

2 MEHANIKA FLUIDA¹

2.1 Hidrostatika

2.1.1 Svojstva tečnosti

Tečna i gasovita tela koja se po mnogim osobinama razlikuju od čvrstih tela nazivaju se zajedničkim imenom - fluidi.

Hidrostatika (statika tečnih tela) obuhvata ponašanje tečnosti u miru.

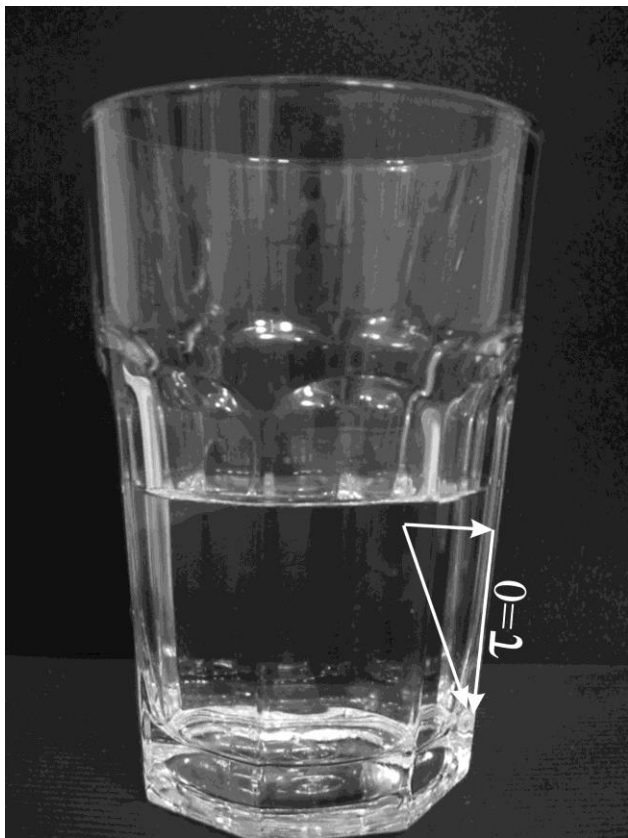
Osnovne razlike čvrstih tela i fluida navode na ideju o različitim svojstvima molekula čvrstih, tečnih i gasovitih tela. Za razliku od molekula gasova, molekuli tečnosti zadržavaju stalno rastojanje, ali takođe za razliku od molekula čvrstih tela koji imaju stalne međumolekularne veze, pokazuju veliku pokretljivost među molekulima. Pri tom, molekuli tečnosti mogu da se pomeraju prema ostalim molekulima, za šta su potrebne neznatne sile. Usled toga tečnosti ne mogu da podnesu skoro nikakvo naprezanje na smicanje.

U ovakvim okolnostima tečnosti ne mogu da održavaju svoj oblik, već zauzimaju oblik suda u kome se nalaze. Ako je sud otvoren, pokazuju pojavu slobodne površine koja je karakteristična za tečnosti. U sudu tečnost dolazi u takvo stanje mirovanja da u njoj ne postoji nikakav napon smicanja. Dejstvo tečnosti na zid suda mora biti uvek upravno na zid. Ako dejstvo tečnosti ne bi bilo upravno na zid, morala bi da postoji komponenta sile paralelna sa površinom zida.

Ova komponenta bi izazivala naprezanje na smicanje obzirom na sloj tečnosti koji je priljubljen uz nepokretni zid suda. Kako tečnost ne podnosi nikakav napon smicanja, ona će se kretati sve dok se ne uspostavi takvo stanje da dejstvo tečnosti bude upravno na zid kada su komponente paralelne zidu jednake nuli. S obzirom na stalno kretanje

¹ U poglavlju Mehanika fluida korišćeni su i tekstovi iz knjiga Boreli M., *Hidraulika*, Građevinski fakultet, Beograd, 1976 i Kruz V., *Tehnička fizika*, Školska knjiga, Zagreb, 1972.

molekula u svim pravcima, dejstvo, odnosno pritisak tečnosti na zid suda može se tumačiti udarom molekula o zid.



Udari su jednako verovatni u svim pravcima pa će sve komponente sile koje leže u ravni zida biti međusobno uravnotežene. Samo upravne komponente neće biti kompenzovane jer se udari vrše na zid samo sa jedne strane.

Slobodna površina tečnosti. S obzirom na opisana svojstva tečnosti, može se lako videti da će slobodna površina tečnosti biti uvek upravna sili koja na nju dejstvuje. Ako na tečnost deluju samo gravitacione sile, onda će slobodna površina biti horizontalna, odnosno upravna vertikalnoj gravitacionoj sili. Tako mirna površina zauzima sferan oblik, s obzirom na gravitacione sile koje su uvek usmerene ka centru zemlje. Pojava drugih sila koje nisu vertikalne, kao na primer sile kojima vetar deluje na površinu mora, prinuđuje tečnost da zauzme novo stanje, pri kome će površina opet biti vertikalna rezultanti ovih i gravitacionih sila.

Viskoznost. Pokretljivost molekula nije ista kod svih vrsta tečnosti. Voda i alkohol, na primer, teku mnogo lakše od glicerina ili teških ulja. Ovo se objašnjava time što je za pokretanje jednog sloja molekula pored drugog potrebna izvesna sila, koja je do duše mala ali ima izvesnu vrednost.

Ovakvo svojstvo tečnosti naziva se viskoznost, tegljivost, lepljivost ili unutrašnje trenje. Pri posmatranju tečnosti potrebno je po neki put zanemariti viskoznost, odnosno smatrati da tečnost nije ni malo viskozna. Takva, hipotetična, tečnost naziva se idealna tečnost ili idealan fluid. (Helijum na niskim temperaturama prelazi u tečno stanje i to u skoro idealnu tečnost.) Sa druge strane, ne postoji određena granica između jako viskozne tečnosti i čvrstog tela. Tako neke smole, pa i staklo, iako su čvrsta tela pokazuju osobine jako viskozne tečnosti.

2.1.2 Hidrostatički pritisak

U svakoj tečnosti postoji unutrašnji pritisak koji nastaje usled njene težine.

Pritisak u mirnoj tečnosti, nastao usled njene težine, na čiju površinu ne deluje nikakva spoljašnja sila naziva se hidrostatički pritisak.

Da bi odredili taj pritisak posmatraćemo u nekoj tečnosti jedan njen deo oblika vertikalnog valjka poprečnog preseka $A[m^2]$ i visine $h[m]$, čija baza leži na površini tečnosti.

Ako je specifična težina tečnosti $\gamma \left[\frac{N}{m^2} \right]$ težina valjka će biti

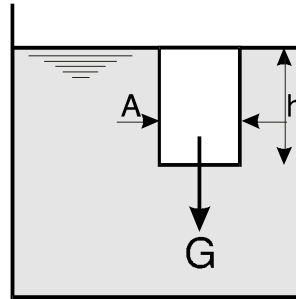
$$G = Ah\gamma \ [N]$$

Pošto je $\gamma = \rho g$, gde je ρ gustina tečnosti, tako je

$$G = Ah\rho g \ [N]$$

Kako je pritisak jednak sili na jedinicu površine, to je hidrostatički pritisak

$$p = \frac{G}{A} = \frac{A\gamma h}{A} = \frac{A\rho gh}{A} = \rho gh = \gamma h \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

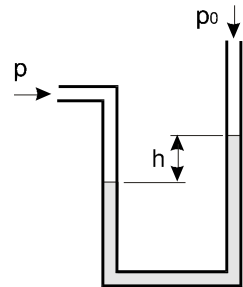


Slika 16.

Hidrostatski pritisak jednak je proizvodu visine vodenog stuba i specifične težine vode.

Manometri su sprave za merenje pritiska. Najprostiji manometri zasnovani su na merenju visine stuba tečnosti, s obzirom da je pritisak $p = \gamma h$, odnosno proporcionalan visini stuba tečnosti.

Na slici je predstavljen otvoreni manometar koji pokazuje razliku između atmosferskog pritiska p_0 i pritiska p u nekom sudu. Jedan kraj U-cevi spojen je sa sudom u kome vlada pritisak koji se meri a drugi je otvoren i u njemu vlada atmosferski pritisak. Ako su pritisci p i p_0 jednaki onda je po zakonu spojenih sudova tečnost na istom nivou u oba kraja cevi. Ako je pritisak p različit od atmosferskog, tečnost će se penjati u jedan kraj cevi dok se ne uspostavi ravnoteža.



Slika 17.

Tada razlici pritisaka $p - p_0$ drži ravnotežu pritisak stuba tečnosti

$$p - p_0 = \gamma h = \rho gh$$

Najčešće se koristi živin manometar, zbog velike gustine, jer ne kvasi zidove cevi. Ako se mere male razlike pritisaka podesnije je da se koristi vodeni ili alkoholni manometar.

Potisak. Arhimedov zakon. Tečnosti u gravitacionom polju deluju na tela potopljena u tečnost silom koja je istog pravca kao i gravitaciona sila, ali različitog smera, odnosno upravljena naviše. Ova sila kojom tečnost deluje na potopljeno telo i teži da ga istisne zove se potisak.

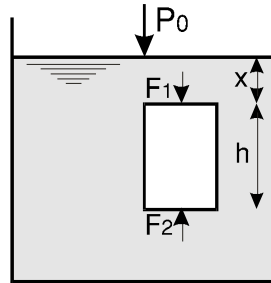
U sudu sa tečnošću potopljeno je telo oblika cilindra čija osa stoji vertikalno. Bočne sile pritiska se međusobno uravnotežuju pa ostaje samo dejstvo vertikalnih sila F_1 i F_2 . Potisak F_p tečnosti jednak je razlici tih sila odnosno

$$F_p = F_2 - F_1$$

gde je

$$F_1 = p_1 A = (p_0 + \rho g x) A$$

$$F_2 = p_2 A = [p_0 + \rho g (x + h)] A$$



Slika 18

pritisci p_1 i p_2 su pritisci u tečnosti na nivou gornjeg i donjeg kraja cilindra čija je visina h . Sila potiska je

$$F_p = F_2 - F_1 = \rho g h A$$

Proizvod ρg je γ , težina jedinice zapremine tečnosti, a hA zapremina cilindra, tako da je $\rho g h A$ težina tečnosti koja ima istu zapreminu kao i cilindar, odnosno težinu istisnute tečnosti. Prema tome na telo potopljeno u tečnost deluje potisak jednak težini tečnosti istisnute tim telom, što je poznato kao Arhimedov zakon.

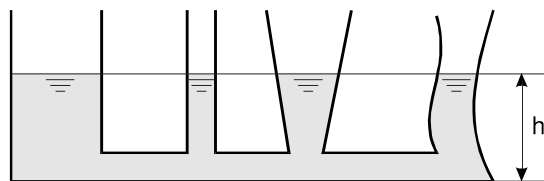
Arhimedov zakon pokazan je za vertikalni cilindar ali se može pokazati i za telo bilo kog oblika ako pretpostavimo da je sastavljeno od velikog broja cilindara ili prizmi.

Plivanje tela. Prema Arhimedovom zakonu, potisak tečnosti će biti manji od težine tela ako je gustina tečnosti manja

od gustine tela. U takvom slučaju telo pada naniže odnosno tone. U obratnom slučaju, kada je gustina tečnosti veća od gustine tela, potisak je veći od težine, telo isplivava na površinu.

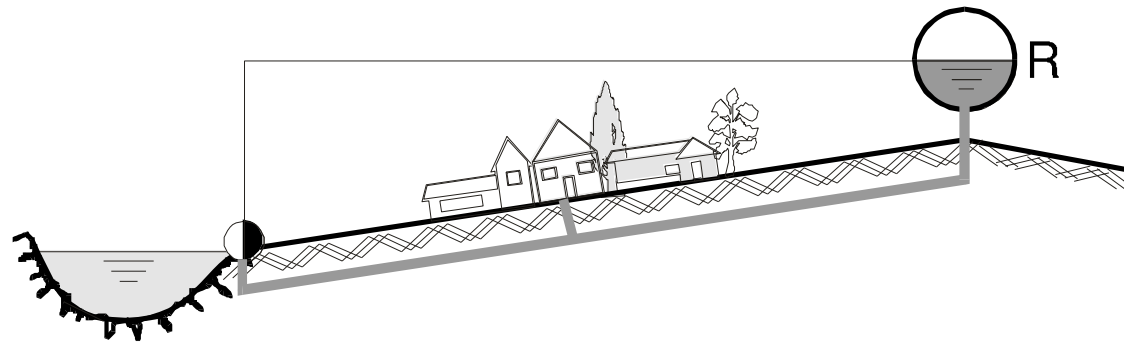
Pri plivanju telo izlazi samo izvesnim delom iznad vode, tako da se uspostavlja ravnoteža potiska i težine tela. Potisak deluje samo na onaj deo tela koji se nalazi ispod vode.

Spojeni sudovi. Hidrostatički paradoks. U spojenim sudovima koji su otvoreni tečnost stoji na istom nivou bez obzira na oblik suda. Ovo se može jednostavno objasniti time što u mirnoj tečnosti sile pritiska moraju biti u ravnoteži. Pošto pritisak u tečnosti zavisi samo od visine h i gustine ρ , proizilazi da usled jednakosti pritiska na jednom horizontalnom nivou (O-O) i visine stubova tečnosti moraju biti iste.

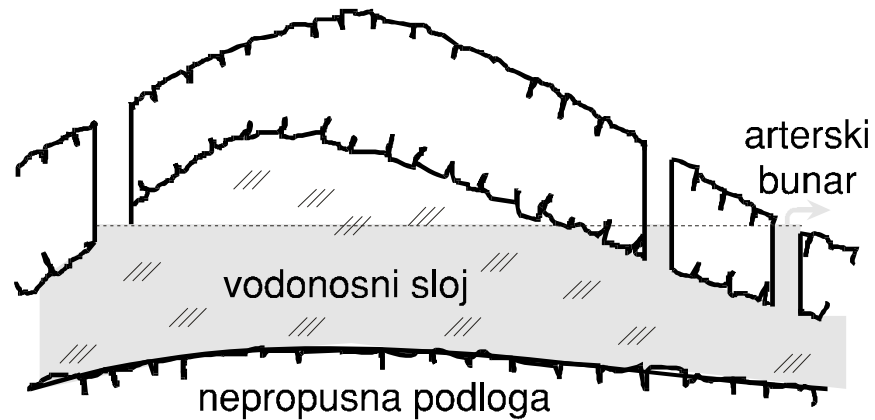


Slika 19

Primeri za primenu zakona spojenih sudova u hidrotehnici su vodovod (Slika 20) i arterski bunari (Slika 21).



Slika 20.



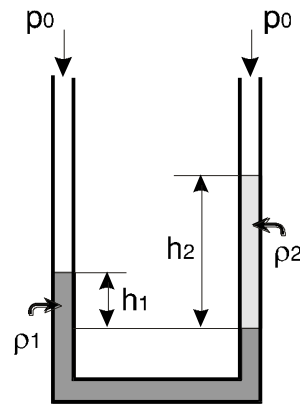
Slika 21.

U slučaju da se u spojenim sudovima nalaze različite tečnosti sa različitim gustinama, nivo u sudovima neće biti jednak. Neka su u spojenim sudovima dve tečnosti različitih gustina koje se ne mešaju, na primer, voda i živa. Visine stubova nalaze se iz uslova ravnoteže pritiska u mirnoj tečnosti. Isti atmosferski pritisak p_0 deluje na oba kraka cevi pa se može napisati uslov ravnoteže

$$\rho_1 g h_1 + p_0 = \rho_2 g h_2 + p_0$$

odakle je

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{h_2}{h_1}$$



Slika 22.

Visine stubova tečnosti stoje u obrnutoj srazmeri njihovih gustina. Ovo se može koristiti za određivanje nepoznate gustine upoređivanjem sa tečnošću poznate gustine. Veličine h_1 i h_2 se jednostavno mere, pa sa poznatom gustinom ρ_2 izlazi

$$\rho_1 = \rho_2 \frac{h_2}{h_1}$$

Pritisak zavisi samo od visine vertikalnog stuba, odnosno od dubine. Usled toga će pritisak pri dnu suda biti isti u

sudovima različitih oblika samo ako je vertikalna visina od dna do površine tečnosti ista u svim sudovima. Ako su površine dna sudova jednake, onda će tečnost u svim sudovima delovati na dno suda istom silom bez obzira što su količine tečnosti u sudovima različite. Ova pojava se naziva hidrostatički paradoks.

2.2 Aerostatika

2.2.1 Osnovna svojstva gasova

Ekspanzivnost. Kohezija gasova je još manja nego kod tečnosti pa su njihove čestice još pokretljivije. Molekuli gasova teže da se što više rašire na sve strane pa zbog toga ispunjavaju svaki prostor koji im stoji na raspolaganju. Sila kojom se gasovi rastežu zove se ekspanzija.

Stišljivost. Zbog ekspanzije gasovi nemaju stalan oblik ni volumen. Svojstvo gasova da se mogu stisnuti na mali volumen zove se stišljivost ili kompresibilnost.

2.2.2 Aerostatički pritisak

Kako gasovi imaju težinu, oni ne vrše samo pritisak usled ekspanzije već i zbog svoje težine. Pritisak koji gasovi vrše usled svoje težine zove se aerostatički pritisak. On raste sa dubinom i na dnu suda jednak je težini vertikalnog stuba gasa. Pritisak se kod gasova rasprostire i po Paskalovom zakonu tako da postoji aerostatički pritisak na dno, zidove i u vis. Kod malih količina gasova aerostatički pritisak je zbog male težine neznatan, pa se može zanemariti. Kod većih količina gasa aerostatički pritisak je veći od pritiska zbog njegove ekspanzije.

2.2.3 Boyle-Mariotte-ov zakon

Gasovi imaju osobinu da zauzimaju zapreminu suda u kome se nalaze. Gasovi deluju pritiskom na zidove suda bez obzira na veličinu suda i teže da zauzmu što veću zapreminu. Znači da jedna količina gasa može da zauzme svaku zapreminu koja je veća od zapremine tog gasa kada se on prevede u tečno stanje. Pri promeni zapremine gasa menja se i pritisak tog gasa. Uporednim merenjem zapremine gasa i njegovog pritiska pri stalnoj temperaturi može se

ustanoviti da je pri stalnoj temperaturi zapremina gasa obrnuto srazmerna pritisku što se može izraziti kao:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p_2}{p_1}$$

odnosno

$$V_1 p_1 = V_2 p_2 = \text{const.}$$

prema tome Boyle Mariotte-ov zakon glasi proizvod iz pritiska i zapremine gasa na stalnoj temperaturi je konstantan.

Pri promeni zapremine mora se menjati i njegova gustina jer je ona određena odnosom mase gasa, koja ostaje stalna, i zapremine, koja se menja. Ako su p_0 i ρ_0 pritisak i gustina nekog gasa pri normalnim uslovima onda je gustina gasa ρ za ma koji pritisak p data relacijom:

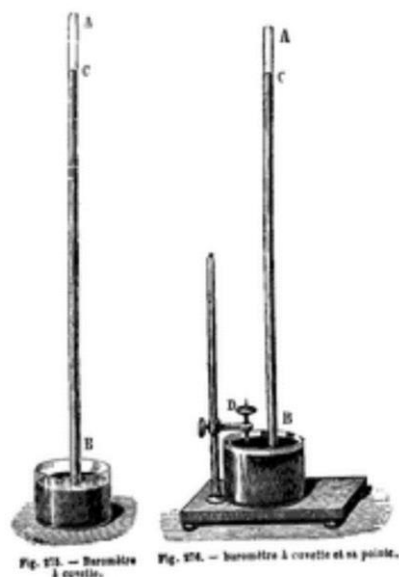
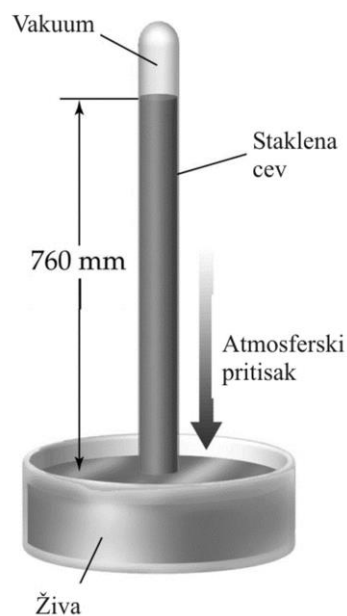
$$\rho = \rho_0 \frac{p}{p_0}$$

2.2.4 Atmosfera i atmosferski pritisak

Sloj vazduha koji okružuje Zemlju zove se atmosfera. Samo najniži slojevi imaju onu gustinu koja nam omogućava disanje. Sa visinom atmosfera postaje sve ređa jer vazduha ima sve manje. Sloj vazduha do visine od 10 km zove se troposfera a iznad 10 km stratosfera.

Vazduh vrši na svaku površinu određeni atmosferski pritisak. Taj pritisak je sve manji sa visinom jer se smanjuje sloj vazduha koji vrši pritisak. Atmosferski pritisak neposredno se meri u Toričelijevom cevi. Staklena cev dužine oko 90 cm napunjena je najpre živom i donji otvoreni kraj uronjen je u sud sa živom tako da u nju ne uđe ni malo vazduha. U

gornjem kraju neće biti vazduha pa ni atmosferskog pritiska, dok će atmosferski pritisak delovati na površinu žive u sudu. Tada se uspostavlja ravnoteža između pritiska stuba žive ρgh i atmosferskog pritiska p_0 . Na taj način određuje se atmosferski pritisak jednostavnim merenjem visine stuba h . Ta visina ne zavisi od prečnika cevi ali cev ne sme biti previše uska da ne bi kapilarne pojave došle do izražaja. Ako je visina stuba oko 760 mm onda isti toliki atmosferski pritisak drži ravnotežu težini tog stuba. Kako je specifična težina žive $\gamma = 13.595 \frac{P}{cm^3}$ stub žive od 76 cm preseka 1 cm^2 ima težinu, odnosno proizvodi pritisak:



Slika 23.

$$p = \gamma h = 13596 \frac{P}{cm^3} \times 76 cm = 1033.33 \frac{P}{cm^2} = 1.0333 \frac{kp}{cm^2}$$

Ovaj pritisak zove se fizička atmosfera (At). Fizičku atmosferu (At) treba razlikovati od tehničke atmosfere (at).

$$760 mmHg = 1.033 \frac{kp}{cm^2} = 1 \text{ fizička atmosfera (At)}$$

$$1 \text{ tehnička atmosfera (at)} = 1 \frac{kp}{cm^2} = \frac{760}{1.0333} = 735.6 mmHg$$

Osim toga kao jedinica za pritisak se koristi 1 mmHg ili 1 tor . To je pritisak koji prouzrokuje 1 mm živinog stuba na 1 cm². U meteorologiji se koristi jedinica bar ili milibar.

Odnosi između tih jedinica su sledeći:

	Paskal (Pa)	Bar (bar)	Tehnička atmosfera (at)	Fizička atmosfera (At)	Tor (tor)
1 Pa	≡ 1 N/m ²	10 ⁻⁵	1.0197 × 10 ⁻⁵	9.8692 × 10 ⁻⁶	7.5006 × 10 ⁻³
1 bar	100,000	≡ 10 ⁶ din/cm ²	1.0197	0.98692	750.06
1 at	98,066.5	0.980665	≡ 1 kgf/cm ²	0.96784	735.56
1 At	101,325	1.01325	1.0332	≡ 1 Atm	760
1 tor	133.322	1.3332 × 10 ⁻³	1.3595 × 10 ⁻³	1.3158 × 10 ⁻³	≡ 1 Tor; ≈ 1 mmHg

Primer: $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 10^{-5} \text{ bar} = 10.197 \times 10^{-6} \text{ at} = 9.8692 \times 10^{-6} \text{ At}$

Kad bismo mesto žive cev napunili vodom koja je lakša od žive 13.596 puta, vodeni stub bi bio visok $76 \times 13.596 = 10.33 \text{ m}$ pa je prema tome

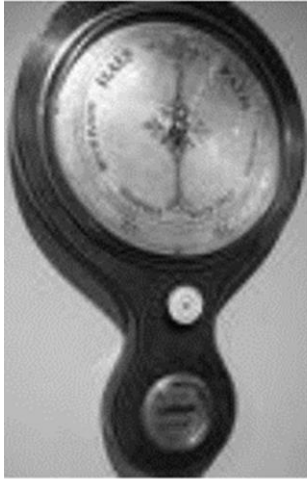
$$760 \text{ tora} = 10.333 \text{ mvs}$$

kako stub vode visine 10 m preseka 1 cm^2 ima težinu 1 kp onda je

$$10 \text{ mvs} = 1 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} = 1 \text{ at}$$

$$1 \text{ mvs} = 1000 \text{ mmvs} = 0.1 \text{ at}$$

Za merenje atmosferskog pritiska služe posebni manometri koji se u ovom slučaju zovu barometri. Najčešće se koristi živin barometar koji radi na principima Toričelijeve cevi.



Slika 24.

Atmosferski pritisak zavisi od nadmorske visine. Normalni atmosferski pritisak od 760 mmHg je srednji godišnji pritisak na nivou mora. No i na jednoj određenoj nadmorskoj visini atmosferski pritisak se menja sa vremenom. Ove promene zavise od vlažnosti vazduha i temperature. Pri većoj vlažnosti vazduha i većoj temperaturi vazduh ima manju gustinu pa je i atmosferski pritisak manji.