

OSNOVNA FIZIČKA SVOJSTVA FLUIDA

Opšte napomene i osnovni pojmovi

Zajednički naziv *fluidi*, za tečnosti i gasove, javlja se zbog toga što u prirodi ima mnogo slučajeva kada se gasovi ponašaju baš kao da su nestišljivi. Ovakvi slučajevi nastaju kad god su brzine gasne struje znatno manje od brzine kojom se zvuk prostire kroz gas, ili kada su gasovi izloženi dejstvu malih razlika u pritiscima u poređenju s apsolutnim pritiscima koji u njima vladaju.

Pod fluidnim delićem se razume tako mala količina materije da njen oblik ne igra nikakvu ulogu pri posmatranju. Svejedno je tada da li će se fluidni delići zamišljati kao neizmerno male (elementarne) kocke, lopte, ili kao kakva druga pravilna geometrijska tela jer se ova ostvaruju od početnog nepravilnog oblika odbacivanjem samo neizmerno malih zapremina, veličina drugog reda. Delići imaju uvek istu masu, ali im se zapremina i oblik mogu menjati tokom vremena.

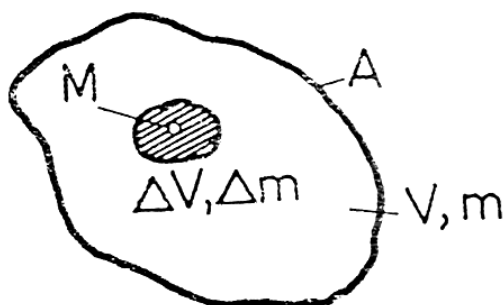
Gustina

Stanje fluida se određuje raznim fizičkim veličinama. Tako, fluidni delić ima svoju masu dm , koja se u deliću ne menja. Srednja gustina ρ se dobija kada se neka konačna masa m podeli zapreminom V u kojoj se sadrži:

$$\rho = m/V$$

Ako se vrlo mala zapremina fluida ΔV , mase Δm , okupljene oko neke tačke M , makako smanjuje, ali ipak tako da tačka M stalno ostaje toj smanjivanoj zapremini, onda granična vrednost odnosa $\Delta m / \Delta V$ kada ΔV teži nuli predstavlja gustinu fluida ρ neprekidne sredine u tački M :

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}.$$



Slika 1. Definisavanje gustine fluida

Gustina fluida zavisi od temperature i pritiska. U tabeli 1. su dati podaci za vodu, a u tabeli 2. za vazduh, pri stalnom pritisku od jedne normalne atmosfere ($1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$).

Tabela 1. Gustina vode pri raznim temperaturama

t (°C)	0	4	10	20	30	40	60	100
ρ (kg/m ³)	999,9	1000	999,7	998,2	995,7	992,2	983,2	958,4

Tabela 2. Gustina vazduha pri raznim temperaturama

t (°C)	-20	-10	0	10	20	40	60	100
ρ (kg/m ³)	1,39	1,34	1,29	1,24	1,20	1,12	1,06	0,94

U uslovima rada hidrotehničkih objekata temperatura vode obično se kreće u granicama 0 – 35 °C i, prema tome, gustinu vode u tom intervalu moguće smatrati konstantnom u praktičnim proračunima:

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3 = 1000 \frac{\text{Ns}^2}{\text{m}^4}$$

Tabela 3. Gustine nekih gasova na temperaturi 0°C i na pritisku od 1 atm

Gas	ρ (kg/m ³)
Vazduh	1,293
Kiseonik	1,429
Azot	1,251
Vodonik	0,0898
Metan	0,717
Helijum	0,1785

Tabela 4. Odgovarajući podaci za neke druge tečnosti

Tečnost	°C	ρ (kg/m ³)
Čista voda	15	999
Morska voda	15	1020
Živa	15	13595
Ricinus	15	970
Petrolej	15	790-820
Benzin	15	680-720
Liveno gvožđe	1200	7000
benzol	0	900
Hloroform	18	1480
Alkohol	15	790
Glicerin	0	1260
Nafta	19	760-900

Homogenost i izotropija

U mehanici fluida se pretpostavlja da je materija homogena i izotropna. Ovo znači da su fizička svojstva svakog, pa i najmanjeg dela fluida, ista u celom fluidnom prostoru i usvim pravcima. Fluidi koji nemaju ove osobine ne primenjuju se u hidraulici.

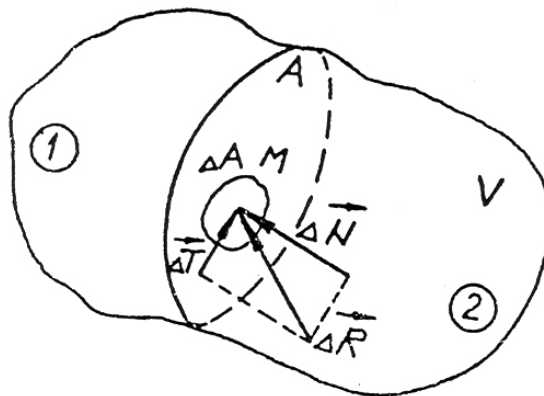
Delovanje sila na fluid

Na fluidnu masu u nekoj zapremini napadaju razne sile. To su prije svega sile koje deluju u mehanici krutog tela: sila Zemljine teze, Njutnova gravitaciona sila, sila inercije itd. Ove napadaju svaki fluidni delić u posmatranoj zapremini, bez obzira da li je ta zapremina usamljena ili se graniči sa fluidom. Takve sile se zovu zapreminske ili spoljašnje. One se uvek odnose na jedinicu mase.

Ako se sila po jedinici mase označi sa \vec{F} , onda elementarna masa dm fluidnog delića trpi ukupnu silu $\vec{F} dm$, a kako je $dm = \rho dV$, biće:

$$\vec{F} dm = \rho \vec{F} dV$$

Međutim postoje i druge sile. Da bi se pokazalo, treba uočenu zapreminu V , koju ispunjava fluid, podeliti nekom površinom na dva dela 1 i 2 (sl.2). Kako su fluidni delići izvanredno pokretljivi, to svaki od delova podeljene zapremine može zadržati svoj oblik samo ako na njega deluju sile, koje zamenjuju uticaj odsečenog dela, u svim tačkama koje pripadaju zajedničkoj površini A oba dela. Zato se ovakve sile zovu površinskim silama \vec{R} .



Slika 2. Delovanje površinskih sila

Mali deo ΔA granične površine A trpi elementarnu površinsku silu $\Delta \vec{R}$, koja se može rastaviti na komponentu $\Delta \vec{N}$ normalnu na površini ΔA i tangentnu komponentu ΔT koja leži u ravni površine ΔA . U opštem slučaju, površinske sile R nisu jednake u raznim tačkama posmatrane površine A , pa ni u tačkama površine ΔA koja je potpuno proizvoljno izabrana. Zbog toga što su u vezi sa površinom uobičajeno je da se površinske sile odmeravaju prema jedinici površine koju napadaju. Ako se na nekoj površini ΔA izabere proizvoljna tačka M pa se oko nje površinica sve više sužava, $\Delta A \rightarrow 0$, granične vrednosti količnika $\Delta N / \Delta A$ predstavljaju normalne napone, a količnika $\Delta T / \Delta A$ tangentne ili smicajne napone:

$$\lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta A} = p$$

$$\lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} = \tau$$

U unutrašnjosti fluida, normalni napon može biti samo pritisak p , jer usled pokretljivosti delića istezanjem bi se delici lako odvojili.

Da bi se dobila elementarna sila priska dP , koja deluje površinski element dA , potrebno je pomnožiti pritisak p ortom površine (smer spoljašnje normale – od površine ka prostoru) $d\vec{A}$ tj.

$$d\vec{P} = -pd\vec{A}$$

Znak minus se stavlja zato što ort površine ima smer spoljne normale, a smer pritiska je uvek smer unutrašnje normale na površini A .

Tangentne komponente površinskih sila izazivaju klizanje fluidnih delića. Kako su delići vrlo pokretljivi, dovoljna je i najmanja sila da bi se promenio oblik fluidne mase pod uslovom da se ne ograničava vreme delovanja sile. Iz toga sledi da se smicajne sile moraju međusobno uravnotežavati kada fluid miruje. Fluid u mirovanju se ponaša, dakle, kao da je savršen.

Sasvim drugačije je pri kretanju fluida. Ako se posmatra, npr. obična okrugla ploča koja se kreće primetiće se da ploča povlači susedne deliće, ovi one do njih i tako redom, i to sve brže što je fluid viskoziji. Toga ne bi bilo pri kretanju savršenog fluida gde nema trenja. Prema tome, prihvatanje hipoteze o savršenom fluidu moglo bi često dovesti do sasvim pogrešnih zaključaka i samo bi se donekle moglo pravdati ukoliko bi viskoznost fluida bila izvanredno mala.

Stišljivost

Svojstvo fluida da mijenja svoju zapreminu pod dejstvom normalnih površinskih sila naziva se *stišljivošću*. Stišljivost tečnosti veoma se razlikuje stišljivosti gasova. Stišljivost tečnosti je vrlo mala i treba pribeci izvanredno jakom priisku da se zapremina smanjila. Kada dejstvo sile prestane, sabijena tečnost zauzme ponovo svoju prvobitnu zapreminu. Stišljivost gasova je vrlo velika i pritisak koji je potreban za određenu promenu zapremine nalazi se po zakonu Boyle Mariotte. Koeficijent stišljivosti s dobija se po obrascu:

$$s = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp}$$

Znak minus pokazuje da smanjenju pritiska odgovara povećanje zapremine i obrnuto. Recipročna vrednost koeficijenta stišljivosti ε , naziva se *modul stišljivosti*. Modul stišljivosti ima istu dimenziju kao i pritisak.

$$\varepsilon = \frac{1}{s}$$

Tabela 5. Srednje vrednosti za s i ε za vodu pri raznim temperaturama

t°C	0	10	20	30
$s \frac{m^2}{N}$	5,12 10^{-10}	4,93 10^{-10}	4,74 10^{-10}	4,66 10^{-10}
$\varepsilon \frac{N}{m^2}$	19,52 10^8	20,30 10^8	21,08 10^8	21,48 10^8

Iz tabele 5 se vidi da je stišljivost vode neznatna i zato je u većini slučajeva praktično nju moguće zanemariti.

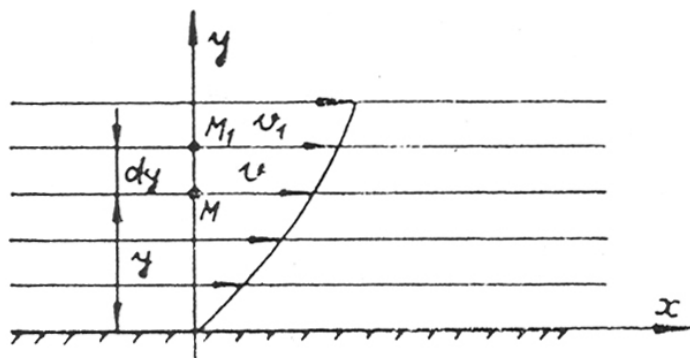
Stišljivost se ne sme zanemariti prilikom proučavanja strujanja kod kojih brzina dostiže brzinu zvuka, ili je prelazi. Tečnosti ne mogu dostići takvu brzinu, ali gasovi mogu. Kada gas struji znatno sporije od brzine zvuka može se njegova stišljivost zanemariti i strujanje proučavati kao da je u pitanju tečnost.

Unutrašnje trenje ili viskoznost

Svojstvo fluida pri svom strujanju pruža otpor relativnom klizanju svojih čestica poznato je pod nazivom *viskoznost* ili *unutrašnje trenje*. To je jedno od najvažnijih svojstava fluida.

Sila trenja uslovljava da sloj tečnosti, koji se kreće brže, povlači za sobom susedni sloj koji se kreće sporije, i obrnuto.

U tehnici su najvažniji fluidi voda, vazduh njima slični lepe se za površinu čvrstog tela preko kojeg struje, bez obzira na brzinu koju su imali pre nego što su dotakli telo. Kišne kaplice se lepe za prozorsko okno, mada na njih deluje sila Zemljine teže, koja ih svlači ka zemlji. U dodirnoj površini kapljica i stakla vlada sila koja je u stanju da zaustavi kapljice (*athezija*). Čvrsta površina koči, dakle, stujanje. Sa površine se kočenje prenosi u unutrašnjost struje, jer se fluidni delići lepe među sobom (*kohezija*). Na pr. ploča povlači za sobom, pri kretanju stalnom brzinom u svojoj ravni, ne samo sloj uz sebe, već i dalje slojeve.



Slika 3. Stujane fluida duž ravanog zida
- laminarno strujanje, kod kojeg slojevi klize jedan po drugom bez mešanja -

U nekoj tački M na rastojanju y postoji brzina v . Neizmerno bliskoj tački M_1 , čija se ordinata razlikuje od y za elementarnu vrednost dy , pripašće brzin $v_1 (y+dy)$. Smatrajući da se brzine razlikuju za izvanredno malu vrjednost u veoma bliskim tačkama, odnosno da se nigde brzina neće promeniti na prečac, smije se $v_1 (y+dy)$ razviti u red i ograničiti se na beskonačno male veličine prvog reda.

U tom slučaju je:

$$v_1 (y + dy) = v (y) + \frac{\partial v}{\partial y} dy.$$

Razlika između brzine v_1 i v iznosi $(\frac{\partial v}{\partial y} dy)$, što predstavlja relativnu brzinu dv susjedna sloja na rastojanju dy . Delimični izvod $\partial v / \partial y$ pruža relativnu promenu brzine v po jedinici normale y na slojevima fluida.

Slika 5 pokazuje da se fluidni deliči čak lijepe za ploču što znači da tu gube vlastitu brzinu. Kočno delovanje čvrste površine i fluida, i fluida među sobom, izrazio je Njutn 1687. godine:

$$\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (2.9)$$

μ - koeficijent srazmernosti i zove se dinamička viskoznost.

Ova hipoteza je kasnije potvrđena Kulonovim eksperimentima, a zatim i ogledima osnivača hidrodinamičke teorije o podmazivanju, N.P.Petrova.

U mehanici fluida, kao i u hidraulici i pneumatici, se često koristi *kinematička viskoznost* ν , koja se dobija deljenjem dinamičke viskoznosti sa gustinom fluida:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (2.10)$$

Dinamička i kinematička viskoznost zavise od prirode fluida, od njegovog toplotnog stanja i od pritiska koje je izložen.

Tečnost	t = 18 ⁰ C	ν cm ² /s
Čista voda		0,0106
Benzin		0,0065
Alkohol		0,0133
Petrolej		0,0250
Nafta		0,25 1,40
Glicerin		8,70
Gasovi t=0 ⁰ C, p=0,981 bar		ν cm ² /s
Vazduh		0,133
Kiseonik		0,114
Vodonik		0,945
Helijum		1,060

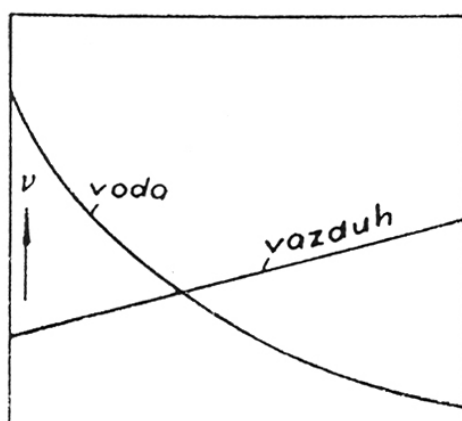
Tabela 6. Vrijednosti ν za neke tečnosti i gasove

Pritisak slabo utiče na dinamičku viskoznost fluida. Tako je beznačajan za gasova do god se oni upravljaju po Bojlu Mariotovom i Ge Lisakovom zakonu. Na kinematičku viskoznost pritisak ima presudnu važnost, jer je gustina izrazita funkcija od pritiska, a njome se deli dinamička viskoznost.

Viskoznost tečnosti se neznatno mijenja dogod su pritisci srazmerno mali, pri čemu, za vodu, nešto opadaju sa pojačavanjem pritiska, dok za ostale tečnosti rastu. Međutim, iznad izvesne granice uticaj pritiska naglo skače.

Koeficijent μ pri stalnoj temperaturi je veličina, koja je za svaku tečnost praktična nezavisna od gradijenta brzine.

Temperatura je vrlo uticajna veličina. Pri tome, viskoznost tečnosti opada dok viskoznost gasova raste sa povećanjem temperature (sl.5)



Slika 5.

U tehnici se često koristi eksperimentalna formula Sutherlanda:

$$\mu = \frac{K\sqrt{T}}{1 + c/T},$$

T – apsolutna temperatura,

K - koeficijent koji za vazduh iznosi $K = 142 \cdot 10^{-7}$,

c - koeficijent koji za vazduh iznosi $c = 102,5$.

Mada je viskoznost vode znatno veća od viskoznosti vazduha ($\mu_{\text{vode}} > \mu_{\text{vazduha}}$), koeficijent kinematičke viskoznosti vazduha pri 0°C je skoro 7 puta veći od kinematičke viskoznosti vode pri istoj temperaturi. Pri vrlo visokim temperaturama, kada toplotno kretanje molekula tečnosti sve više dobija karakter toplotnog kretanja gasa, viskoznost tečnosti počinje rasti sa povećanjem temperature.

Viskoznost pojedinih tečnosti se određuje eksperimentalnim putem pomoću viskozimetra. Jedan od najčešće upotrebljivih viskozimetara ima oblik okruglog suda, zapremine 200 cm^3 i kružnog otvora prečnika 3 mm. Sud se napuni tečnošću i beleži se vrijeme za koje tečnost isteče iz suda. Viskoznost tečnosti se određuje upotrebljivanjem ovog vremena sa vremenom isticanja iste količine čiste vode na temperaturi 20°C . Taj odnos se zove Englerov stepen i označava se sa $^{\circ}\text{E}$. Za prelazanje od Englerovih stepena na kinematičku viskoznost služi Ubelodova formula:

$$\nu = 0,0731 \text{ } ^{\circ}\text{E} - \frac{0,0631}{\text{E}} (\text{cm}^2/\text{s}),$$

koja je dovoljno precizna za ispitivanje tečnosti na sobnoj temperaturi.

Fluidi koji se upotrebljavaju po zakonu Njutna (2.9), što je slučaj sa fluidima koji se primenjuju u hidrauličkim uređajima, nazivaju se *njutnovskim*.

2.9. Absorpcija gasova u tečnostima

Tečnosti posjeduju sposobnost absorbovanja i rastvaranja gasova dovedenih u kontakt sa njima. Ta pojava se zove *absorpcija*. Pri tome se težinska količina rastvorenog gasa mijenja pri datoj temperaturi proporcionalno pritisku tečnosti, ostajući praktično zapreminski stalna (Henrijev zakon).

U prirodnom stanju voda uvek sadrži izvesnu količinu rastvorenog vazduha: na običnoj temperaturi i normalnom atmosferskom pritisku ovo iznosi 2% zapremine vode. Prilikom smanjenja pritiska odgovarajući dio rastvorenog vazduha se izdvaja iz tečnosti. Što je veće smanjenje pritiska, to se burnije vrši izdvajanje vazduha, pri tome se obrazuje i para tečnosti. Voda dolazi u stanje hladnog ključanja, narušava se njena neprekidnost i formira se emulzijasvoje vrste, koja ima znatno veću stišljivost i savršeno je različitih fizičkih i mehaničkih svojstava nego ranije.

Izdvajanje vazduha i obrazovanje pare može nastati i pri pritiscima, većim od atmosferskih, ako se temperatura vode povišava ili je voda aerovana. To je često uzrok formiranja šuplina u dugim cjevovodima; izdvojeni vazduh i para tečnosti nagomilavaju se u za njih najvišim mestima i to može otežati ili čak sasvim zaustaviti kretanje vode.

Do izdvajanja vazduha i pare dovodi nagla pojava strujanja niz cijevi pri veoma brzom otvaranju ventila kada nastupa tzv. Hidraulički udar.

2.10. Uticaj toplote

Fizičko stanje fluida je uslovljeno u velikoj meri temperaturom, jer pod uticajem toplote fluid mijenja svoju zapreminu i gustinu. Zato je gustina funkcija temperature. Nestišljivi fluidi se upravljaju po Ge Lisakovom zakonu:

$$V_T = V_0 [1 + \beta (T - T_0)] \quad (2.11)$$

V_T, V_0 – zapremine iste fluidne mase na temperaturama T i T_0 ,
 β - koeficijent toplotnog širenja.

Kako se zapremine V_T i V_0 odnose na istu masu biće gustina ρ_T fluida na temperaturi T jednaka:

$$\rho_T = \frac{\rho_0}{1 + \beta(T - T_0)},$$

ρ_0 - gustina na temperaturi T_0

Ako su temperaturske razlike male može se smatrati da β ne zavisi od temperature. Tečnosti imaju β zaista malo. Zato tečnosti spadaju u nestišljiva tijela.

Karakteristična jednačina njihovog fizičkog stanja je:

$$\rho = \rho_0 = \text{const.}$$

Kod stišljivog fluida idealni gasovi se povinuju opštoj jednačini stanja (2.4). kada se ova jednačina pažljivo razgleda vidi se da gustina ne zavisi ni od temperature ni od pritiska.

Ako se temperatura može izdvojiti iz jednačine stanja i gustina izraziti kao funkcija pritiska:

$$\rho = \rho(p),$$

kaže se da je fluid *barotropan*, a kada je to nemoguće učiniti fluid je *baroklin*. Nestišljivi fluidi su najprostiji barotropni fluidi sa $\rho = \rho_0 = \text{const.}$ Pri izotermkim pojavama u idealnom gasu karakteristična jednačina glasi:

$$\frac{\rho}{p} = \frac{\rho_0}{p_0} = \text{const.}$$

Kod politropskih procesa je karakteristična jednačina:

$$\frac{\rho^n}{p} = \frac{\rho_0^n}{p_0} = \text{const.}$$

A kod adijabatskih gde nema razmene toplote sa okolinom, trebalo bi jedino umesto eksponenta n staviti χ (za vazduh je $\chi = 1,408$).