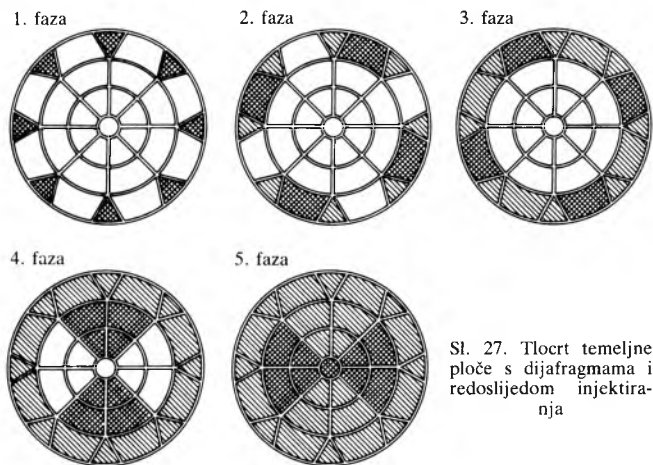


Sl. 26. Poprečni presjek platforme Ninian

stupac suspenzije do priključaka za injektiranje na osnovi temelja kompenzirao tlak mora u toj dubini. Tu je smještena još miješalica za ponovno miješanje smjese, a ispod nje, u dva kata, po 8 klipnih pumpa za tlak do 4,0 MPa i većeg kapaciteta za tlak do 1,0 MPa. Odatle je smjesa kroz cijevi pumpana do osam mjesta koja su istodobno injektirana u svakoj fazi rada (sl. 27). Cijela je osnovka injektirana u pet faza. Kako je masa punila pojedine prostore, more je iz njih ispušteno kroz posebne cijevi, koje su bile zatvorene ventilima kad je iz njih počela izlaziti nerazrijeđena smjesa. Tada je injektiranje nastavljeno dok nije dosegnut granični tlak od 1,0 MPa u srednjim i 1,0...2,0 MPa u vanjskim ćelijama. Prilikom injektiranja ćelija u vanjskom prstenu ronionci su kontrolirali brtvenje dijafragme oko vanjskog ruba temelja. Tijekom 7 dana neprekidnog rada sve su ćelije ispunjene, a ukupni je potrošak mase iznosio 4900 m³ cementa i pepela.



Sl. 27. Tlocrt temeljne ploče s dijafragmama i redoslijedom injektiranja

S obzirom na značenje kvalitete ispune za sigurnost gotove platforme sve su faze rada rigorozno kontrolirane i dokumentirane, a uzorci su smjese ispitivani, što je bila osnovna dokumentacije za konačno preuzimanje gotove platforme i njenu predaju u eksploataciju.

LIT.: K. Terzaghi, Theoretical Soil Mechanics. J. Wiley & Sons, New York 1943. – F. Verić, Proračun plošnih temeljnih konstrukcija na uslojenom tlu (disertacija). Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 1976. –

E. Nonveiller, Mehanika tla i temeljenje građevina. Školska knjiga, Zagreb 1981. – E. Nonveiller i dr., Gründungsschacht 60 m tief als Brunnen abgesenkt. Bauingenieur, Berlin 1982. – S. Polić, Numerički informatički aspekti problema deformacije elastične ploče na elastičnom poluprostoru (disertacija). Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 1984.

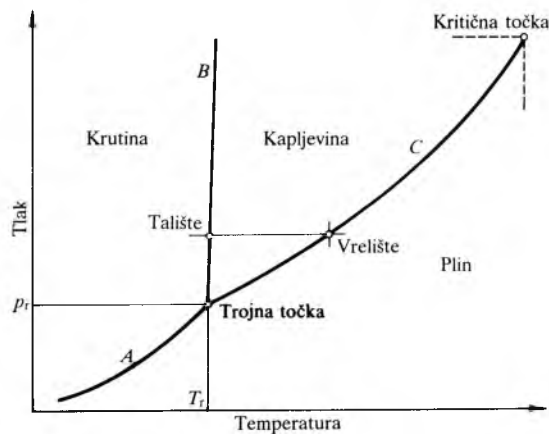
E. Nonveiller

TEMPERATurna MJERENJA, TEMELJNA,
postupci za što točnije određivanje temperature.

Termodinamička temperatura. Međunarodno normirana fizikalna veličina termodinamička temperatura (*T*) i njezina međudržavno određena mjerna jedinica kelvin (K) temelj su svih temperaturnih iskaza. Termodinamička se temperatura definira jednadžbom stanja idealnih plinova, povezanošću topline i rada u Carnotovu kružnom procesu, jednadžbama statističke termodinamike ili na koji drugi način, ali takav da njezino mjerenje ne ovisi o termometrijskom sredstvu. Tako npr. iz jednadžbe stanja idealnog plina $pV = kNT$ proizlazi idealizirana mjerna jednadžba:

$$T = \frac{pV}{kN} = \text{const.} \times pV, \quad (1)$$

gdje je *p* plinski tlak, *V* plinski obujam, *N* brojnost istovrsnih plinskih jedinki, a *k* Boltzmannova konstanta.



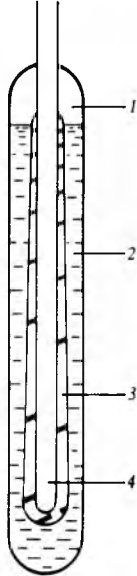
Sl. 1. Položaj trojne točke i drugih čvrstih temperaturnih točaka u faznom dijagramu. A krivulja sublimiranja, B krivulja taljenja (skrućivanja), C krivulja isparivanja (kondenzacije)

Međudržavnim sporazumom prihvaćeni su 1967. definicija, naziv i znak za jedinicu termodinamičke temperature kelvin. To je jedna od sedam osnovnih jedinica SI (v. *Metrologija, zakonska*, TE 8, str. 500). Kelvin je definiran tako što je vodi u trojnom stanju (sl. 1) pridijeljena termodinamička temperatura $T_t(\text{H}_2\text{O}) = 273,16 \text{ K}$. Sastav vode propisan je međunarodnim dogovorom o udjelima vodikovih i kisikovih izotopa. Broj 273,16 definicijska je konstanta, tj. bespogrešan broj koji potječe iz povijesnog razvoja termometrije. Jedinica kelvin definirana je jednadžbom

$$K = \frac{T_t(\text{H}_2\text{O})}{273,16} \quad (2)$$

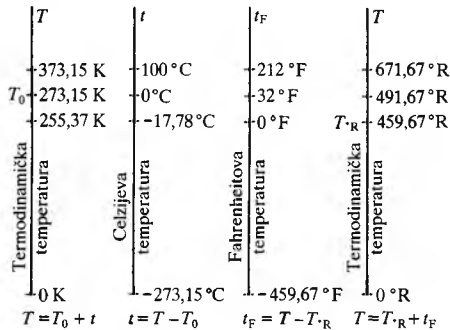
ili iskazom: kelvin je 273,16-i dio termodinamičke temperature vode u trojnom stanju. Iz definicije je očito da se suvremena termometrija temelji na jednoj ishodišnoj termometrijskoj točki, a ne na dvije kao u prošlosti (vrelšte i ledište vode). Temperatura $T_t(\text{H}_2\text{O})$ ostvaruje se s ponovljivošću $\pm 0,05 \text{ mK}$ u staklenoj ćeliji (sl. 2) koja se u pravilu drži u ledenoj kupelji, tj. na temperaturi koja se od temperature trojne točke vode razlikuje za $\sim 0,1 \text{ K}$. Ćelija je od stakla, lijevanog kremenja ili kovine (v. sl. 11), a prilikom upotrebe stavlja se u Dewarovu posudu s mješavinom vode i nastrugana leđa. Ona je za vrhunska mjerenja pogodna dva do tri dana pošto

se kompletira i oklopi od dozračivanja energije iz okoliša, jer svježoj čeliji u tom vremenu temperatura poraste za $\sim 0,2$ mK, a zatim tjednima ostaje na vrijednosti 273,16 K s nesigurnošću $\pm 0,05 \dots 0,1$ mK. Promjenu može uzrokovati mjerna struja otporničkog termometra u čeliji. Taj je utjecaj reda veličine 2 mK/mA^2 . Smanjuje se do pet puta oklapanjem termometra aluminijskom cjevčicom, a toplinski učinak mjerne struje uklanja se korekcijom koja se dobiva redukcijom rezultata s više struja na nultu vrijednost.



Sl. 2. Pojednostavnjeni presjek čelije promjera 40...70 mm kojom se temperatura vode od 273,16 K ostvaruje s ponovljivošću oko $\pm 0,05$ mK. 1 vodena para pri vrhu zataljene čelije, 2 odzračena veoma čista voda propisana sastava, 3 led, 4 šupljina s prijenosnom kapljevina (obično voda) u koju se stavlja osjetilo platinskog otporničkog termometra ili kojega drugog mjernog uređaja

U angloameričkom jezičnom području ponekad se termodinamička temperatura iskazuje jedinicom Rankineov stupanj (engl. degree Rankine; znakovi $^{\circ}\text{R}$, deg R, $^{\circ}\text{Rank}$, R). Ta je jedinica 1,8 puta manja od kelvina (sl. 3), tj. $^{\circ}\text{R} = (5/9) \text{ K}$, odnosno $\text{K} = (9/5) ^{\circ}\text{R} = 1,8 ^{\circ}\text{R}$.

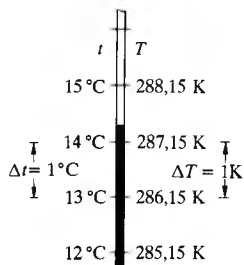


Sl. 3. Neke karakteristične točke termodinamičke, Celzijeve i Fahrenheitove temperature iskazane kelvinima (K) te Celzijevim stupnjemima (°C), Fahrenheitovim stupnjemima (°F) i Rankineovim stupnjemima (°R)

Celzijeva i Fahrenheitova temperatura. Fizikalna veličina *Celzijeva temperatura* (t ; θ) međunarodnim je dogovorom određena jednadžbom

$$t = T - T_0, \quad (3)$$

gdje je $T_0 = 273,15$ K. Jedinica je Celzijeve temperature Celzijev stupanj (°C) definiran međunarodnim dogovorom



Sl. 4. Prikaz Celzijeve (t) i termodinamičke (T) temperature na istom termometru

tako da je Celzijev stupanj jednak kelvinu:

$$^{\circ}\text{C} = \text{K}. \quad (4)$$

Prema tome je Celzijev stupanj poseban naziv za jedinicu kelvin kad se iskazuje vrijednost Celzijeve temperature (sl. 4). Takav je međunarodni dogovor prihvaćen 1967. kako bi se i nazivom jedinice naznačilo da je riječ o Celzijevoj temperaturi (t), a nije o termodinamičkoj temperaturi (T).

U angloameričkom se jezičnom području ponekad upotrebljava fizikalna veličina *Fahrenheitova temperatura*:

$$t_{\text{F}} = T - T_{\text{R}}, \quad (5)$$

gdje je $T_{\text{R}} = 459,67$ °R. Iskazuje se jedinicom Fahrenheitov stupanj (engl. degree Fahrenheit, °F):

$$^{\circ}\text{F} = ^{\circ}\text{R} = \frac{\text{K}}{1,8} = \frac{^{\circ}\text{C}}{1,8}. \quad (6)$$

Fahrenheitova se temperatura preračunava u Celzijevu prema izrazu

$$t = t_{\text{F}} - 32 ^{\circ}\text{F}. \quad (7a)$$

Prema (6) omjer je jedinica $^{\circ}\text{F}/^{\circ}\text{C} = 5/9$, pa se izraz (7a) može napisati pregledniji za računanje:

$$t = \frac{5}{9} \left(\frac{t_{\text{F}}}{^{\circ}\text{F}} - 32 \right) ^{\circ}\text{C}. \quad (7b)$$

Ako je npr. izmjereno $t_{\text{F}} = 140$ °F, pripadna će Celzijeva temperatura iznositi $t = (5/9)(140 - 32) ^{\circ}\text{C} = 60$ °C. Iskazi $t_{\text{F}} = 140$ °F i $t = 60$ °C opisuju isto temperaturno stanje. Pogrešni su iskazi 140 °F = 60 °C, 0 °C = 32 °F i slični.

Jedinice Fahrenheitov stupanj i Rankineov stupanj nisu zakonite u našoj zemlji.

Iskazivanje temperaturnih razlika. Prema međunarodnoj normi ISO 31/4 termodinamička se temperaturna razlika

$$\Delta T = T_1 - T_2 \quad (8)$$

iskazuje kelvinom i decimalnim jedinicama koje se tvore od kelvina, npr. milikelvinom (mK). Celzijeva temperaturna razlika

$$\Delta t = t_1 - t_2 \quad (9)$$

može se iskazati bilo jedinicom Celzijev stupanj (od °C ne tvore se decimalne jedinice!) bilo jedinicom kelvin i njezinim decimalnim jedinicama. Budući da je prema jednadžbi (3) $t_1 = T_1 - T_0$ i $t_2 = T_2 - T_0$, zbog $T_0 = \text{const.}$, vrijedi

$$\Delta T = \Delta t. \quad (10)$$

Stoga je često dovoljno reći temperaturna razlika a da se ne naznači o kojim je temperaturnim razlikama riječ. Ako se npr. tijelo ohladilo od $t_1 = 18,82$ °C na $t_2 = 16,35$ °C, temperaturna će razlika biti $\Delta t = t_1 - t_2 = 2,47$ °C. Da su se temperaturna stanja obilježila termodinamičkim temperaturama, onda bi za isto tijelo bilo $T_1 = 291,97$ K i $T_2 = 289,50$ K, a temperaturna bi razlika bila $\Delta T = T_1 - T_2 = 2,47$ K. U skladu s uputom ISO ispravni su ovi iskazi: $\Delta t = 2,47$ °C, $\Delta t = 2,47$ K i $\Delta T = 2,47$ K. Iskaz oblika $\Delta T = 2,47$ °C nije dopušten.

TEMELJNE MJERNE METODE

Primarne i sekundarne metode. Izravne metode mjerenja termodinamičke temperature u pravilu su namijenjene što točnijem određivanju trojnih točaka, vrelišta i krutišta onih tvari koje služe kao ishodište praktičnih mjerenja temperature (definirne čvrste točke). Te su metode primarne kad se mjerenje i mjerna jednadžba izravno oslanjaju na trojnu točku vode, $T_{\text{t}}(\text{H}_2\text{O}) = 273,16$ K, jedinu ishodišnu točku termodinamičke temperature. Kad se izravna metoda oslanja na koju drugu definirnu točku, metoda je sekundarna. Tako je npr. fotoelektrična piroometrija sekundarna metoda jer se primijenjena Planckova jednadžba zračenja oslanja na krutište zlata 1337,33 K pri normalnom tlaku. Trojna točka vode

naime ne dolazi u obzir jer većina pirometara ne bi mogla s dovoljnom točnošću detektirati signal što nastaje u savršenom zračilu pri temperaturi 273,16 K.

Plinska termometrija. Gotovo su u čitavom rasponu do 700 K metode plinske termometrije točnije od ostalih (tabl. 1). Temelj je djelovanja plinskog termometra uzastopna primjena jednadžbe stanja realnog termometrijskog plina na stanje pri mjerenoj temperaturi T i na stanje pri poznatoj referentnoj temperaturi T_r . Plin se iz jednog stanja u drugo mora dovesti uz poznatu promjenu brojnosti plinskih jedinki ili uz stalnost mase plina u mjernoj posudi. Za idealni bi plin pri $m = \text{const.}$ odnosno $N = \text{const.}$ prema jednadžbi (1) vrijedilo

$$T = T_r \frac{pV}{(pV)_r}, \quad (11)$$

gdje su indeksom r označena referentna stanja; u primarnoj je metodi $T_r = T_r(\text{H}_2\text{O}) = 273,16 \text{ K}$. Prema mjernoj jednadžbi (11) načelno su moguće tri mjerne metode: sa stalnim obujmom, sa stalnim tlakom i sa stalnom temperaturom. U praksi se primjenjuju sve tri metode.

Tablica 1
PREGLED VRHUNSKIH METODA MJERENJA
TERMODINAMIČKE TEMPERATURE

Mjerna metoda	Mjerno područje K	Nesigurnost mK
Plinska termometrija	2,4...700	0,3...15
Akustička termometrija	2...20	0,3...1
Šumna termometrija	3...1100	0,3...100
Radijacijska pirometrija	220...420	0,5...2
Spektralna pirometrija	700...2500	10...2000

Akustička termometrija temelji se na mjerenju brzine zvuka u plemenitom plinu, najčešće u heliju. Izmjerene vrijednosti termodinamičke temperature plina T i brzine zvuka u njemu c povezane su jednadžbom

$$c^2 = T \frac{R}{M} \left(\frac{c_p}{c_v} \right)_i \left[1 + B(T) \frac{n}{V} + C(T) \left(\frac{n}{V} \right)^2 + \dots \right], \quad (12)$$

gdje je R opća plinska konstanta, $M = m/n = M_r \cdot g/\text{mol}$ množinska masa plina, $(c_p/c_v)_i$ omjer specifičnih toplinskih kapaciteta pri stalnom obujmu i stalnom tlaku za idealno stanje (npr. za jednoatome plinove taj omjer iznosi 5/3), $B(T)$ i $C(T)$ akustički virijalni koeficijenti (v. *Plin*, TE 10, str. 384) pri temperaturi T , a n/V množinska gustoća plina koja je razmjerna tlaku ako se pri mjerenju obujam ne mijenja.

Akustički je termometar zapravo interferometar kojim se pri stalnoj temperaturi u ovisnosti o tlaku mjere frekvencija zvuka i njegova valna duljina, pa otuda izračunava brzina. Obično se frekvencija zvuka u toku mjerenja održava stalnom, a mijenja se duljina akustičke šupljine. Duljina se mjeri laserski.

Šumna termometrija postupak je mjerenja temperature određivanjem srednje kvadratne vrijednosti napona šuma na električnom otporniku. Pripadna mjerna jednadžba glasi:

$$\bar{U}^2 = 4Rhf \frac{\Delta f}{\exp(hf/kT) - 1}, \quad (13)$$

gdje je R električni otpor, f frekvencija, Δf širina djelovanja frekvencijskoga detekcijskog sustava, k Boltzmannova, a h Planckova konstanta. Za temperature i frekvencije pri kojima se mjere naponi šuma vrijedi $kT \gg hf$, pa se mjerna jednadžba pojednostavnjuje u oblik

$$T = \frac{\bar{U}^2}{4kR\Delta f}. \quad (14)$$

Prema Codata 1986 vrijednosti su konstanta

$$h = 6,6260755 \cdot (1 \pm 0,60 \cdot 10^{-6}) \cdot 10^{-34} \text{ Js},$$

$$k = 1,380658 \cdot (1 \pm 8,5 \cdot 10^{-6}) \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}.$$

Budući da se širina frekvencijskog područja ne može dovoljno točno izmjeriti, u praktičnoj se primjeni napon šuma

pri mjerenoj temperaturi uspoređuje s naponom šuma pri nekoj poznatoj temperaturi, npr. pri temperaturi trojnog stanja vode. Time se postupak uvrštava među primarne termometrijske postupke, ali se ionako dugo trajanje mjerenja više nego udvostručuje. Tipična je širina frekvencijskog područja oko 100 kHz pa se pri mjerenju na razini 500 K sa standardnim odstupanjem od $\sim 10 \text{ mK}$ treba mjeriti ~ 7 sati. Na vrlo niskim temperaturama šumni se termometar izrađuje s Josephsonovim spojem.

Radijacijska termometrija. Dva su zakona zračenja na koje se oslanja radijacijska termometrija (radijacijska pirometrija). Prvi je Planckov zakon zračenja crnog tijela (savršenog zračila) prema izrazu

$$M_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T) - 1}, \quad (15)$$

gdje je M_λ spektralna odzračnost, λ valna duljina zračenja, T mjerena termodinamička temperatura. Drugo je ishodište Stefanov zakon za odzračnost (radijacijsku egzitanciju) M savršenog zračila pri temperaturi T :

$$M = \sigma T^4 \quad \text{uz} \quad \sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15 h^3 c^2}. \quad (16)$$

Prema Codata 1986 vrijednosti su konstanta

$$c_1 = 2\pi h c^2 = 3,7417749 \cdot (1 \pm 0,60 \cdot 10^{-6}) \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2,$$

$$c_2 = hc/k = 1,438769 \cdot (1 \pm 8,4 \cdot 10^{-6}) \cdot 10^{-2} \text{ Km},$$

$$\sigma = 5,67051 \cdot (1 \pm 34 \cdot 10^{-6}) \cdot 10^{-8} \text{ WK}^{-4} \text{ m}^{-2}.$$

Termometri što djeluju na temelju zakona zračenja grubo se razvrstavaju u četiri skupine pirometara: optički, fotoelektrični, s pomoću spektralnog odnosa i s pomoću ukupnog zračenja.

Optičkim pirometrima motritelj uspoređuje luminanciju predmeta kojemu se mjeri temperatura sve dok se ona ne izjednači s luminancijom usporedbene pirometrijske žarulje. Zbog toga se optički pirometri mogu upotrebljavati samo u vidljivom dijelu spektra.

Fotoelektrični pirometri razlikuju se od optičkih uglavnom po tome što ulogu ljudskog oka obavlja fotočelija, fotootpornik ili koje drugo osjetilo što proizvodi električnu struju kad se osrači. Upotrebljavaju se u automatskim registracijskim i pokaznim instrumentima.

Pirometri s pomoću spektralnog odnosa (fotoelektrični pirometri s pomoću boje) osnivaju se na pojavi da su vrijednosti spektralne odzračnosti M_λ različite u dvama različitim spektralnim segmentima. Prema tome da li se za svaku odzračnost upotrebljava posebno osjetilo (fotočelija, fotodioda i sl.) ili obje odzračnosti djeluju na isto osjetilo, pirometar je dvokanalni ili jednokanalni.

Pirometri s pomoću ukupnog zračenja (radijacijski pirometri) djeluju prema Stefanovu zakonu, a osnova su im slog termočlanaka i optički sustav kojim se dovodi zračenje na slog. Mjerno im je područje $\sim 400 \dots 3500 \text{ }^\circ\text{C}$. U vrhunske se laboratorijske svrhe upotrebljava kao osjetilo kalorimetar. Njime se izravno mjeri dozračena snaga usporedbom s poznatom električnom snagom.

Paramagnetna termometrija djeluje u području temperatura nižih od 90 K, a temelji se na Curie-Weissovu zakonu ovisnosti magnetne susceptibilnosti o termodinamičkoj temperaturi. Kao termometrijsko sredstvo u pravilu služe tzv. paramagnetne soli, npr. cerij-magnezij-nitrat. Za određivanje pak najnižih mjerljivih termodinamičkih temperatura, na razini $1 \dots 10 \text{ } \mu\text{K}$, upotrebljavaju se termometri koji se osnivaju na nuklearnim magnetnim momentima.

Dielektrična termometrija osniva se na Clausius-Mossotti-jevu zakonu. Svodi se na mjerenje dielektričnosti plina u ovisnosti o njegovoj gustoći. Veza s temperaturom T ostvaruje se s pomoću plinske jednadžbe stanja. Bitan je element uređaja električni kondenzator ispunjen helijem.

Termometrija s pomoću indeksa loma temelji se na sličnoj jednadžbi u kojoj umjesto dielektričnosti stoji indeks loma.

Plinska se mjerna ćelija ugrađuje u jednu granu Michelsonova interferometra, a potrebna se mjerenja duljine obavljaju laserom.

Temelji plinske termometrije

Mjerna jednadžba. U plinskoj se termometriji uglavnom upotrebljavaju plemeniti plinovi helij, vodik i argon. Za razliku od jednadžbe (1) za idealni plin, tim je realnim termometrijskim tvarima prilagođen oblik mjerne jednadžbe plinskog termometra koja glasi:

$$pV = RnzT \quad \text{ili} \quad pV = kNzT, \quad (17)$$

jer je $Rn = kN$. Množina n izračunava se iz brojnosti jedinki N s pomoću izraza $n = N/L$, gdje je L Avogadrova konstanta. Prema Codata 1986 Avogadrova konstanta i opća plinska konstanta imaju ove vrijednosti:

$$L = 6,0221367 \cdot (1 \pm 0,59 \cdot 10^{-6}) \cdot 10^{-23} \text{ mol}^{-1},$$

$$R = 8,314510 \cdot (1 \pm 8,4 \cdot 10^{-6}) \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}.$$

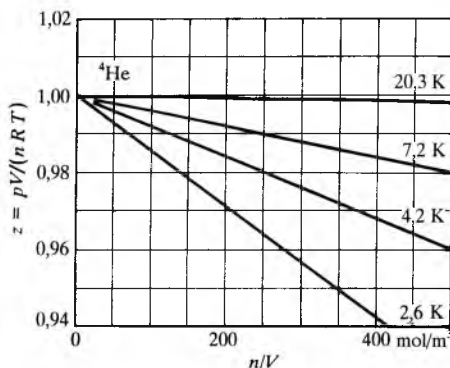
Stvarna se plinska jednadžba razlikuje od idealne faktorom stlačivosti z , koji ovisi o promjenljivim virijalnim koeficijentima B, C, \dots , koji su funkcije temperature T , te o množinskoj gustoći plina n/V . Faktor je stlačivosti

$$z = 1 + B(T) \frac{n}{V} + C(T) \left(\frac{n}{V} \right)^2 + \dots \quad (18)$$

Podaci za helij pri niskim temperaturama navedeni su na sl. 5. Katkad je povoljnije faktor z iskazati u ovisnosti o tlaku plemenitoga termometrijskog plina:

$$z = 1 + B(T) \frac{p}{RT} + [C(T) - B(T)^2] \left(\frac{p}{RT} \right)^2 + \dots \quad (19)$$

Drugi virijalni koeficijent $B(T)$ ovisi o vrsti plina i o temperaturi, a određuje se eksperimentalno, najtočnije plinskim termometrom (tabl. 2). Približno se opisuje jednadžbom $B(T) = a - b/T - c/T^2$, gdje su a, b i c konstante. Treći



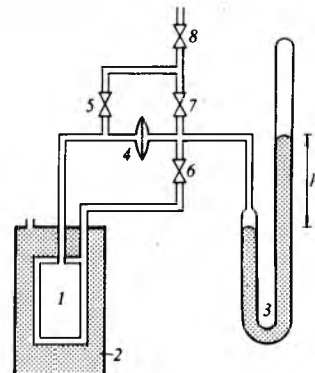
Sl. 5. Eksperimentalno određene vrijednosti faktora stlačivosti z helijeva izotopa ^4He za temperaturni raspon 2,6–20,3 K

Tablica 2
EKSPERIMENTALNO ODREĐENE
VRIJEDNOSTI DRUGOGA VIRIJALNOG
KOEFIČIJENTA B HELIJEVIH IZOTOPIA
 ^3He I ^4He ZA TEMPERATURE
3–24,5561 K

T K	$B(^3\text{He})$ cm^3/mol	$B(^4\text{He})$ cm^3/mol
3	-86,03	-120,36
3,5	-72,48	-100,19
4,2221	-58,2	-79,76
5	-47,17	-64,46
7	-29,63	-40,80
10	-16,11	-23,10
13,8033	-7,25	-11,82
15	-5,37	-9,48
17,0357	+2,78	-6,25
20,2711	+0,29	-2,49
24,5561	+3,12	+0,95

virijalni koeficijent $C(T)$ također se određuje eksperimentalno.

Plinski termometar sa stalnim obujmom u osnovi se sastoji od kovinske ili kremene mjerne posude s termometrijskim plinom i od tlakomjera (sl. 6). Valjkasta je mjerna posuda okružena protutlačnom posudom u kojoj je tlak jednak tlaku u mjernoj posudi. Tako se izbjegava ovisnost obujma posude o tlaku. Temperatura se posude može održavati na bilo kojoj ustaljenoj vrijednosti između mjerene temperature T i referentne T_r jer se nalazi u termostatiranoj kupelji.



Sl. 6. Shema plinskog termometra sa stalnim obujmom britanskog instituta National Physical Laboratory. 1 mjerena posuda ispunjena termometrijskim plinom, 2 termostatirana posuda s mogućnošću mijenjanja temperature, 3 tlakomjer, 4 razdjelna membrana, 5–8 ventili

Mjerna je posuda nepropusnim cijevima, npr. od slitine platina-rodij, spojena preko elastične razdjelne membrane sa živinim tlakomjerom koji pokazuje tlak s jedne strane membrane. Taj je tlak jednak plinskom tlaku u mjernoj posudi kad membrana nije izbočena ni na jednu stranu. Položaj se membrane može regulirati automatski jer su na njoj ugrađena osjetila što djeluju na promjenu električnog kapaciteta (nije nacrtano na sl. 6). Bitna je uloga membrane da što točnije odredi obujam koji ulazi u mjernu jednadžbu i da spriječi štetan utjecaj para na mjerni plin.

Termometrijski plin ne ispunjava samo mjernu posudu već i cijevi do membrane i ventila. Pojedini se dijelovi cijevi nalaze u područjima različitih temperatura T_i . Za svaki djelić δV_i toga štetnog (mrtvog) obujma plina vrijedi jednadžba stanja $p \delta V_i = z_i \delta n_i R T_i$, jer je u ustaljenom stanju plinski tlak isti u svim dijelovima sustava. Ukupna je množina plina u cijevima $\Delta n = \sum \delta n_i = p D / R$, gdje je $D = \sum \delta V_i / T_i$. Pritom se radi pojednostavnjenja uzima da je $z_i = 1$. Na temperaturi T u mjernoj se posudi nalazi množina plina n pa je $pV = znRT$.

Mjerni sustav sadrži ukupnu množinu plina $n + \Delta n$. Ako je mjerni postupak pravilan, a mjerno postrojenje ispravno, množina će plina biti ista i pri referentnoj temperaturi T_r , ali s drukčijim pribrojnicima, $n_r + \Delta n_r = n + \Delta n$, tj. u mjernoj će se posudi nalaziti množina plina n_r koja proizlazi iz jednadžbe stanja $p_r V_r = z_r n_r R T_r$, a u cijevima $\Delta n_r = \sum \delta n_{ri} = p_r D_r / R$, gdje je $D_r = \sum \delta V_{ri} / T_{ri}$. Iz jednakosti množina plina pri temperaturama T i T_r proizlazi da je $n_r/n = 1 + (\Delta n - \Delta n_r)/n \approx 1 + (\Delta n - \Delta n_r)/n_r$, pa je termometrijska jednadžba

$$T = T_r \frac{p V z_r}{p_r V_r z} \left[1 + \frac{T_r}{V_r} \left(\frac{p}{p_r} D - D_r \right) \right], \quad (20)$$

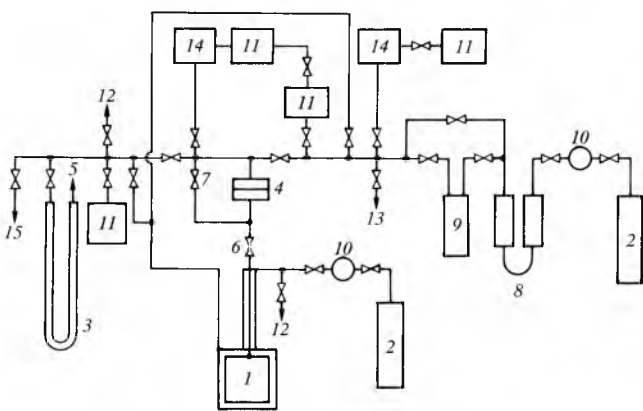
gdje je V obujam mjerne posude pri mjerenoj temperaturi T , a V_r njezin obujam pri referentnoj temperaturi T_r . Omjer V/V_r malo se razlikuje od 1. Nesigurnosti poznavanja omjera V/V_r i omjera p/p_r izravno utječu na točnost mjerenja temperature T .

Valjkasta mjerna posuda britanskog instituta National Physical Laboratory (NPL) izrađena je od bakra debljine 7 mm, a obujam joj je $\sim 1000 \text{ cm}^3$. Unutarnja je površina pozlaćena i polirana. Dijelovi su plinskog termometra međusobno spojeni cijevima od nerđajućeg čelika. Unutarnji promjer onih dijelova cijevi termometra koji se nalaze na laboratorijskoj temperaturi iznosi 2 mm, a onog dijela cijevi od mjerne posude pa do prvog ventila iznosi 1 mm. To je kompromisan izbor, jer manji provrt dođuše smanjuje poremećajnu veličinu D , odnosno D_r , ali istodobno povećava trajanje ustaljivanja tlaka i punjenja ili pak punjenja

posude. Temperature T , uzduž cijevi provrta 1 mm mjere se s pomoću šest termočlanaka.

Plinski termometar američkog instituta NIST (National Institute of Standards and Technology; do 1988. nazivao se National Bureau of Standards, NBS) ima mjernu posudu u obliku istostranog valjka obujma $\sim 430 \text{ cm}^3$. Valjak je od slitine platina-rodij (80:20) i izvana je obložen protutlačnim čeličnim valjkom, a zračnost je između njih 0,25 mm. Do prvog ventila mjerne posude vodi cijev od slitine platina-rodij unutarnjeg promjera 0,9 mm i duljine 60 cm, tako da štetni obujam ne premašuje 1% obujma mjerne posude.

Na razini $t = 100 \text{ °C}$ i $p = 1 \text{ bar}$ helijskim se plinskim termometrima postiže nesigurnost mjernog rezultata $\sim 3 \text{ mK}$. Tu donedavna nezamislivo malu nesigurnost omogućili su najsvremeniji uređaji za održavanje tzv. vakuumske higijene unutar šupljina plinskog termometra. Pod time se razumijeva takav izbor opreme i mjernog postupka da im je utjecaj na termometrijski plin zanemariv, a isto tako da je utjecaj sustava na onečišćenje plina zanemariv. Zbog toga je vrhunski plinski termometar vrlo složeno vakuusko postrojenje (sl. 7).



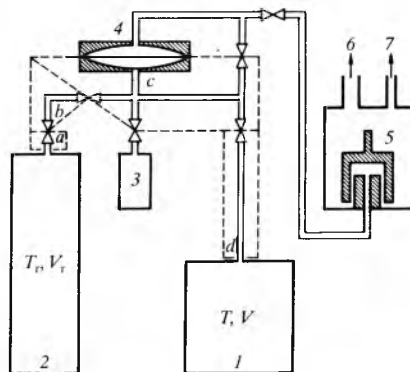
Sl. 7. Shema plinskog termometra sa stalnim obujmom američkog instituta NIST. 1 mjerna posuda, 2 spremnik helija, 3 tlakomjer, 4 razdjelna membrana, 5 prema uređaju za odsisavanje, 6 glavni ventil stalnog obujma, 7 obilazni ventil, 8 sustav za pročišćavanje helija (Ti, CuO), 9 molekularna stupica, 10 regulatori, 11 prema ionskim sisaljka, 12 prema premsaljičkama, 13 prema difuzijskoj sisaljci, 14 analizatori preostalog plina, 15 prema tlakomjeru

Da bi se saznalo koliko sustav onečišćuje termometrijski plin, mjerna se posuda grije i pritom ionskom sisaljkom prazni najmanje 30 dana. Sastav desorbiranog plina mjeri se posebnim analizatorom preostalog plina. Pritom se posuda grije $\sim 750 \text{ °C}$, a isisavanje se nastavlja sve dok udjelni tlak plina (to je na kraju obično vodik) ne padne na minimalnu vrijednost koja se još dade zapaziti. To je tlak $\sim 1,3 \text{ nPa}$ kojemu odgovara tlak $\sim 13 \mu\text{Pa}$ u mjernoj posudi. Zatim se provjerava propusnost mjerne posude tako što se u šupljinu oko nje uvede helij i mjeri da li je u mjernoj posudi porastao tlak helija. Čistoća je upotrijebljenog helija 99,9999%. Onečišćavanje termometarskih cijevi izbjegava se tako što ionske sisaljke rade stalno osim kad se plinskim termometrom mjeri.

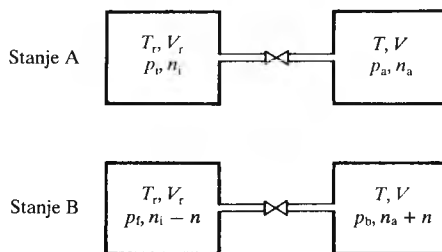
Na temperaturama višim od 500 °C točnost plinskog termometra smanjuju dvije sorpcijske pojave. Prva je desorpcija ugljik-monoksida što nastaje kad je temperatura viša od 500 °C , a druga je što znatno više vodika prolazi kroz stijenke mjerne posude i stijenke protutlačne posude. Ugljik-monoksid se desorbira relativno polako, npr. u američkom institutu NIST opaženo je da tlak poraste na $0,5 \text{ Pa}$ nakon šest tjedana pri temperaturi 660 °C (sa zatvorenim ventilom 6 na sl. 7). Nasuprot tome prodiranje je vodika naglo, a njegova koncentracija u mjernoj posudi raste pri 660 °C za više od jedne milijuntinke dnevno ako je oko posude vodik udjelnoga tlaka $0,1 \text{ Pa}$; stijenka je posude od slitine platina-rodij, a debela je 1 mm. Izborom materijala za posudu taj se nedostatak ne može otkloniti jer sve kovine, a i taljeni kremen, propuštaju vodik. Zato se poremećajni utjecaj vodika sprečava odstranjivanjem mogućih izvora vodika. To

se čini tako da se cio termostat plinskog termometra oklopi posudom s argonom pod nadtlakom.

Plinski termometar sa stalnom temperaturom ima dvije mjerne posude (sl. 8): jedna se nalazi na mjerenoj temperaturi T (npr. na temperaturi normalnog vrelišta ravnotežnog vodika, $T \approx 20,3 \text{ K}$), a druga na referentnoj temperaturi T_r (npr. na temperaturi trojnog stanja vode, $T_r = 273,16 \text{ K}$). Mjerni se postupak svodi na to da se termometrijski plin poznate temperature T_r povremeno pušta iz posude 1 u posudu 2, pri čemu obje posude i dalje ostaju na prvotnoj temperaturi (sl. 9).



Sl. 8. Pojednostavnjena shema plinskog termometra sa stalnom temperaturom (NPL). 1 mjerna posuda obujma $\sim 1 \text{ dm}^3$ na mjerenoj temperaturi T , 2 mjerna posuda obujma $\sim 6 \text{ dm}^3$ na referentnoj temperaturi T_r , 3 treća mjerna posuda obujma $\sim 39 \text{ cm}^3$ za eksperimentalno određivanje štetnog prostora u cijevima, 4 razdjelna membrana, 5 tlakomjer (rotacijska tlačna vaga), 6 prema sisaljci, 7 prema tlakomjeru, a, b, c i d područja pojedinih dijelova cijevi s termometrijskim plinom (njihovi obujmi redom iznose 0,7, 3,3, 13 i $1,5 \text{ cm}^3$)

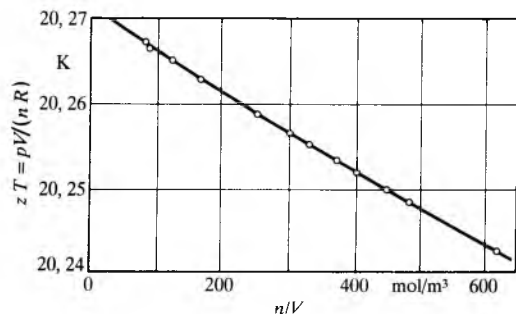


Sl. 9. Shema djelovanja plinskog termometra na sl. 8 s vrijednostima za dva stanja

Kad su ventili između posuda zatvoreni (stanje A), u prvjoj je posudi tlak p_a , a množina plina n_a . U to je vrijeme druga posuda pod većim tlakom p_i , a množina je termometrijskog plina n_i . Pripadne su jednadžbe stanja $p_a V = z_a n_a R T$ i $p_i V_r = z_i n_i R T_r$. Otvori li se za neko vrijeme spojni ventil, iz druge će posude ekspandirati množina plina n . Pošto se ventil zatvori (stanje B), u prvjoj će posudi množina plina biti $n_b = n_a + n$, a u drugoj $n_f = n_i - n$. Nakon ustaljivanja jednadžbe će stanja glasiti: $p_b V = z_b (n_a + n) R T$ i $p_f V_r = z_f (n_i - n) R T_r$. Sredjenjem tih izraza dobiva se mjerna jednadžba plinskog termometra sa stalnom temperaturom:

$$T = T_r \frac{V}{V_r} \frac{p_b}{p_i} \frac{z_b}{z_i} - \frac{z_a}{z_f} \quad (21)$$

Znači da se pomoću izmjerenih četiriju vrijednosti tlaka može izračunati temperatura T . Radi bolje preglednosti nisu uzeti u obzir utjecaji štetnog (mrtvog) prostora u cijevima. U stvarnoj mjeriteljskoj primjeni ti se utjecaji uzimaju u obzir zajedno s popravcima zbog deformacije elastične membrane, tlačne promjene obujma mjernih posuda, adsorpcije, temperaturne razlike između kupelji i mjerne posude itd.



Sl. 10. Eksperimentalno određena ovisnost umnoška $z \cdot T$ o množinskoj koncentraciji helijeva izotopa ^3He pri određivanju normalnog vrelišta ravnotežnog vodika prema ledištu vode plinskim termometrom britanskog instituta NPL

Za vrijeme opisane operacije iz prve će se posude u drugu prenijeti množina plina $n = (V_r/R T_r)(p_r/z_r - p_l/z_l)$. Nakon ustaljivanja tlaka p_b u prvoj posudi množinska će koncentracija termometrijskog plina biti $n_b/V = (p_b/z_b)(V/R T)$. Ponavljanjem opisanog postupka dobiva se niz vrijednosti mjerene termodinamičke temperature T , odnosno umnoška $z T$, u ovisnosti o pripadnoj množinskoj koncentraciji (sl. 10). Uvođenjem virijalnih koeficijenata i raznovrsnih popravaka te računanjem srednje vrijednosti i odgovarajućom analizom nesigurnosti svih postupaka saznaje se mjerni rezultat T i njegova nesigurnost. Na razini $T = 20$ K može se postići mjerna nesigurnost bolja od ± 1 mK.

Međunarodna temperaturna skala ITS-90

Praktične temperaturne skale. Istraživačku mjernu opremu za najtočnija temperaturna mjerenja plinskim, akustičkim, šumnim i drugim termometrima ima u svijetu svega desetak vrhunskih mjerilišta. Njihovi rezultati omogućuju da se međunarodnim dogovorom uspostavi sustav preporučanih temperaturnih točaka, mjerila i mjernih postupaka s pomoću kojih se relativno brzo i jeftino može točno mjeriti temperatura. Takav se sustav zove *praktična temperaturna skala* ili u novije vrijeme *međunarodna temperaturna skala*. U trenutku uspostavljanja ona je najbolje moguće približenje termodinamičkoj temperaturi. Rezolucijom Osamnaeste opće konferencije za mjere i utege te odlukom Međunarodnog odbora za mjere i utege (CIPM, 1989) uvedena je 1. siječnja 1990. Međunarodna temperaturna skala 1990 (engl. *International Temperature Scale of 1990*; ITS-90). Njzini se iskazi označuju sa T_{90} i t_{90} . Povezuje ih definicijska jednadžba

$$t_{90} = T_{90} - 273,15 \text{ K.} \quad (22)$$

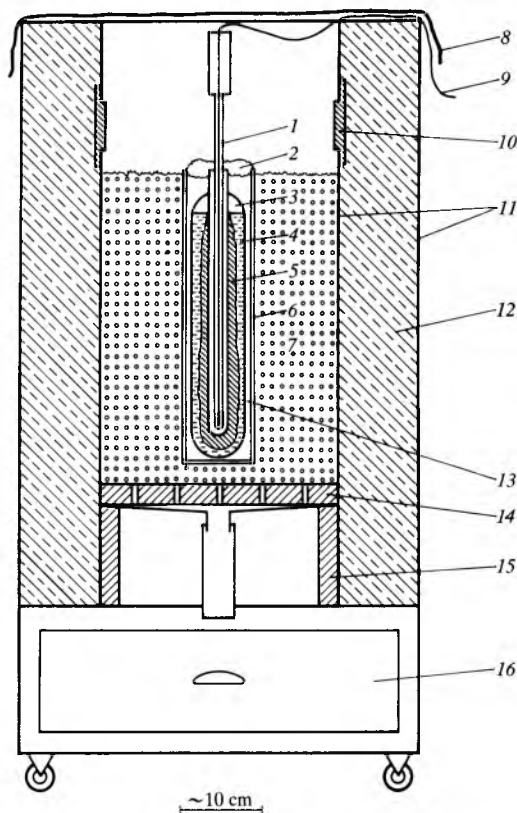
Prvu praktičnu skalu uspostavio je CIPM 1887. u obliku vodikove skale s vodikovim plinskim termometrom kao osnovom. S pomoću njega je razdijeljena temperaturna razlika između vrelišta i ledišta vode na 100 dijelova. Prema tadašnjoj razini temperaturnog mjeriteljstva vodikova je skala bila najbolje približenje termodinamičkoj temperaturi jer se u primijenjenom rasponu tlakova i temperatura vodik ponašao po ondašnjem uvjerenju kao idealni plin. Uskoro se pokazalo prijeko potrebnim da se skala međunarodnim dogovorom produlji prema višim i prema nižim temperaturama. Vrhunska mjerilišta obavila su u nekoliko desetaka godina opsežna istraživanja koja su 1927. omogućila proglašenje Međunarodne temperaturne skale 1927 (franc. *Échelle internationale de température de 1927*, EIT-27).

Između vrelišta kisika i krutišta zlata skala EIT-27 temeljila se na nizu ponovljivih čvrstih temperaturnih točaka (franc. *points fixes*) s pridijeljenim vrijednostima i na dva normirana interpolacijska instrumenta. U donjem području upotrebljavao se platinski otpornički termometar, a u području iznad 660°C platinorodijsko-platinski termočlanak. Umjeravani su s pomoću nekoliko čvrstih točaka, već prema području uporabe. Iznad krutišta zlata skala EIT-27 bila je određena na osnovi Wienova zakona zračenja, što je dovelo do opće upotrebe optičkog pirometra kao radnog termometra.

Skalu ITS-48 prihvatila je Deveta opća konferencija. Razlike su prema EIT-27 sljedeće: vrelište kisika dobilo je vrijednost $-182,97^\circ\text{C}$ (prije -190°C), krutište antimona $\sim 630^\circ\text{C}$ (660°C), krutište srebra $960,8^\circ\text{C}$ ($960,5^\circ\text{C}$), talište zlata zamijenjeno je krutištem, Wienov je zakon zamijenjen Planckovim, drugoj konstanti zračenja pridijeljena je vrijednost $1,438 \cdot 10^{-2} \text{ Km}$ (prije $1,432 \cdot 10^{-2} \text{ Km}$), promijenjene su konstante u interpolacijskim formulama, a zahtjev da bude $\lambda T < 3 \cdot 10^{-3} \text{ Km}$ zamijenjen je zahtjevom da se u pirometriji mora upotrebljavati vidljivo zračenje, tj. svjetlost.

Jedanaesta opća konferencija prihvatila je 1960. dopunjeno izdanje ITS-48. Trojna točka vode, kojoj je pridijeljena vrijednost $0,01^\circ\text{C}$, zamijenila je talište leda, krutištu cinka ($419,505^\circ\text{C}$) dana je prednost pred vrelištem sumpora ($444,6^\circ\text{C}$), promijenjene su interpolacijske formule, a ukinuto je ograničenje na vidljivo zračenje u optičkoj pirometriji. U naslov je skale došla riječ praktičan (*Échelle internationale pratique de température de 1948, édition amendée de 1960*).

Po ovlasti Trinaeste opće konferencije prihvatilo je CIPM 1968. *Međunarodnu praktičnu temperaturnu skalu 1968* (IPTS-68) koja se bitno razlikovala od prethodne. Kao posljedica brojnih istraživanja uvedene su mnoge nove vrijednosti temperature, što je praktičnu skalu dovelo bliže termodinamičkoj temperaturi. Donja je granica skale spuštena do $13,81 \text{ K}$, uvedeno je šest novih definiranih čvrstih točaka, krutište kositra dobilo je prednost pred vrelištem vode, vrelište je sumpora napušteno, promijenjene su vrijednosti temperaturnih točaka za kisik, cink, srebro i zlato, interpolacijske formule postale su zamršenije, a konstanta zračenja dobila je vrijednost $1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ Km}$. Dopunu skale IPTS-68 prihvatila je Petnaesta opća konferencija 1975. Vrijednosti temperaturnih točaka nisu mijenjane, ali je tekst učinjen



Sl. 11. Umjeravanje platinskog otporničkog termometra u trojnoj točki vode kojom se ostvaruje temperatura trojnoga stanja $T_r(\text{H}_2\text{O}) = 273,16 \text{ K}$. 1 platinski otpornički termometar, 2 čep od staklene vune, 3 vodena para, 4 voda, 5 led, 6 plastična posuda, 7 strugotine vodenog leda, 8 zaštitni prekrivač, 9 termometarski vodovi, 10 izolacijski prekiđač u stijenci spremnika, 11 čelični spremnik, 12 izolacija od polistirenske spužve, 13 zračni raspor (održavaju ga plastični odstojnici koji nisu nacrtani), 14 temeljna ploča s otvorima za odvođenje vode, 15 podupore, 16 spremnik za vodu

jasnijim. Bitne su promjene bile: kisikova je točka definirana kao kondenzacijska (prije vrelište), uvedena je trojna točka argona (83,798 K) kao dopuštena zamjena za kisikovu, prihvaćene su nove vrijednosti izotopnog sastava prirodnog neona i napuštene su vrijednosti za helijeve izotope ³He i ⁴He iz 1958. i 1962. Privremena skala u području od 0,5 do 30 K (EPT-76) uvedena je 1976.

Nova, Međunarodna temperaturna skala 1990 (ITS-90) razlikuje se od IPTS-68 u sljedećem: počinje kod 0,65 K umjesto kod 13,8033 K; bliža je termodinamičkoj temperaturi; promijenjene su sve temperaturne vrijednosti osim za trojno stanje vode; platinski otpornički termometar za visoke temperature nadomjestio je termočlanke i tako smanjio nesigurnost od 200 mK na 10 mK; primjena radijacijske pirometrije počinje već od krutišta srebra i u području do krutišta zlata nadomješta termočlanak kao interpolacijski uređaj; u čitavu temperaturnom području ponovljivija je od skale IPTS-68. Velika je praktična prednost skale ITS-90 i u tome što su u pojedinim temperaturnim područjima mogući različiti oslonci. Ako se otpornički termometar želi umjeriti samo u području u kojem će se upotrebljavati, npr. pri 20 °C, dovoljno je da se umjeravanje osloni samo na trojno stanje vode (sl. 11) i na talište galija. Ponavlja li se umjeravanje u ravnomjernim razmacima, može se tako pri 20 °C postići mjerna nesigurnost od samo nekoliko desetinki milikelvina.

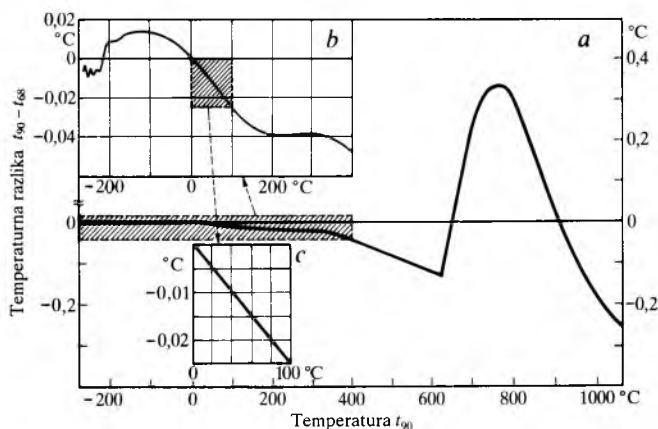
Obilježja Međunarodne temperaturne skale ITS-90. Skala ITS-90 temelji se na 17 dobro ponovljivih definiranih čvrstih temperaturnih točaka; 14 od njih sadrži tabl. 3. Preostale tri točke pripadaju helijevim izotopima ³He i ⁴He u područjima 0,65...3,2 K, zatim 1,25...2,1768 K i 2,1768...5,0 K. Svim tim točkama pridijeljene su srednje vrijednosti termodinamičkih temperatura izmjerenih u vrhunski opremljenim mjerilistima (tabl. 4). Međunarodne tehničke upute sadrže preporuke kako se normirano izrađuju, održavaju i upotrebljavaju naprave kojima se ostvaruju čvrste točke. Između njih temperatura se mjeri međunarodno normiranim instrumentima. Jednadžbe s pomoću kojih se iz rezultata tih mjerenja izračunavaju temperature također propisuje međunarodna dokumentacija o ITS-90. Pojedina područja primjene tih definicijskih jednadžbi i instrumenata ponešto se preklapaju, pa su različiti oslonci za T₉₀ uzrok mjerljivim temperaturnim razlikama. U praktičnim laboratorijskim mjerenjima te su razlike zanemarive. Otrprike se može reći da postupci i uređaji skale ITS-90 omogućuju da najveća mjerna nesigurnost ne premaši 50 mK u području ispod -173 °C, 0,2 K u blizini i iznad sobne temperature, 0,5 K do 1000 °C te 1...2 K iznad te vrijednosti.

Definirne čvrste točke termodinamička su ravnotežna stanja među fazama čistih tvari (sl. 1, tabl. 3). Za krutišta (F) i talište (M) vrijede navedene temperature samo za tlak

Tablica 3
DEFINIRNE ČVRSTE TOČKE MEĐUNARODNE TEMPERATURNE SKALE ITS-90¹⁾

Tvar ²⁾	Simbol	Stanje ³⁾	T ₉₀ ⁴⁾ K	t ₉₀ ⁴⁾ °C	ΔT/Δp mK/bar	ΔT/Δh mK/m	W _r (T ₉₀)
Vodik ⁵⁾	H ₂	T	13,8033	-259,3467	34	0,25	0,00119007
Neon	Ne	T	24,5561	-248,5939	16	1,9	0,00844974
Kisik	O ₂	T	54,3584	-218,7916	12	1,5	0,09171804
Argon	Ar	T	83,8058	-189,3442	25	3,3	0,21585975
Živa	Hg	T	234,3156	-38,8344	5,4	7,1	0,84414211
Voda	H ₂ O	T	273,16	0,01	-7,5	-0,73	1,00000000
Galij	Ga	M	302,9146	29,7646	-2,0	-1,2	1,11813889
Indij	In	F	429,7485	156,5985	4,9	3,3	1,60980185
Kositar	Sn	F	505,078	231,928	3,3	2,2	1,89279768
Cink	Zn	F	692,677	419,527	4,3	2,7	2,56891730
Aluminij	Al	F	933,473	660,323	7,0	1,6	3,37600860
Srebro	Ag	F	1234,93	961,78	6,0	5,4	4,28642053
Zlato	Au	F	1337,33	1064,18	6,1	10	
Bakar	Cu	F	1357,77	1084,62	3,3	2,6	

¹⁾ Tri helijeve čvrste točke za područje 0,65...5 K nisu navedene jer se iskazuju na poseban način. ²⁾ Prirodni izotopni sastav. ³⁾ T trojno stanje, M talište, F krutište. ⁴⁾ Temperature vrijede za tlak p₀ = 1,01325 bar (1 atm). ⁵⁾ Ravnotežni vodik.



Sl. 12. Temperaturne razlike međunarodnih skala ITS-90 i IPTS-68. a za područje -200...1000 °C, b detaljniji prikaz za područje -250...400 °C i c za područje 0...100 °C

Sa stajališta vrhunskog mjeriteljstva razlika između skala ITS-90 i IPTS-68 su znatne (sl. 12). Pri temperaturi od ~20 °C razlika je ~ -5 mK, a pri vrelištu vode ~ -25 mK. Kod 631 °C krivulja se temperaturne razlike lomi. To nastaje stoga što je na temperaturama nešto nižim od 631 °C platinski otpornički termometar i u skali IPTS-68 služio kao interpolacijski uređaj, a iznad 631 °C temperatura je t₆₈ bila definirana platinorodijsko-platinskim termočlanom.

Tablica 4
NESIGURNOST¹⁾ OSTVARENJA NEKIH TEMPERATURA²⁾

Čvrsta točka	Temperatura definirne čvrste točke T ₉₀ K	Nesigurnost ostvarenja temperature ΔT ₁ mK	Nesigurnost najboljih ostvarenja definiranih čvrstih točaka skale ITS-90 ΔT ₂ mK
⁴ He(V) ³⁾⁴⁾	4,2221	0,3	0,1
H ₂ (T)	13,8033	0,5	0,1
H ₂ (V)	~17	0,5	0,2
H ₂ (V)	~20,3	0,5	0,2
Ne(T)	24,5561	0,5	0,2
O ₂ (T)	54,3584	1	0,1
Ar(T)	83,8058	1,5	0,1
Hg(T)	234,3156	1,5	0,05
H ₂ O(T)	273,16	0	0,02
	t ₉₀ °C	Δt ₁ mK	Δt ₂ mK
Ga(M)	29,7646	1	0,05
In(F)	156,5985	3	0,1
Sn(F)	231,928	5	0,1
Zn(F)	419,527	13	0,1
Al(F)	660,323	25	0,3
Ag(F)	961,78	40	1 ⁵⁾
Ag(F)	961,78	40	10 ⁶⁾
Au(F)	1064,18	50	10 ⁶⁾
Cu(F)	1084,62	60	15 ⁶⁾

¹⁾ Statistička sigurnost 68% (1σ). ²⁾ Stanje sredinom 1990. god. ³⁾ ⁴He nije definirana čvrsta točka ITS-90. ⁴⁾ Vrelište pri tlaku 1,01325 bar (1 atm). ⁵⁾ Za platinsku otporničku termometriju. ⁶⁾ Za radijacijsku termometriju.

$p_0 = 1,01325 \text{ bar}$ (1 atm). Pri tlaku p bit će temperatura

$$t_{90}(p) = t_{90} + (p - p_0) \frac{\Delta T}{\Delta p} \quad (23)$$

Uobičajene razlike atmosferskog tlaka nemaju mjerljivih utjecaja na ravnotežne temperature. Za trojne točke (T) tlačni je učinak (tabl. 3) posljedica samo visine stupca u čeliji kojom se ostvaruje čvrsta točka. O dubini h ispod razdjelnice kapljevina-para (sl. 1) stvarna se ravnotežna temperatura izračunava s pomoću jednadžbe

$$t_{90}(h) = t_{90} + h \frac{\Delta T}{\Delta h} \quad (24)$$

Samo za vodu i galij koeficijenti imaju negativan predznak (tabl. 3).

Od svih definiranih točaka skale ITS-90 najlakše je eksperimentalno postići trojnu točku vode (sl. 11). Ostvarene temperature pojedinih trojnih točaka vode razlikuju se najviše za 0,2 mK ako se instrumenti drže u ledenoj kupelji zaštićenoj od okolnog zračenja. Pritom se temperatura tjednima održava stalnom na $\pm 0,1 \text{ mK}$. Za ostvarenje trojne točke vode i njezinu uporabu postoje upute međunarodne mjeriteljske zajednice stečene pedesetgodišnjim iskustvom. Za ostale definirne točke potrebna je bitno opsežnija laboratorijska oprema ako se žele doseći nesigurnosti predviđene skalom ITS-90 (tabl. 4 i 5).

Tablica 5
MJERITELJSKA SVOJSTVA NAJČEŠĆE UPOTREBLJIVANIH
ELEKTRIČNIH TERMOMETARA¹⁾

Vrsta termometra	Uobičajeno temperaturno područje	Tipična nesigurnost
Termometrijska veličina: električni otpor		
Germanij	1...100 K	$\Delta T/T < 2 \cdot 10^{-4}$
Rodij-željezo	0,5...30 K	0,3 mK
Platina-kobalt	2...20 K	10 mK
Ugljik	0,5...30 K	$\Delta T/T < 5 \cdot 10^{-3}$
Ugljik-staklo	0,5...100 K	$\Delta T/T < 1 \cdot 10^{-3}$
Termistor	-80...250 °C	100 mK
Platina (SPRT)	-259...630 °C	0,5 mK
Platina (IPRT)	-253...600 °C	50 mK
Termometrijska veličina: električni termonapon		
Tip S	-50...1600 °C	0,3...1 K
Tip R	-50...1600 °C	0,3...1 K
Tip B	300...1800 °C	0,5...2 K
Tip T	-200...350 °C	0,1 K
Tip E	-200...870 °C	0,1...1 K
Tip J	0...760 °C	0,5...2 K
Tip K	-200...1260 °C	0,1...3 K
Tip N	0...1300 °C	0,1...3 K
Tip W/Re	1000...2400 °C	3...10 K

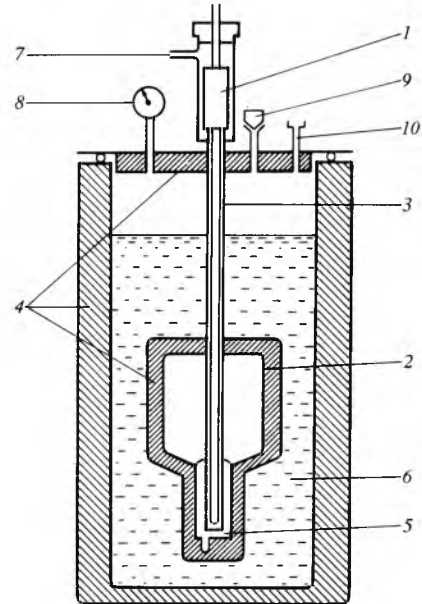
¹⁾ Stanje sredinom 1990. god.

Uporaba Međunarodne temperaturne skale ITS-90. Područje 0,65...24,5 K. U tom području ima nekoliko jednakovanih definicija za temperaturu T_{90} . One se međusobno razlikuju za najviše 0,2 mK. Između 0,65 K i 5 K temperatura T_{90} određuje se helijskim tlačnim termometrom. Pritom helijev izotop ^3He služi kao termometrijski plin u području 0,65...3,2 K, a helijev izotop ^4He u području 1,25...5 K. Temperature T_{90} izračunavaju se propisanim jednadžbama u koje se uvrštava izmjereni parni tlak. U području 3...24,5 K temperatura T_{90} mjeri se plinskim termometrom sa stalnim obujmom napunjenim helijevim izotopom ^3He ili ^4He , već prema mjernom području. Termometar se umjerava pri temperaturi trojne točke neona, trojne točke ravnotežnog vodika i jedne točke između 3 K i 5 K koja proizlazi iz tlaka helijeve pare. Iznad 13,8 K temperatura T_{90} može se mjeriti i platinskim otporničkim termometrom (tabl. 5).

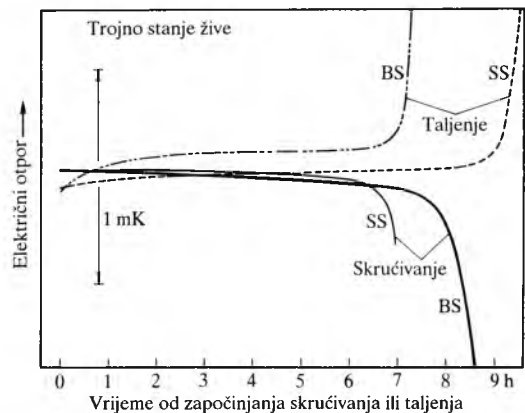
Područje 13,8...1234,93 K (961,78 °C). Kao normirani mjerni instrument u tom području služi platinski otpornički termometar prilagođen pojedinim temperaturnim rasponima. Temperatura T_{90} izračunava se iz omjera električnog otpora osjetila termometra prema izrazu

$$W(T_{90}) = \frac{R(T_{90})}{R(273,16 \text{ K})} \quad (25)$$

Platina mora biti vrlo čista i oslobođena unutarnjih napetosti, te udovoljavati ovim zahtjevima: $W(\text{M}_{\text{Ga}}) \geq 1,11807$; $W(\text{T}_{\text{Hg}}) \leq 0,844235$; $W(\text{F}_{\text{Ag}}) \geq 4,2844$. Treći se zahtjev odnosi na mjerenje od krutišta srebra (F_{Ag}). Konkretno se T_{90} izračunava s pomoću izmjerene vrijednosti $W(T_{90})$ i razlike $W(T_{90}) - W_r(T_{90})$ koja se naziva odstupanjem, jer toliko otpornički omjer upotrijebljena termometra odstupa od referentne funkcije $W_r(T_{90})$ zamišljena referentnoga platinskog termometra (tabl. 3).



Sl. 13. Umjeravanje otporničkog termometra s dugačkom zaštitnom cijevi u trojnoj točki argona (83,8058 K). 1 otpornički termometar, 2 čelična stijenska čelija, 3 termometarska cijev, 4 poliuretanska spužva, 5 smjesa krutog i kapljevito argona, 6 kupelj s kapljevitim dušikom, 7 dovod helija, 8 tlakomjer, 9 tlačni ventil, 10 dovod kapljevito dušika



Sl. 14. Promjena električnog otpora otporničkog termometra pri skrućivanju i taljenju žive u borosilikatnoj (BS) i čeličnoj (SS) čeliji kojom se ostvaruje trojno stanje žive

Ta se odstupanja određuju jednadžbama koje pripadaju tekstovnom dijelu ITS-90. U području od trojne točke argona (tabl. 3, sl. 13) do trojne točke vode (sl. 1 i 11) termometar se umjerava npr. u te dvije točke i u živinjoj trojnoj točki (tabl. 3, sl. 14). Iz odstupanja izmjerenih u tim točkama saznaju se s pomoću jednadžbe

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1] \ln W(T_{90}) \quad (26)$$

vrijednosti za a i b te se tako otpornički termometar osposobljava za vrhunsku primjenu u tom području. Što je

temperaturno područje šire, to je umjerni postupak zahtjevniji. Npr. u području od 0 °C do krutišta srebra (tabl. 3) termometar se umjerava pri trojnoj točki vode i krutištima kositra, cinka, aluminijska i srebra. Izmjerena odstupanja omogućuju da se s pomoću odgovarajućih jednadžbi saznaju pripadni faktori a , b , c i d .

Velik temperaturni raspon 13...1235 K ne može se svladati jednom vrstom normiranoga platinskog otporničkog termometra. Upotrebljavaju se tri vrste: 1) za najniže temperature u kriostatima se upotrebljava platinski otpornički termometar sa zaštitnom cjevčicom od platine ili plemenita čelika koja je duga ~60 mm. Njegov je otpor pri temperaturi trojne točke vode 25 Ω, gornja mu je granica primjene ~200 °C, a mjerna nesigurnost ~1 mK pri temperaturi 13,8 K; 2) za temperaturno područje 83...800 K otpornički termometar ima zaštitnu cjevčicu od kremena ili plemenita čelika kojoj je promjer 6 mm, a duljina 600 mm. Otpor mu je pri temperaturi trojne točke vode 25 Ω; 3) za temperaturno područje 500...962 °C zaštitna je cjevčica od kremena. Mjerni je otpornik od deblje platinske žice nego u drugih termometara pa mu je otpor pri temperaturi trojnog stanja vode tek nekoliko oma. Deblja žica pridonosi stabilnosti termometra pri višim temperaturama. Nesigurnost mu je ~5 mK pri 660 °C, a ~10 mK pri 962 °C.

Područje iznad 962 °C. Iznad krutišta srebra Međunarodna temperaturna skala ITS-90 definira temperaturu T_{90} Planckovim zakonom savršenog zračila što ga opisuje jednadžba (15). Primjenom te jednadžbe na temperaturu T_{90} i na referentnu temperaturu $T_{90}(X)$ dobiva se ishodište vrhunskog mjerenja temperature spektralnim pirometrom prema izrazu

$$\frac{M_\lambda(T_{90})}{M_\lambda[T_{90}(X)]} = \frac{\exp \frac{c_2}{\lambda T_{90}(X)} - 1}{\exp \frac{c_2}{\lambda T_{90}} - 1}, \quad (27)$$

gdje $T_{90}(X)$ označuje vrelište srebra, zlata i bakra (tabl. 3) prema kojima se pirometar umjerava da bi bio prikladan za mjerenja što viših temperatura. Nesigurnost je pirometra ~10 mK pri 962 °C, a ~2 K pri 2200 °C.

Ovisnost vrijednosti gustoće vode o ITS-90. Prijelaz od t_{68} na t_{90} uzrokuje promjenu vrijednosti gustoće vode. Ta se promjena automatski prenosi dalje, npr. na vodene mješavine. Utjecaj se osjeća i pri određivanju gustoće kapljevine i čvrstih tvari mjernom usporedbom s gustoćom vode. Pri tlaku $p_0 = 1,01325$ bar (1 atm) i temperaturi $t_{90} = 20$ °C odzračena voda ima gustoću 998,2008 kg/m³. Za vrhunsko je mjeriteljstvo važna i ovisnost temperaturne rastezljivosti vode o t_{90} .

LIT.: M. Brezinišćak, Mjerenje i računanje u tehnici i znanosti. Tehnička knjiga, Zagreb 1971. – Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90), Procès-verbaux CIPM 78 (1989). – M. Brezinišćak, D. Donlagić, L. Mihola, Međunarodna temperaturna skala ITS-90. Mjeriteljski vjesnik 9(1991)1, 1197...1206.

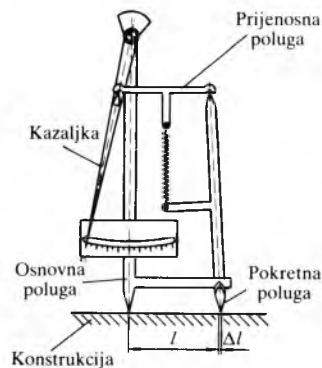
M. Brezinišćak

TENZOMETRIJA, eksperimentalna metoda mehanike kojom se na konstrukciji ili modelu određuje duljinska deformacija, da bi se odredila naprezanja na površini konstrukcije.

Tenzometar je dio mjernog uređaja kojim se određuje duljinska deformacija (v. *Nauka o čvrstoći*, TE 9, str. 284) na površini konstrukcije. Mjerenja se osnivaju na mehaničkim, optičkim, električnim ili drugim učincima koji su posljedica promjene duljine. Osnovna su obilježja svakog tenzometra: *aktivna duljina* unutar koje se mjeri prosječna deformacija, *osjetljivost*, određena najmanjom deformacijom što je tenzometar može izmjeriti, *područje mjerenja*, određeno najvećom deformacijom koja se može izmjeriti, te *točnost*, karakterizirana pogreškom mjerenja koja ovisi o tipu i konstrukciji

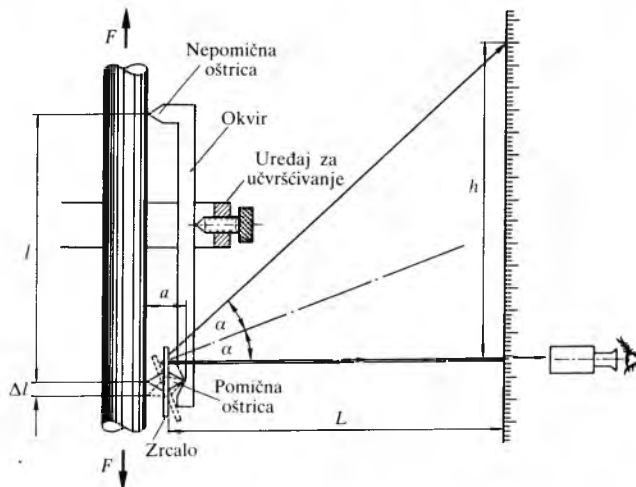
tenzometra. Tenzometri se razlikuju prema pojavama koje služe kao osnova za određivanje deformacija.

Mehanički tenzometar omogućuje mjerenje, pomoću sustava poluga, promjene udaljenosti između dviju točaka na površini konstrukcije. Upotrebljava se od početka XX. st. Najpoznatiji je Huggenbergerov mehanički tenzometar (sl. 1) koji se pomoću prikladnih mehaničkih ili magnetskih uređaja učvršćuje na odabrano mjesto na konstrukciji. Sustavom poluga stvarni se pomak na skali prikazuje do 1200 puta većim. Nedostatak je tih tenzometara, osim velike mjerne duljine, što se ne mogu učvrstiti na manje pristupačna mjesta, a nisu prikladni ni za mjerenje dinamički opterećenih konstrukcija.



Sl. 1. Huggenbergerov mehanički tenzometar. l duljina osnove, Δl produženje

Optički tenzometar vrlo je sličan mehaničkom tenzometru, samo mu je dio poluga zamijenjen svjetlosnim snopom koji se reflektira od prikladno smještenih zrcala. Tom se zamjenom smanjuje tromost mehanizma i povećava točnost očitavanja. Takav je Martensov zrcalni tenzometar (sl. 2) koji uvećava i do nekoliko tisuća puta.



Sl. 2. Martensov zrcalni tenzometar; F sila

Akustičkim tenzometrom deformacije se mjere posredno, preko promjena zvučne frekvencije napete žice koja se mijenja ovisno o deformacijama. Takvi se tenzometri odlikuju stabilnošću kroz dulje vrijeme, ali se rijetko upotrebljavaju.

Fotoelastični tenzometar osniva se na istoimenom efektu. Sloj fotoelastičnog materijala, debljine 1...2 mm, u obliku trake lijepi se na konstrukciju ili na poseban nosač. U takvom se tenzometru zbog deformacija opterećenog tijela pojavljuje fotoelastični efekt, tj. izokrome koje se promatraju u refleksijskom polariskopu. Takvi su tenzometri obično dugi nekoliko centimetara, pa prikazuju samo prosječnu vrijednost deformacija na toj duljini. Fotoelastični tenzometri nisu pogodni za određivanje deformacija u pojedinim točkama napregnute konstrukcije.

Električni tenzometar omogućuje mjerenje deformacija na temelju neke električne pojave. U takvu se tenzometru promjena duljine pretvara u promjenu neke električne veličine (električnog otpora, induktivnosti ili kapaciteta).