

UVOD U TERMODINAMIKU

PREDRAG KRALJ

Pojmovi topline i temperature

Mjerenje temperature i tlaka

Toplina i temperatura

Termodinamika se bavi konceptima topline i temperature. Objašnjava svojstva tvari i vezu između tih svojstava s mehanikom atoma i molekula. Razvoj termodinamike kreće paralelno s razvojem atomske teorije tvari. Do 1820-tih kemijski su eksperimenti pružili dovoljno dokaza o postojanju atoma. Tada su znanstvenici shvatili kako mora postojati veza između teorije topline i temperature sa strukturom tvari.

1827. botaničar Robert Brown primjećuje nasumično kretanje zrnaca peludi u tekućini. Einstein je 1905. godine objasnio kako se zrnca peludi kreću na taj način zbog sudaranja s 'nevidljivim' molekulama u tekućini te time otvorio put k razumijevanju o kretanju molekula i atomskim 'osnovama' tvari.

Termodinamika nam objašnjava složene procese u unutrašnjosti motora s unutarnjim izgaranjem, ložištima generatora pare, izmjenjivačima topline, rashladnim uređajima i dr. Općenito, bavi se promjenama tvari u svim njenim stanjima: krutom, tekućem i plinovitom.

Toplinske pojave zahtijevaju pažljivu definiciju koncepta temperature, topline i unutarnje energije. Zakoni termodinamike daju nam odnose između protoka topline, rada i unutarnje energije zatvorenog sustava. Sastav tijela je važan faktor u procjeni toplinskih pojava. Na primjer, tekućine i krutine slabo se šire kod zagrijavanja, dok se plinovi šire znatno. Ukoliko se plin nalazi u zatvorenoj posudi doći će do povišenja tlaka. Uslijed promjene termodinamičkih stanja neke tvari mogu se rastaliti, isparavati, izgarati ili eksplodirati. Također, kristali neke krute tvari samo osciliraju oko svog početnog položaja, dok se kod tekućina molekule kreću, a posebno je intenzivno kretanje molekula plinovite tvari. Neke se toplinske pojave promatraju na makroskopskoj razini (npr. tlak, temperatura i volumen plina). Međutim, plin se može promatrati i na mikroskopskoj razini – kinetička teorija plinova.

U ovom će se uvodnom predavanju objasniti pojmovi temperature i tlaka te mjerni uređaji tih dvaju fizikalnih veličina.

(nastavak)

Koncept temperature najčešće povezujemo s našim osjećajem kada dodirnemo neki 'objekt'. Čini li nam se topao ili hladan. Naši osjeti su često nepouzdati i odvede nas u krivom smjeru.

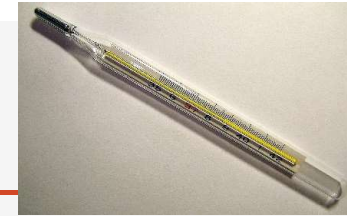
Očito, potrebna je pouzdana metoda za određivanje relativne 'vrućine' ili 'hladnoće' tijela. Metoda koja se može ponavljati i davati iste rezultate. Izumljen je veći broj termometara, no najprije razjasnimo dva pojma: **toplinski kontakt** i **toplinska ravnoteža**. Zamislimo dva objekta: A i B, koji su zatvoreni u prostoru koji je izoliran od svijeta. Oni mogu reagirati međusobno, ali ne s ostatkom svijeta. Ukoliko tijela nemaju jednaku temperaturu između njih dolazi do izmjene energije. Ta se energija zove toplina. Ako postoji mogućnost izmjene topline između tijela, tijela su u **toplinskom kontaktu**. Kada između tih tijela prestane izmjena topline, kažemo da su ta tijela u **toplinskoj ravnoteži**. Sad zamislimo da se u isti prostor uvede i objekt C – termometar. Dovedemo termometar (C) u toplinski kontakt s objektom A, dok se ne postigne toplinska ravnoteža. Isto ponovimo s objektom B. Ukoliko su očitavanja termometra ista, tada su i objekti A i B u toplinskoj ravnoteži. To je **nulti zakon termodinamike**:

Ukoliko su objekti A i B, svaki pojedinačno, u ravnoteži s trećim objektom C, tada su i objekti A i B u međusobnoj toplinskoj ravnoteži.

Ova tvrdnja je važna jer se može iskoristiti za mjerenje temperature. Dva objekta u toplinskoj ravnoteži imaju jednaku temperaturu. Ako dva objekta imaju različite temperature, oni nisu u toplinskoj ravnoteži.

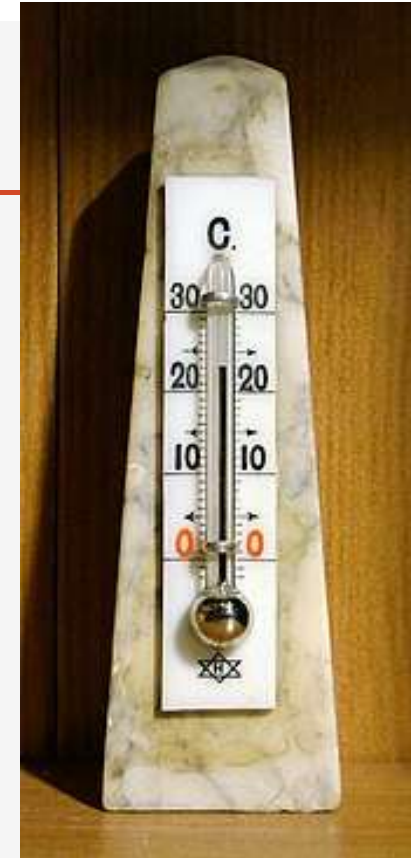
Termometri se mogu klasificirati prema fizikalnoj promjeni radnog elementa: 1) promjena volumena tekućine, 2) promjena duljine krutine, 3) promjena tlaka plina konstantnog volumena, 4) promjena volumena plina pri konstantnom tlaku, 5) promjena električne vodljivosti, 6) promjena boje.

Mjerenje temperature



Termometar je uređaj za mjerenje temperature ili temperaturnog gradijenta. Sastoji se od dva elementa: osjetnika u kojem dolazi do promjene uslijed promjene temperature i vidljive skale pomoću koje bi se trebale očitati te promjene.

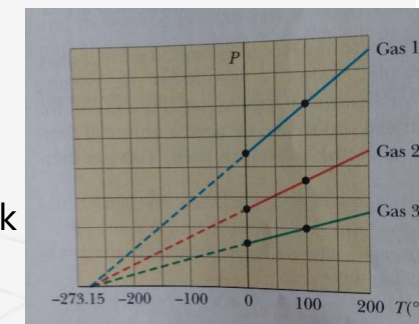
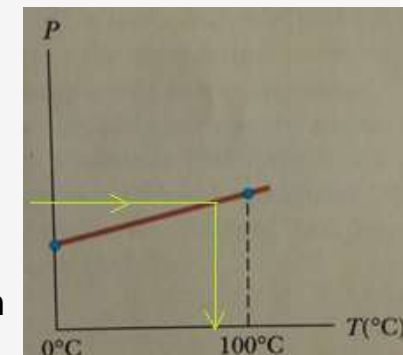
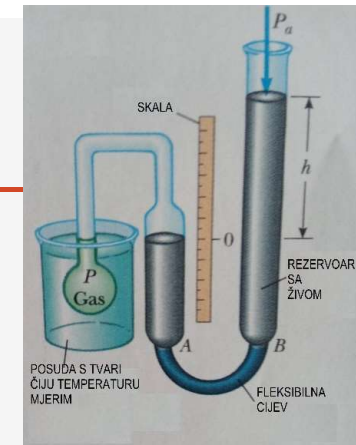
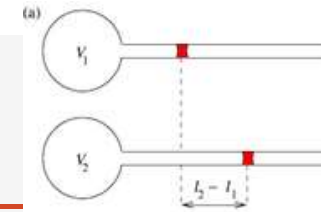
Termometar ima radnu tvar čije se fizikalno svojstvo mijenja s promjenom temperature. Najpoznatiji je termometar koji se sastoji od staklene cjevčice (pa se na engleskom zove glass thermometer) koja je ispunjena živom ili nekom drugom tekućinom (npr. alkohol za niže temperature). Porast temperature uzrokuje širenje radnog fluida pa se temperatura određuje mjerenjem volumena radnog fluida. Uređaj je baždaren i ima skalu kako bi se prema razini tekućine jednostavno očitala temperatura. Prostor iznad tekućine u cjevčici može biti ispunjen dušikom ili pod djelomičnim vakuumom. Termometri sa živom i alkoholom imaju ograničenja. Živin se ne može koristiti za mjerenje temperatura ispod -39°C , što je ledište žive, dok je alkoholni neupotrebljiv za temperature iznad 85°C . Osim toga, pojavljuje se problem kada su potrebna vrlo precizna očitavanja. Živin i alkoholni termometar, baždareni za temperature ledišta i vrelišta vode (kod atmosferskog tlaka), pokazivat će jednaka očitavanja kod tih vrijednosti, dok će zbog različitih svojstava toplinske dilatacije kod drugih temperatura pokazivati različite rezultate. Različiti su rezultati mogući i kod termometara s istom radnom tvari jer je teško proizvesti jednake kapilare.



(nastavak)

Plinski termometar nema praktičnu vrijednost, ali je značajan zbog teoretskog razmatranja. Koristi činjenicu da se Charles-ovom zakonu plinu s povišenjem temperature povećava volumen. U horizontalnu bi cijev u kojoj se širi zagrijani plin trebalo postaviti mjernu skalu. U biti je to volumni termometar i radi na istoj osnovi kao živim termometar. Ovdje se radi o plinskom termometru s konstantnim tlakom, no postoji i plinski termometar s konstantnim volumenom, kakav je prikazan na slici pored.

U ovakvom su termometru očitavanja gotovo potpuno neovisna o radnoj tvari. Termometar koristi promjene tlaka s temperaturom pri konstantnom volumenu. Kalibracija se vrši za ledište i vrelište vode. Plin (radna tvar) nalazi se zatvoren u posudi uronjenoj u vodu s ledom (dakle, temperature ledišta vode). Posuda s plinom završava sa svojevrstnom 'U' cjevčicom ispunjenom živom koja ima dvije strane (A i B – rezervoar) spojene fleksibilnom cijevi. Gornji je kraj posude B otvoren te na živu djeluje atmosferski tlak. Nakon što se posuda s plinom uroni u ledenu vodu, posuda B se diže ili spušta kako bi se razina žive u posudi A izjednačila s vrijednosti nula na skali. Visina žive h pokazuje vrijednost tlaka kod 0°C . Postupak se ponavlja za vodu koja vrije. Ponovo se podizanjem ili spuštanjem posude B razina žive u posudi A treba se izjednačiti s vrijednosti nula na skali, kako bi ostao jednak volumen plina. Vrijednost visine h određuje tlak plina kod vrelišta vode (100°C). Na osnovi tih dvaju mjerenja može se konstruirati $p - T$ dijagram kao na slici pored. Za očitavanje nepoznate temperature potrebno je očitati tlak (visinu h) te koristiti dijagram kako to pokazuje žuta strelica. Mjerenja pokazuju kako su očitavanja gotovo neovisna o plinu koji je korišten u termometru, sve dok su tlakovi niski i dok se temperature ne približavaju vrijednostima ukapljivanja korištenog plina. Slika ispod pokazuje da se ekstenzija 'krivulja' za sve plinove spaja u istoj točki – 'apsolutnoj nuli' kod koje je i tlak nula.



(nastavak)

Mnoge su metode mjerenja temperature razvijene kroz povijest: Bourdonov termometar, termopar, termistor, otporni termometar, infracrveni termometar, pirometar, Langmuirov termometar (za mjerenje temperature elektrona u plazmi) i dr.

Osnovni dio Bourdonovog termometra je spiralna cjevčica koja može biti punjena živom. Spiralna se cjevčica uslijed povišenja temperature nastoji ispružiti zbog širenja žive, dok se kod sniženja temperature 'skuplja'. Pomak spiralne cjevčica prenosi se mehanizmom na osovinu igle instrumenta. Isti će opis bit će dan kod opisa Bourdonovog manometra koji je u osnovi isti uređaj, no imaju različite mjerne skale. Slično funkcionira bimetalni termometar čiji je osnovni dio bimetalna traka. Ona se sastoji od dvaju tankih traka od dvaju metala čvrsto priljubljenih i savijenih u spiralu koji se različito šire s promjenom temperature te se tako mijenja i oblik spirale.

Termopar se sastoji od dva (različita) električna vodiča spojena u strujni krug. Uslijed izloženosti toplini stvara se razlika električnog potencijala (napon) pa se ta činjenica može iskoristiti za mjerenje temperature. Postoje parovi vodiča na bazi legura Nikla (Kromel (90% Ni + 10% Cr) – Konstantan (najčešće 55% Cu + 45% Ni); Fe – Konstantan; Kromel – Alumel (95% Ni + 2% Al + 2% Mg + 1% Si), ali i više drugih metala i legura (Pt, W, Au). Vrlo široka primjena. Temperaturni rasponi ako se radi o kontinuiranom mjerenju od -272°C do $+1700^{\circ}\text{C}$, no ako se radi o kratkotrajnom mjerenju raspon ide od -270°C do $+1820^{\circ}\text{C}$.

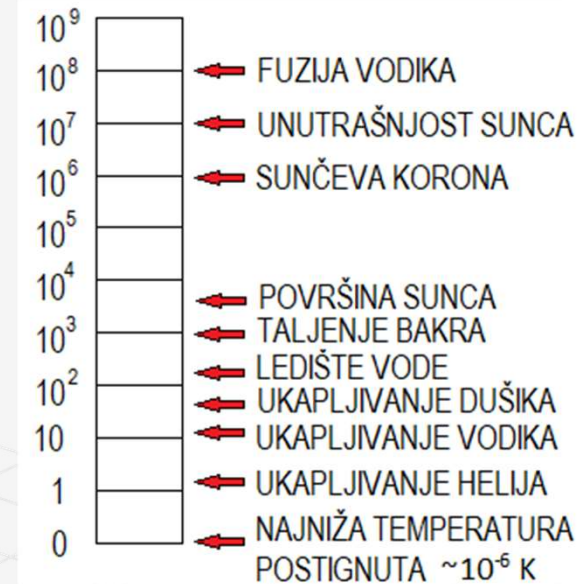


(nastavak)

Termistor je izveden poluvodičkom tehnologijom, ali kao i termopar mijenja električne veličine u strujnom krugu. Identično funkcionira i otporni termometar. Električni otpor vodiča može se izraziti $R = \rho l S^{-1}$, gdje je ρ specifičan otpor materijala ovisan o temperaturi, l duljina vodiča te S površina poprečnog presjeka vodiča. Dakle, uslijed promjene temperature mijenja se specifični otpor i uslijed toga jakost struje koja protječe strujnim krugom. Obično se izrađuje iz Platine i ima mjerni raspon od -200°C do $+1000^{\circ}\text{C}$.

Maksimalni i minimalni termometri mjere najvišu ili najnižu temperaturu tijekom nekog perioda. Primjer prvoga jest liječnički ili osobni 'toplomjer'. Živa se uslijed povišenja temperature širi te diže u kapilari, ali se ne može sama od sebe spustiti. Najjednostavniji primjer temperaturnog regulatora jest živin termometar kod kojega su u cjevčicu sa živom utaljene dvije elektrode. Kada se temperatura povisi, živa se proširi, zahvati drugu elektrodu te strujni krug djeluje na relej i isključuje grijač.

Pirometar mjeri vrlo visoke temperature. Najvažniji su termoelektrični (do 1600°C) te optički i radijacijski (do 3000°C).



Jedinice i mjere

Kako je prije navedeno, produljenje 'krivulja' u područja negativnih temperatura (dijagram gore), pokazuje da je tlak u svim slučajevima (za sve plinove) jednak nuli kod temperature od $-273,15^{\circ}\text{C}$. Ta je temperatura iskorištena za osnovu Kelvinove temperaturne skale koja je označena kao nula (0 K). Veličina jednog stupnja Kelvinove skale jednaka je Celsiusovoj te vrijedi $T_C = T - 273,15$, gdje je T_C temperatura u stupnjevima Celzija, a T temperatura u Kelvinima, ponekad nazivana i apsolutna temperatura. Raniji su plinski termometri s konstantnim volumenom koristili proceduru koja je opisana prije, no zbog teškoća u ponavljanju postupka kao nova referentna točka uzeta je trojna točka vode (stanje u kojem postoji tekuća voda, para i led, istovremeno) i koja postoji kod temperature od $0,01^{\circ}\text{C}$ i tlaka od 4,58 mm stupca žive. Na novoj je skali ta temperatura određena kao 273,16 K i skala je nazvana 'termodinamička temperaturna skala', a jedinica - Kelvin iznosi $1/273,16$ temperature trojne točke vode.

Apsolutne temperature nekih fizikalnih pojava prikazane su na skali gore. Što će se desiti s plinom ako bi se zaista postigla temperatura od 0 K? Prema prethodnom dijagramu tlak kojim plin djeluje na stjenke posude bio bi jednak nuli. Tlak plina proporcionalan je kinetičkoj energiji molekula pa bi prema klasičnoj fizici kinetička energija molekula plina bila također jednaka nuli, molekule bi se prestale kretati i 'pale' bi na dno posude. Kvantna teorija modificira taj model i pokazuje da bi ipak postojala neka 'ostatna' energija čak i kod te temperature.

Odnos Celsiusove i Kelvinove skale već je objašnjen. Razlikuju se u odabiru nulte točke, a budući su veličine jednog stupnja kod te dvije skale isti, jednaka je u iznosu i **temperaturna razlika**.

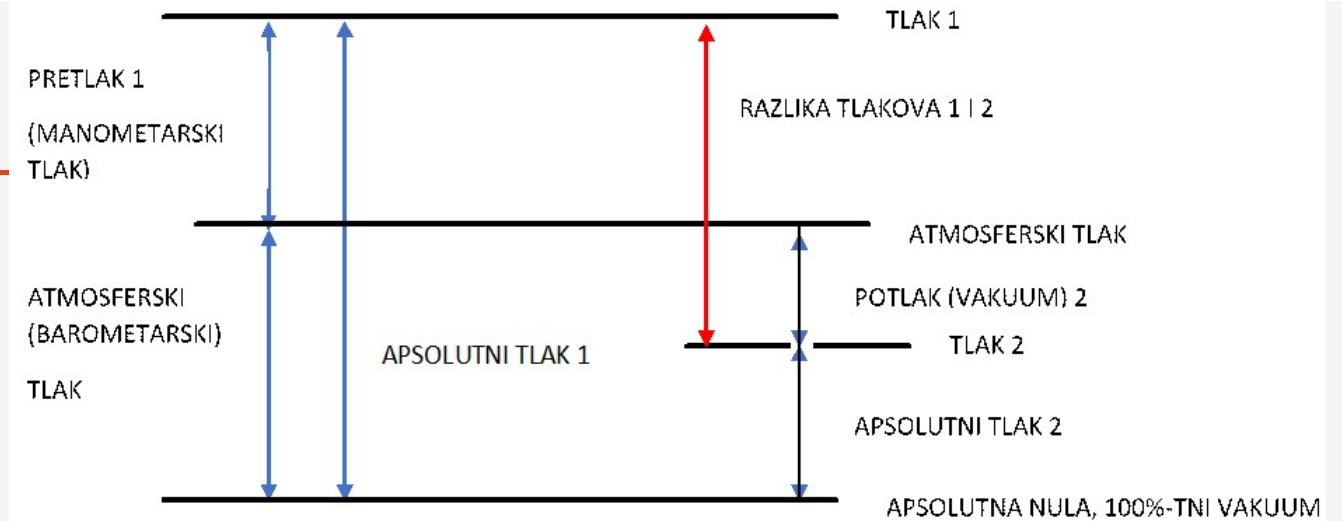
Mjerenje tlaka

Obratimo pažnju na sliku: karakteristične su veličine apsolutna nula te atmosferski tlak. Osim njih, označeni su dva nasumična tlaka: 1 i 2. Tlak 1 veći je od atmosferskog, dok je tlak 2 niži.

Vrijednost tlaka 1 može se izraziti: $p_{1,aps} = p_{1,man} + p_{atm}$ (1),

dakle zbroj je atmosferskog tlaka i pretlaka (manometarskog tlaka).

Vrijednost tlaka 2, koji je niži od atmosferskog, može se izraziti: $p_{2,aps} = p_{atm} - p_{1,vac}$ (2), tj. od atmosferskog se tlaka mora oduzeti vrijednost potlaka (vakuuma).



Razlika se tlakova može izračunati na dva načina: $\Delta p = p_{1,aps} - p_{2,aps}$ (3)

ali ako se u izraz (3) uvrste (1) i (2) slijedi $\Delta p = p_{1,man} + p_{atm} - (p_{atm} - p_{1,vac})$ (4)

ili $\Delta p = p_{1,man} + p_{atm} - p_{atm} + p_{2,vac}$ (5)

U izrazu (5) drugi i treći se član s desne strane poništavaju pa vrijedi

$\Delta p = p_{1,man} + p_{2,vac}$ (6),

a to je jasno i sa slike!

Mjerenje barometarskog tlaka

Barometar je mjerni uređaj za mjerenje tlaka zraka (atmosfera). Najjednostavniji je s cjevčicom oblika slova U. Dulji je krak zatvoren, a kraći otvoren. U cjevčici je živa, a u zatvorenom je kraku iznad nje apsolutni vakuum. Prema 'zakonu o spojenim posudama', zbog veće vrijednosti tlaka koji djeluje na živu na otvorenom kraju, ona zauzima položaj kao na slici. 'U' cjevčica u biti mjeri razliku tlakova, no kako je u zatvorenom kraju vakuum (=0), tada se na mjernoj skali očitava atmosferski tlak p_a prema izrazu za jednakost tlakova u referentnom presjeku

$$p_o + \rho g H_{lijevo} = p_{atm} + \rho g H_{desno}$$

no kako je $p_o=0$ (100%-tni vakuum) i $H_{desno}=0$ vrijedi

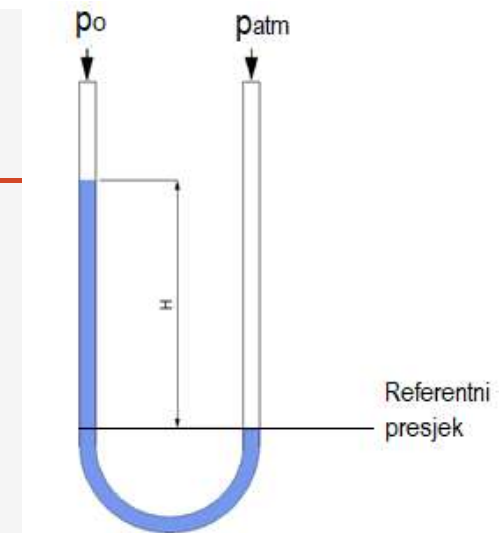
$$H_{lijevo} = \frac{p_{atm}}{\rho g}$$

Mjerna skala je baždarena s obzirom na gustoću žive.

Brodski je barometar, na slici pored, fiksiran kardanskim zglobovima kako bi cijev uvijek bila okomita.

Na brodovima, ali i u meteorologiji općenito važan je barograf. Promjene tlaka zapisuju se na 'beskonačnoj traci'. Umjesto njega može se koristiti barometar koji osim mjerne igle ima i rukom podesivu iglu. Ona se postavi iznad pomične te se s protekom vremena može ustanoviti pada li atmosferski tlak, što je znak nadolazećeg lošeg vremena (meteorološkog) ili raste.

Vidi još i: suhi barometar te visinomjer.



Mjerenje pritiska i vakuma

Mjerni uređaji koji mjere pritisak i vakuum. Neki imaju obje skale pa se u nekim izvorima nazivaju manovakuummetri. Vrijednost '0' znači atmosferski tlak.

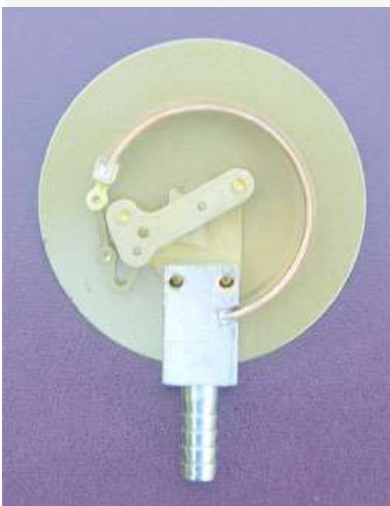
Na brodu je tipičan manometar ili manovakuumetar s Bourdonovom cijevi. Mehanizam takvog uređaja prikazan je na slici. Tlak koji se mjeri djeluje kroz donju cijev pomoću koje se mjerni instrument spaja s posudom. Kod porasta tlaka savijena cjevčica nastoji se ispružiti, zakrećući mehanizam u smjeru kazaljke sata. Osovina igle, koja je u središtu mehanizma, okreće se u istom smjeru, pa igla pokazuje veći tlak.

Budući su strojarnice današnjih brodova automatizirane, gotovo sve se izmjerene veličine prenose u mjesta daljinske kontrole i nadzora (npr. kontrolna prostorija strojarnice). Instrumenti, čiji se signal treba prenijeti na neko udaljeno mjesto, osim mjernog dijela, imaju objedinjenu funkciju pretvarača signala. Signal je u pravilu električni impuls, što je zgodno ukoliko se izmjerena veličina prikazuje na ekranu računala, no ukoliko izmjerenu veličinu želimo prikazati analogno, tada se impuls mora pretvoriti u tlačni (analogni) signal.

1 Tehnička atmosfera

2 Na nekim brodskim instrumentima još se uvijek može vidjeti jedinica kg/cm^2 što je isto

3 Standardna ili normalna ili fizikalna atmosfera



	paskal	bar	tehnička atmosfera	standardna atmosfera	torr (mmHg)	funta sile po četvornom palcu
1 Pa	$\equiv 1 \text{ N}/\text{m}^2$	$= 10^{-5} \text{ bar}$	$\approx 10,197 \cdot 10^{-6} \text{ at}$	$\approx 9,8692 \cdot 10^{-6} \text{ atm}$	$\approx 7,5006 \cdot 10^{-3} \text{ torr}$	$\approx 145,04 \cdot 10^{-6} \text{ psi}$
1 bar	$= 100\,000 \text{ Pa}$	$\equiv 10^6 \text{ din}/\text{cm}^2$	$\approx 1,0197 \text{ at}$	$\approx 0,98692 \text{ atm}$	$\approx 750,06 \text{ torr}$	$\approx 14,504 \text{ psi}$
1 at	$= 98\,066,5 \text{ Pa}$	$= 0,980665 \text{ bar}$	$\equiv 1 \text{ kp}/\text{cm}^2$	$\approx 0,96784 \text{ atm}$	$\approx 735,56 \text{ torr}$	$\approx 14,223 \text{ psi}$
1 atm	$= 101\,325 \text{ Pa}$	$= 1,01325 \text{ bar}$	$\approx 1,0332 \text{ at}$	$\equiv 101\,325 \text{ Pa}$	$= 760 \text{ torr}$	$\approx 14,696 \text{ psi}$
1 torr	$\approx 133,322 \text{ Pa}$	$\approx 1,3332 \cdot 10^{-3} \text{ bar}$	$\approx 1,3595 \cdot 10^{-3} \text{ at}$	$\approx 1,3158 \cdot 10^{-3} \text{ atm}$	$\equiv 1 \text{ mmHg}$	$\approx 19,337 \cdot 10^{-3} \text{ psi}$