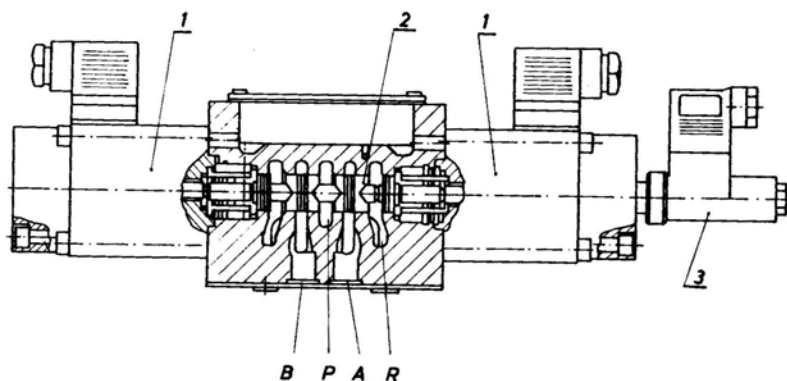
b) Analogni razvodnici

Za razliku od diskretnih, analogni razvodnici su u stanju da zauzmu bilo koji međupoložaj u zavisnosti od jačine pobude (aktivacije) koja je prisutna na razvodniku. Zbog sposobnosti da kontinualno menjaju položaj pokretnog elementa npr. klipa, oni menjaju i protočnu površinu, pa su samim tim u stanju da kontinualno menjaju protok koji prolazi kroz razvodnik.

U principu postoje dve vrste analognih razvodnika:

- 1) proporcijalni
- 2) servorazvodnici

1) **Proporcijalni razvodnici** imaju standardnu konstrukciju, sličnu diskretnim razvodnicima. Na slici 159. prikazan je proporcijalni razvodnik sa elektro-magnetnom pobudom, direktno upravljani.



Slika 159: Proporcijani razvodnik N010, direktno upravljani

Karakteristika proporcijalnih magneta je takva da je sila u magnetu linearno zavisna od napona koji se dovodi u magnet. Prolaskom jednosmerne struje kroz proporcijani magnet (1) pretvara se električni signal u pomeranje klipa (2). Davač položaja (3) identifikuje stvarni položaj klipa koji se preko elektronike održava konstantnim.

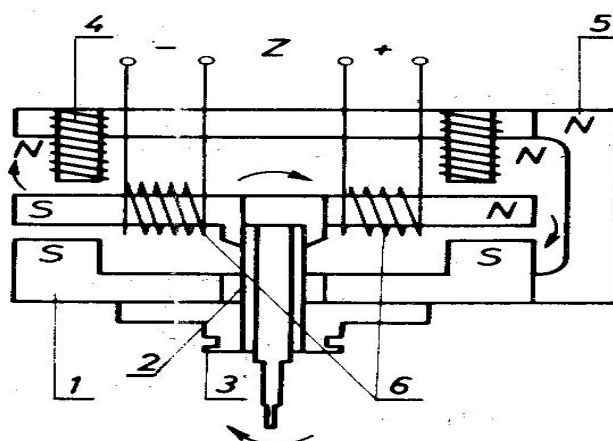
Protočne ivice, u obliku blende prigušnika, ostaju stalno u dodiru sa zaptivnim pojasevima na telu razvodnika.

Pored ovog direktnog upravljanja postoji i indirektno. Razvodnik je konstruisan iz dva stepena od kojih prvi obično predstavlja pobudu, tj. aktiviranje drugog stepena.

2) Pod pojmom **servorazvodnika** podrazumevaju se analogni razvodnici koju u sebi sjedinjuju malu snagu ulaznog stepena (ponekad znatno nižu i od 0,1W) sa kojim se upravlja velikom izlaznom snagom od više stotina kW. Servorazvodnik može da:

- usmeri strujanje kao standardni razvodnik,
- reguliše protok proporcijano ulaznoj struji u prvi stepen.,
- u slučaju potrebe, omogućiti brzo regulisanje protoka ulja kako bismo u brzim prelaznim procesima bili u mogućnosti da vodimo proces prema želji.

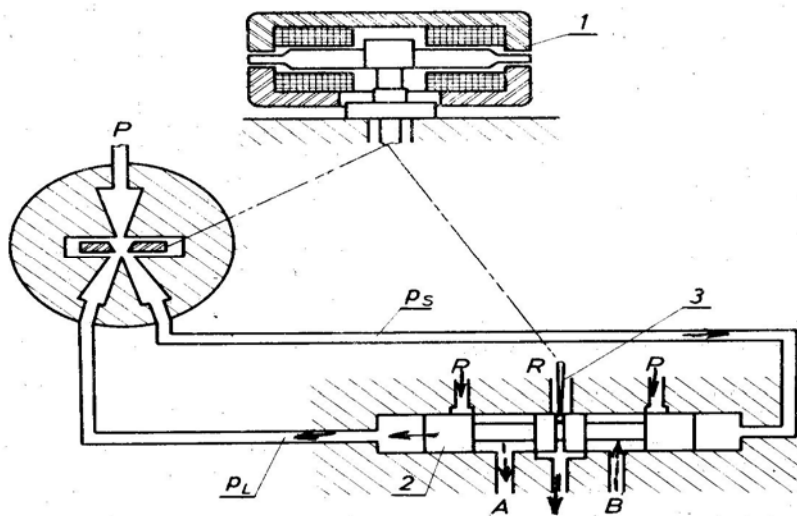
Aktiviranje servorazvodnika često se postiže pomoću momentnog motora. Šematski prikaz rada jednog takvog motora dat je na slici 160.



Slika 160: Šematski prikaz momentnog motora servorazvodnika

Propuštanjem jednosmerne struje preko solenoida (6) se na krajevima kotve motora (2) stvaraju magnetni polovi, koji su privučeni (ili odbijeni) od stalnog magneta koji

predstavlja delove kućišta (1) i (5). Na slici je prikazano zakretanje motora u pravcu kazaljke na satu. Zamenom polariteta na solenoidu (6) postiže se zakretanje motora u suprotnom smeru. Ovo malo uglovno zakretanje izlaznog vrha kotve momentnog motora predstavlja aktivaciju za servorazvodnik sa strujnim upravljanjem (slika 161).



Slika 161: Šema razvodnika sa strujnim upravljanjem

Momentni motor (1) može biti direktno povezan sa razvodnikom na mestu izlaza kotve (3) i na taj način vršiti aktivaciju klipa (2) tj. njegovo pomeranje levo-desno. Drugi način bi bila indirektna aktivacija tako što izlaz kotve (3) deluje na ploču hidrauličkog pojačavačkog stepena (kružni deo, levo na slici 21), i na taj način usmerava veći pritisak čas sa jedne, a čas sa druge strane klipa (2) razvodnika.

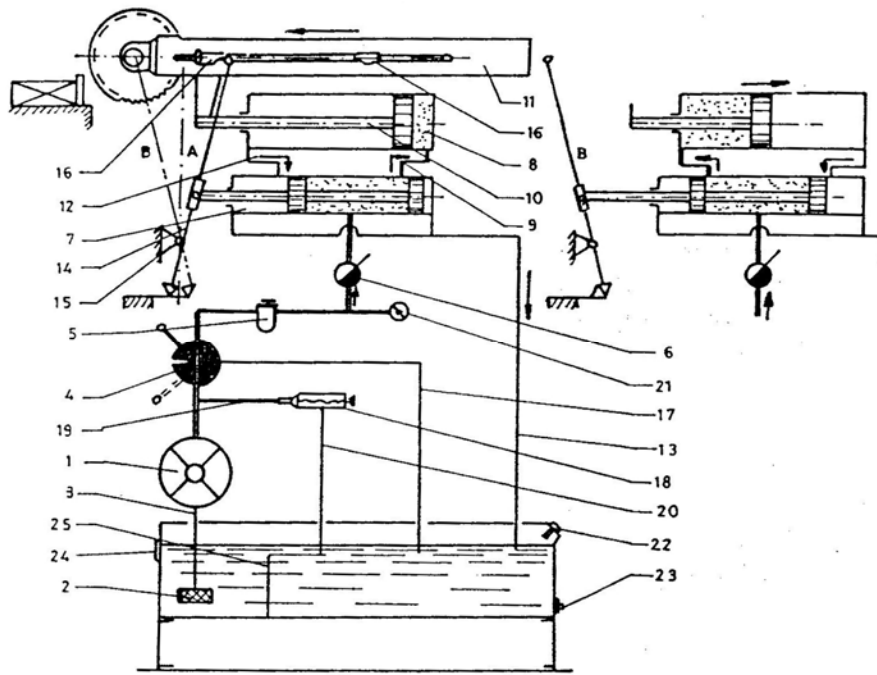
Ovi razvodnici sa strujnim upravljanjem manje su osetljivi na zaprljanost ulja, i ugradjuju se u strujnim kolima gde je nemoguća dobra filtracija ulja. Negativna osobina im je nešto veće curenje u srednjem (nultom) položaju, koje može iznositi 3-6% nominalnog protoka.

11.8 Primena hidraulike u drvenoj industriji

U drvenoj industriji se veoma često primenjuje hidraulika, bilo kod izvodjenja glavnog bilo kod pomoćnog kretanja (stezanje, otpuštanje, pridržavanje i sl.). Najčešće je reč o pravolinijskom kretanju, mada ono može biti i obrtno u zavisnosti od vrste izvršnog organa (hidro motora). Isto tako kretanje ostvareno hidrauličkim kolom može biti ravnomerno u oba željena smeru ili neravnomerno, što je naročito značajno kad je u pitanju brzina povratnog hoda koja treba da je nekoliko puta veća od brzine radnog hoda kako bi se ostvarila veća produktivnost na mašini.

a) Pomoćno kretanje nosača alata kružne pile

Na slici 162 je data šema za pravolinijsko oscilatorno kretanje nosača alata kružne pile.



Slika 162: Šema za pravolinijsko oscilatorno kretanje nosača alata kružne testere (cirkulara)

Preko pumpe (1) se potiskuje ulje iz rezervoara kroz filter (2), usisnu cev (3) ka slavini (4). Za slučaj da je slavinu otvorena, kao što je prikazano na slici, ulje prolazi kroz filter (5), i preko prigušnog ventila (6) koji reguliše protok, ulazi u klipni razvodnik (7). Razvodnik usmerava ulje pod pritiskom da ulazi u desnu komoru cilindra (8), što prouzrokuje kretanje klipa u njemu s desna u levo. Zajedno sa klipom kreće se i klipnjača (10) koja je spojena sa nosačem alata (11). Leva komora cilindra (8) se preko razvodnika i povratne cevi (13) spaja sa rezervoarom, i vrši se njeno pražnjenje. Aktivacija klipa razvodnika (7) se vrši mehanički pomoću poluge (14) i graničnika (16) koji se nalazi na nosaču alata. Na kraju radnog hoda nosača alata graničnik (16) prebacuje polugu iz položaja A u položaj B i na taj način klip razvodnika zauzima suprotan položaj. Sada razvodnik diktira da se leva komora cilindra spaja sa pumpom, a desna sa rezervoarom, baš kako je to prikazano u izdvojenom delu šeme, i sad klip u cilindru (8) kreće s leva u desno, odnosno vrši se povratni hod. Povratni hod traje sve do momenta dok graničnik (16) ponovo ne prebaci polugu iz položaja B u A.

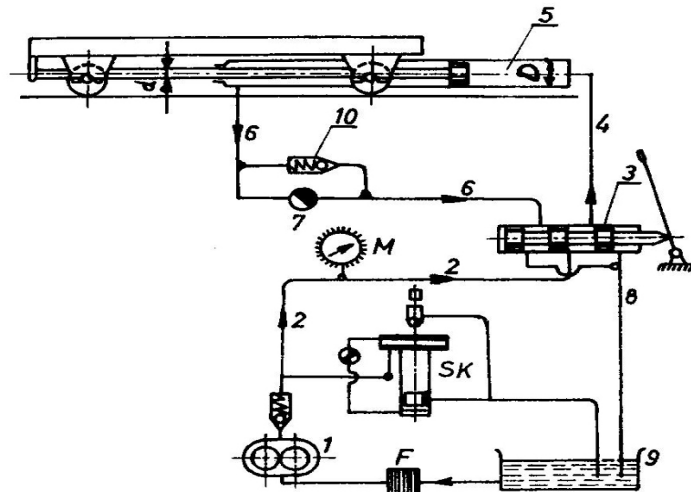
Da bi se obezbedilo zaustavljanje nosača alata, aktivira se slavinu (4) čime se sva količina ulja koju potiskuje pumpa usmeri preko cevi (17) natrag u rezervoar. Fino zaustavljanje klipa u cilindru (8), a time i nosača alata se može postići ugradnjom prigušnih ventila koji bi bili spojeni sa desnom odnosno levom komorom pomenutog cilindra.

Sigurnosni ventil (18) obezbeđuje instalaciju od prekoračenja pritiska. Kada usled opterećenja nosača alata, slavinu (4) ne propušta svu količinu ulja, višak otiče kroz cev (19), ventil (18) i cev (20) u rezervoar, čime se smanjuje porast pritiska u sistemu koje je izazvalo opterećenje.

Kontrola pritiska se vrši preko manometra (21), nivoa ulja u rezervoaru preko stakla (24), a postoje još i otvori za punjenje (22) i pražnjenje rezervoara.

b) Kretanje vagoneta u pilanskoj preradi drveta

Kinematska šema data je na slici 163.



Slika 163: Šema hidrauličnog kola sa cilindrom za kretanje vagoneta kod trupčare

Pumpa (1) potiskuje ulje iz rezervoara preko cevovoda (2) u razvodnik (3). Radni hod kolica se ostvaruje tako što razvodnik (3) spaja cevovod (2) i (4), pri čemu se stvara veći pritisak sa desne strane klipa u cilindru (5), i on odlazi u levo. Ulje se iz leve komore cilindra kroz cev (6), zasun (7), razvodnik (3) i cev (8) vraća u rezervoar (9).

Pri povratnom hodu ulje protiče kroz razvodnik (3), cevovod (6), nepovratni ventil (10) i dospeva u levu komoru cilindra (5). Sada pošto je sa te strane veći pritisak, desna komora se prazni preko cevovoda (4), razvodnika, cevovoda (8), sve do rezervoara (9). Povratni hod izvodi se istom brzinom pošto fluid ne prolazi kroz zasun (7), na kome bi se mogao regulisati protok, a time i brzina povratnog hoda. U hidrauličkom sistemu nalazi se još i: filter (F), manometar (M) i sigurnosni ventil (SK).

Brzina klipa u cilindru (5), a time i vagoneta određena je veličinom protoka fluida kroz zasun po formuli:

$$v = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot (D^2 - d^2)}$$

gde su:

$\dot{V}$ - protok ulja koje protiče kroz zasun (7),
 D – unutrašnji prečnik cilindra,
 d – prečnik klipnjače.

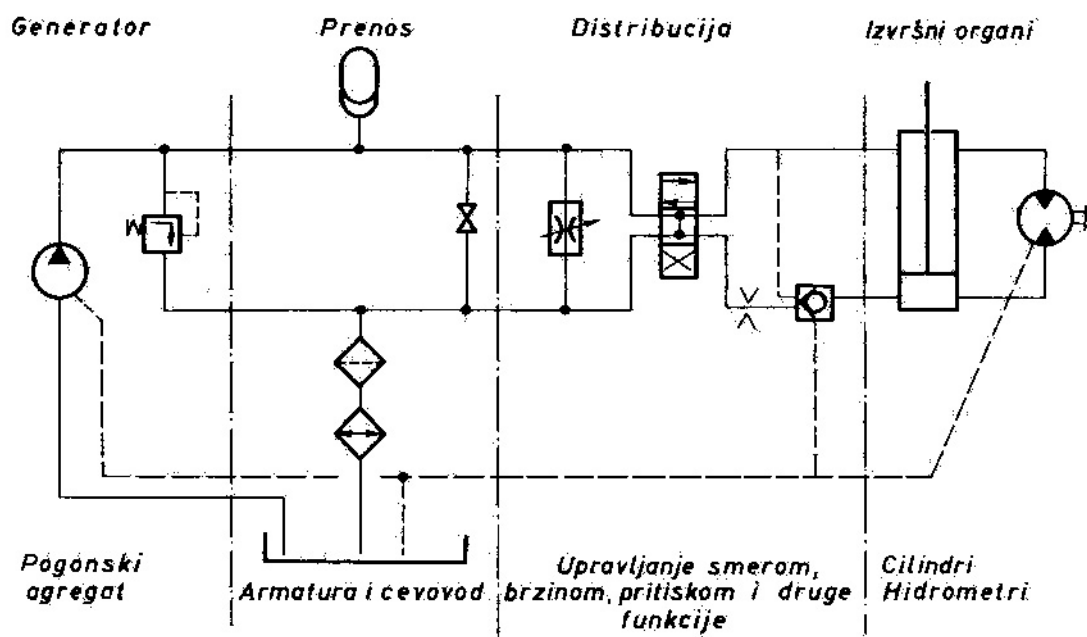
11.9 Hidraulički sistemi i njihova regulacija

Skup hidrauličkih komponenti povezanih u jednu celinu sa ciljem da se ostvari zadata funkcija naziva se hidrauličko kolo. Hidrauličko kolo treba da obezbedi:

- 1) pretvaranje mehaničke energije u hidrostatičku
- 2) prenošenje hidrostatičke energije do potrošača
- 3) pretvaranje hidrostatičke energije u mehaničku
- 4) upravljanje smerom (napred, nazad, stop) i brzinom kretanja izvršnog organa
- 5) ostvarenje ostalih funkcija prenosa i transformacije energije

Da bi ostvarilo navedene zadatke hidrauličko kolo treba da sadrži (slika 164):

1. pogonsku grupu koja mehaničku energiju pogonskog motora pomoću pumpi pretvara u hidrostaticku. U ovu grupu spadaju i uređaji zaštite pumpi (ventili sigurnosti i sl.)
2. elemente prenosa hidrostaticke energije koji omogućavaju transport, sladištenje i održavanje ulja. U ove elemente spadaju: cevovodi (koji pored transporta ulja imaju i ulogu povezivanja elemenata instalacije u funkcionalnu celinu), priključci, manometri, slavine, akumulatori, rezervoari, prečištači, odvajači vlage, hladnjaci, grejači i dr.



Slika 164. Tipično hidrauličko kolo

3. elemente distribucije koji omogućavaju: upravljanje smerom kretanja (razvodnici), brzinom (prigušnici, regulatori protoka, razdeljivači protoka), pozicijom (nepovratni i blokirajući ventili); kao i niz drugih specifičnih funkcija
4. izvršne organe (hidrocilindre i hidromotore) u kojima se hidrostaticka energija ponovo pretvara u mehaničku

Hidrauličko kolo ne mora imati sve navedene elemente, niti oni moraju biti ovako grupisani pa zato ovu podelu treba shvatiti uslovno.

Hidraulička kola prema načinu kretanja izvršnih organa mogu se podeliti na:

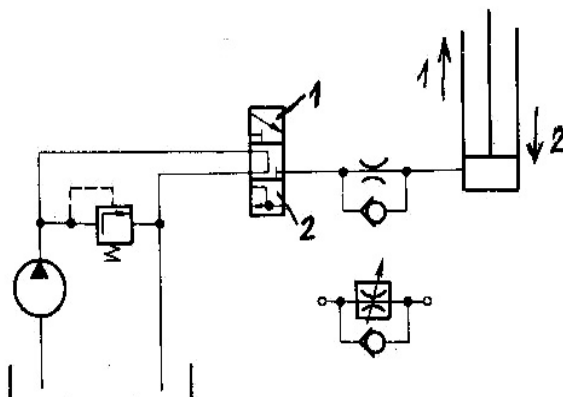
- 1) hidraulička kola sa translatorsnim kretanjem
- 2) hidraulička kola sa obrtnim kretanjem (hidromotorom)

1) Hidraulička kola sa translatorsnim kretanjem

- Kola sa jednosmernim cilindrom (slika 165)

Primenuju se kod jednosmernih opterećenja (uglavnom gravitacionih), pri čemu se kretanje cilindra u jednom smeru ostvaruje hidrauličkom energijom, a povratni hod se obavlja pod uticajem opterećenja (spoljna sila ili teret). Primena ovih kola u preradi drveta bila bi

kod: hidrauličkih čekića, hidrauličkih makaza za sečenje furnira, podizanja radnog stola kod alatnih mašina i sl.



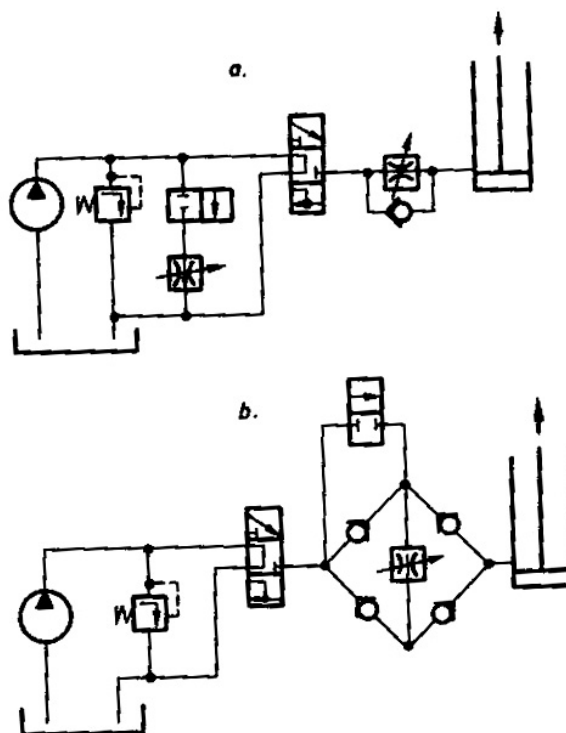
Slika 165: Hidrauličko kolo sa jednosmernim cilindrom

Preko razvodnika, njegovog srednjeg položaja, pumpa je kratko spojena sa povratnim vodom, pa startuje rasterećena. Pumpa savladjuje opterećenje kada je razvodnik u položaju (1), i klip u cilindru pri tome ide ka gore. U položaju (2) razvodnika pumpa i cilindar se kratko spajaju sa povratnim vodom, klip u cilindru usled dejstva spoljašnjeg opterećenja tada na dole. Prigušno-nepovratni ventil ugradjen ispred cilindra kontroliše brzinu povratnog hoda. U hodu dizanja, struja ulja ide kroz nepovratni ventil bez prigušenja, dok se u povratnom hodu nepovratni ventil zatvara, a struja ulja teče kroz prigušnik. Podešavanjem prigušenja kontroliše se brzina povratnog hoda. Pri opterećenjima koja nisu konstantna za kontrolu povratnog hoda primenjuju se regulatori protoka.

- Kola sa dvosmernim cilindrom

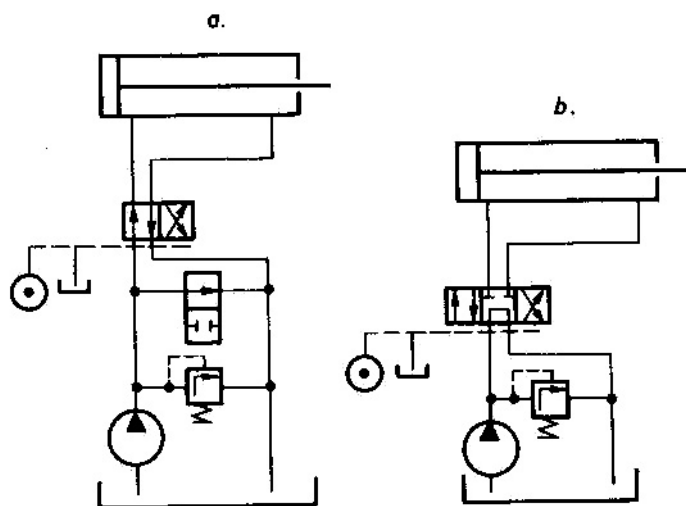
Uglavnom je njihova primena kod dvosmernih opterećenja, mada se mogu koristiti i pri jednosmernim. Princip rada je sličan kao kod jednosmernog cilindra (slika 166), ali se umesto prigušnog elementa ugradjuje ventil sigurnosti preko kojeg se kontroliše sila povratnog hoda.

Ovim kolima je moguće postići **regulaciju brzine podizanja i spuštanja** klipa u cilindru. Ukoliko su brzine dizanja i spuštanja iste, upotrebljava se jedan element za podešavanje brzine kretanja (paralelno vezani nepovratni i prigušni ventil). Kada to nije slučaj, da bi se struja ulja i slučaju podizanja i spuštanja usmerila kroz regulator protoka upotrebljava se Grecova hidraulička veza (slična se primenjuje u elektronici kod veze dioda). Ugradnjom zaobilaznog razvodnika moguće je u oba slučaja postići dve brzine kretanja, jednu definisanu kapacitetom pumpe, a drugu prigušnim elementom.



Slika 166: Hidraulička kola sa regulacijom brzine

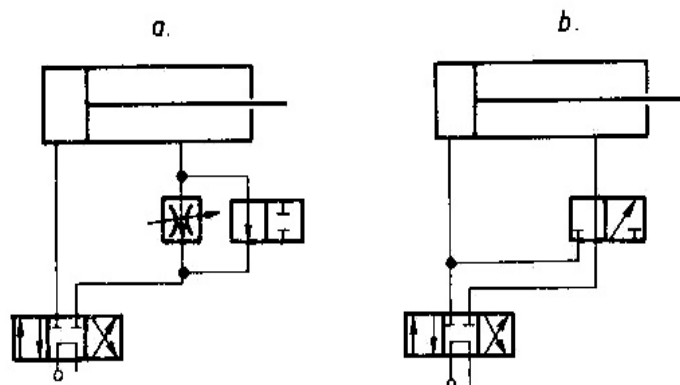
Kod kola sa dvosmernim cilindrom svakako je od posebnog interesa postići **upravljanje smerom kretanja**. To se ostvaruje dvopoložajnim razvodnikom 4/2 (slika 167a). Da bi se rasteretila pumpa može se ugraditi poseban razvodnik. Za obezbedjenje zaustavljanja u međupoložajima potreban je razvodnik 4/3 (slika 167b). Nulti položaj tropoložajnog razvodnika koristi se za rasterećenje pumpe pri startovanju motora ili mirovanju cilindra.



Slika 167: Hidraulička kola za upravljanje smerom kretanja

Kod mašina alatki, presa, hvataljki i sl. nekad je potrebno ostvariti **brzo primicanje, radni hod, brzo odmicanje**. Ovo zahteva ugradnju dodatnog razvodnika za obilaženje prigušnog elementa u fazi brzog primicanja (slika 168a) radi regulisanja brzine radnog hoda. Po pravilu, prigušni element ugrađuje se u povratni vod da bi se obezbedio stabilniji rad cilindra. Kod diferencijalnih cilindara može se iskoristiti razlika površine sa strane klipja i klipnjače za

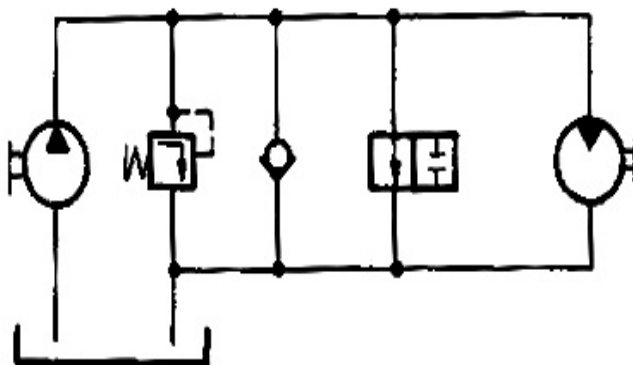
obezbedjenje ciklusa bez prigušnih elemenata (slika 168b). Brzina radnog hoda je konstrukcijska veličina određena izborom cilindra, i ne može se naknadno podešavati.



Slika 168: Hidrauličko kolo brzo primicanje, radni hod, brzo odmicanje

2) Hidraulička kola sa obrtnim kretanjem (hidromotorom)

Najjednostavnija šema, tzv. jednosmerno kolo prikazano je na slici 169. Kao što se sa slike vidi, pored pumpe zaštićene sigurnosnim ventilom i hidromotora, predviđeni su i razvodnik i sigurnosni ventil. Razvodnik omogućava startovanje pumpe i motora tako što kratko spaja potisni i povratni vod. Dakle, hidromotor se zaustavlja kratkim spajanjem vodova pomoću razvodnika ili zaustavljanjem pumpe. U oba slučaja, hidromotor može, usled inercijalnih sila, da nastavi kretanje, pa se preporučuje ugradnja nepovratnog ventila, koji sprečava pojavu potpritiska u potisnom vodu.



Slika 169: Hidrauličko kolo sa obrtnim kretanjem izvršnog organa

11.10 Održavanje hidrauličnih sistema

U procesu eksploatacije radni fluid (mineralna ulja i sl.) gubi fizičko-mehanička, mazivna i dr. svojstva, zbog čega može biti narušen radni režim hidrauličnih agregata. Do ovakvog pogoršanja kvaliteta ulja dolazi uglavnom zbog mehaničkog i hemijskog delovanja različitih faktora na ulje, od koji su osnovni oksidacija tečnosti usled kontakta sa vazduhom i razlaganje ulja, do koga dolazi pri radu sa visokim pritiskom.

Usled oksidacije ulje gubi svoju postojanost i viskozitet, i dolazi do izdvajanja taloga u obliku smole. Intenzitet oksidacije ulja je veći ukoliko je ono u radu izloženo povišenim temperaturama i česticama mehaničke prljavštine. S toga čelične delove koji su potopljani u ulje je korisno brunirati, a delove kod kojih deo površine dolazi u dodir sa vazduhom, izraditi od nerdjajućeg čelika. Pouzdana zaštita od korozije postiže se i primenom hemijskog niklovanja. Takođe, u cilju otklanjanja žarišta korozije ne preporučuje se dodirivanje metalnih površina nezaštićenim rukama. Proces oksidacije ulja može se usporiti pomoću specijalnih aditiva.

Periodično treba menjati ulje u hidrauličnom sistemu, a prema preporuci proizvođača ulja, imajući u vidu i vreme prethodne zamene i broj radnih časova godišnje. Prilikom redovnog servisa treba pregledati i eventualno promeniti dotrajale zaptivne elemente i posle toga opet proveriti da nema curenja ulja.

Oprema koje se ugrađuje treba biti prethodno ispitana i da poseduje odgovarajući atest. Tako se na primer ispitivanje creva i cevovoda vrši statičkim i pulzirajućim pritiskom u uslovima koji su slični uslovima pod kojima crevo radi u hidrauličnom sistemu (temperatura, vibracije, promena pritiska i sl.). Ispitivanje pumpi podrazumeva merenje protoka pri maksimalnom radnom pritisku i određivanje veličine zapreminskog i mehaničkog efektivnog stepena iskorišćenja.

Pri dugotrajnom čuvanju hidroagregate (pumpe i motore) treba konzervirati, zbog čega se oni pune uljem ili smešom ulja za konzerviranje, a vratila i klipnjače koje su izvan hidroagregata premazuju se gustim mazivom. Dekonzerviranje se sprovodi neposredno pre montaže hidroagregata tako što se njihove unutrašnje komore zaliju bilo kojim tečnim uljem zagrejanim do 80-100°C, a posle 15-20 min. ulje se prosipa.

- Primeri rešenih zadataka

1. Odrediti radne parametre zupčaste pumpe čiji je stvarni zapreminski protok $\dot{V} = 5 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s}$ pri radnom pritisku $p=100\text{bar}$. Broj obrta pumpe je 1500min^{-1} , a zapreminski i mehanički stepen iskorišćenja $\eta_v = 0.85$ i $\eta_M = 0.9$.

Rešenje:

Teorijski protok pumpe bice :

$$\dot{V}_T = \frac{\dot{V}}{\eta_v} = \frac{5 \cdot 10^{-4}}{0.85} = 5.88 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s} = 3.528 \cdot 10^{-2} \frac{m^3}{\text{min}}$$

Protok za jedan obrtaj pumpe (specifičan protok) je :

$$\dot{v} = \frac{\dot{V}_T}{n} = \frac{3.528 \cdot 10^{-2}}{1500} = 2.352 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{\text{ob}} = 23.52 \frac{cm^3}{\text{ob}}$$

Teorijska snaga pumpe bice :

$$P_T = p \cdot \dot{V}_T = 10^7 \cdot 5.88 \cdot 10^{-4} = 5880W = 5.88kW$$

Korisna snaga pumpe je :

$$P = p \cdot \dot{V} = 10^7 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 5000W = 5kW$$

Momenat na vratilu pumpe bice :

$$M_T = \frac{\dot{v}p}{2\pi} = \frac{2.352 \cdot 10^{-5} \cdot 10^7}{2\pi} = 37.4Nm$$

Za pogonski momenat se dobija :

$$M = \frac{M_T}{\eta_M} = \frac{37.4}{0.9} = 41.6Nm$$

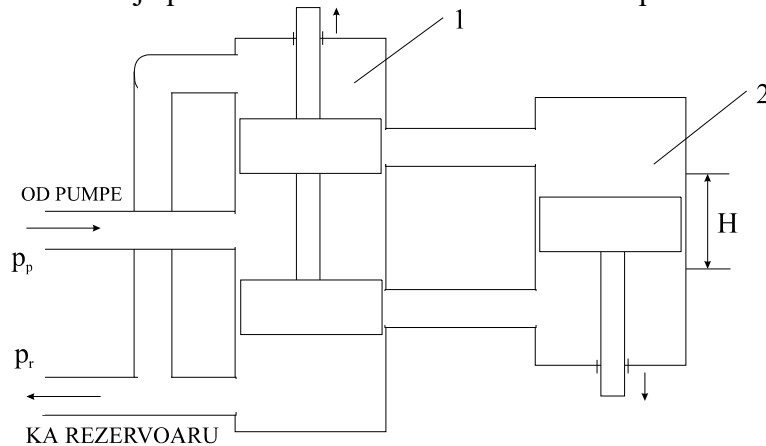
2. Klip cilindra hidraulične prese radni i povratni hod ostvaruje napajanjem od zupčaste pumpe koja daje pritisak od 110bar. Ako je pritisak u rezervoaru ulja 5bar, sila koja opterećuje klipnjaču 1 MN, brzina sabijanja 2 mm/s, a hod prese je 40 mm.

Odrediti :

- 1) Površinu klipa cilindra
- 2) Prečnik klipa
- 3) Zapreminu hoda klipa
- 4) Protok ulja u cilindar
- 5) Vreme hoda klipa

Rešenje :

Šematski je prikazana veza razvodnika i cilindra prese :



Aktiviranjem klipa razvodnika 1 na gore donja komora cilindra 2 se napaja pritiskom iz pumpe (p_p), a gornja se povezuje sa rezervoarom ulja pritiska (p_r) tako da se na bazi stvorene razlike - radni pritisak ($p = p_p - p_r$), klip cilindra 2 kreće na dole i time ostvaruje radni hod prese. Povratni hod se ostvaruje u suprotnom smeru i tada je aktiviranje razvodnika ka dole.

- 1) Površina klipa cilindra biće :

$$A = \frac{F}{p} = \frac{1 \cdot 10^6}{105 \cdot 10^5} = 0.09524 m^2$$

- 2) prečnik klipa :

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.09524}{\pi}} = 0.348 m = 348 mm$$

- 3) Zapremina hoda klipa :

$$V = A \cdot H = 0.09524 \cdot 0.04 = 0.00381 m^3 = 3.81 dm^3$$

- 4) Protok ulja :

$$(Q) \dot{V} = A \cdot v = 0.09524 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 1.9 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

- 5) Vreme hoda klipa u cilindru :

$$t = \frac{V}{\dot{V}} = \frac{0.00381}{1.9 \cdot 10^{-4}} = 20 s$$

LITERATURA

1. Adžić M., Rac A., Memotović S.: Priručnik za laboratorijska merenja iz pogonskih materijala, Mašinski fakultet, Beograd, 1990.
2. Ašković R.: Osnovi hidraulike i pneumatike, Mašinski fakultet, Beograd, 1995.
3. Bašta T.M.: Mašinska hidraulika, Mašinski fakultet, Beograd, 1990.
4. Bogdanović B., Milanović S., Bogdanović-Jovanović J.: Kompresori – termodinamika procesa sabijanja gasova, Mašinski fakultet, Niš, 2007.
5. Čurčić B.: Osnovi mašinstva I deo, Naučna knjiga, Beograd, 1979.
6. Danon G.: Osnovi mašinstva I (Tehnička termodinamika), Šumarski fakultet, Beograd, 2000.
7. Djajić N.: Energija za održivi svet, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2002.
8. Janićijević N.: Hidraulične i pneumatske komponente, Inženjersko mašinski priručnik, knjiga 3, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1987.
9. Jovanović S.: Uljna hidraulika, Tehnička knjiga, Beograd, 1996.
10. Kozić Dj., Vasiljević B., Bekavac V.: Priručnik za termodinamiku u jedinicama SI, Mašinski fakultet, Beograd, 2004.
11. Kršljak B.: Mašine i alati za obradu drveta III, Uljarice-public, Beograd, 2002.
12. Lunberg A.: Regulacija kapaciteta vijčanih kompresora pri radu sa delimičnim opterećenjem, Klimatizacija grejanje hladjenje, 13/1, 1984.
13. Milinčić D.: Prostiranje toplote, Naučna knjiga, Beograd, 1989.
14. Milinčić D., Voronjec D.: Termodinamika, Mašinski fakultet, Beograd, 1988.
15. Stevanović-Janežić T. i dr.: Unapredjenje tehnologija drveta u korelaciji sa svojstvima hemijskih konstituenata drveta, Šumarski fakultet, Beograd, 1995.
16. Stošić N., Smith I., Kovačević A.: Screw Compressors – Mathematical Modelling and Performance Calculation, Springer, London, 2005.
17. Zrnić V.: Pneumatika, Tehnička knjiga, Beograd, 1998.
18. Voronjec D., Kozić Dj.: Vlažan vazduh, Naučna knjiga, Beograd, 1989.
19. Voronjec D. i dr.: Rešeni zadaci iz termodinamike sa izvodima iz teorije, Mašinski fakultet, Beograd, 1988.
20. Vujić S.: Termodinamika, Inženjersko mašinski priručnik, knjiga 1, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1987.
21. Šelmić R.: Tehnička termodinamika, Saobraćajni fakultet, Beograd, 1986.
22. Šešlija D., Lagod B.: Stanje pneumatskih sistema u industriji Srbije sa aspekta energetske efikasnosti, Centar za automatizaciju i mehanotroniku, Tehnički fakultet, Novi Sad, 2006.