INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Měření fyzikálních veličin

Výukový materiál

Petr Kopelec

Tento materiál byl vytvořen v rámci projektu CZ.1.07/1.1.07/03.0027
Tvorba elektronických učebnic

VOŠ, SOŠ A SOU KOPŘIVNICE

O projektu Rozvoj 2014

Základní údaje o projektu:

Název projektu:	**Rozvoj přírodovědného a technického vzdělávání na SOŠ a SOU v Kopřivnici**
Název operačního programu:	OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
Prioritní osa:	7.1 Počáteční vzdělávání
Oblast podpory:	7.1.1 Zvyšování kvality ve vzdělávání
Předkladatel:	Vyšší odborná škola, Střední odborná škola a Střední odborné učiliště, Kopřivnice, příspěvková organizace
Partner projektu:	Porgest, a.s.
Rozpočet projektu:	9 288 965,12 Kč
Doba realizace:	14.02.2012-31.12.2014 (35 měsíců)

Cílem projektu zkráceně nazvaného Rozvoj 2014 je zvýšení kvality výuky přírodovědných i technických předmětů a odborného výcviku na VOŠ, SOŠ a SOU Kopřivnice prostřednictvím inovací obsahu příslušných vzdělávacích modulů, tvorby nových výukových i metodických materiálů a pořízení moderního vybavení pro výuku odpovídajících předmětů.

Projekt je řešen v těsné spolupráci s podniky - zaměstnavateli v regionu, abychom dosáhli co nejužšího propojení výuky s praxí. Využíváme zkušenosti partnera projektu – firmy Porgest, a. s. i dalších podniků, které projevily zájem s námi spolupracovat.

Modernizace výuky je zaměřena na tři oblasti:
- svařování,
- strojírenství,
- přírodní vědy (fyzika, chemie, biologie).

V období realizace projektu bylo vytvořeno celkem 10 vzdělávacích modulů zahrnujících metodické texty pro učitele, výukové texty pro žáky, prezentace i videosekvence. Bylo obnoveno vybavení svářečské dílny a strojní laboratoře, doplněno vybavení chemické laboratoře a vybudována nová učebna přírodovědných předmětů. Další informace a výstupy projektu jsou k dispozici na stránkách projektu www.voskop.cz/rozvoj.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

OBSAH

1 Fyzikální jednotky a veličiny 5
1.1 Měření 5
1.2 Stručná historie měření 5
1.3 Fyzikální veličiny 6
1.4 Soustava jednotek SI 6
2 Měření tlaku 11
2.1 Základní pojmy 11
2.2 Rozdělení tlakoměrů 13
2.2.1 Manometry pístové 14
2.2.2 Manometry zvonové 15
2.2.3 Kapalinové tlakoměry 16
2.2.4 Deformační tlakoměry 21
2.2.5 Elektrické tlakoměry 24
2.2.6 Měření dynamického tlaku 25
3 Měření teploty 27
3.1 Základní pojmy 27
3.2 Rozdělení teploměrů 30
3.2.1 Dilatační teploměry 32
3.2.2 Tlakové teploměry 37
3.2.3 Odporové teploměry 39
3.2.4 Termoelektrické teploměry 42
3.2.5 Speciální teploměry 45
3.2.6 Pyrometry 46
3.2.7 Fototermometry 52
3.2.8 Termovize 52
4 Měření vlhkosti vzduchu 53
4.1 Základní pojmy 53
4.2 Vlhkoměry 55
4.2.1 Psychrometry 55
4.2.2 Hygrometry 57

OBSAH

4.2.3 Rosné vlhkoměry ... 58
5 Měření intenzity osvětlení ... 59
5.1 Základní pojmy ... 59
5.2 Měření osvětlení ... 63
5.2.1 Osvětlení vnitřních prostor ... 65
6 Měření intenzity hluku ... 69
6.1 Základní pojmy ... 69
6.2 Měření hluku ... 75
6.2.1 Hluk vznikající při činnosti a používání výrobků ... 75
6.2.2 Určení expozice hluku ... 78
Seznam obrázků ... 82
Seznam tabulek ... 84
Seznam podkladů, literatury a norem ... 85

1 Fyzikální jednotky a veličiny

1.1 Měření

Měřením a vším, co s ním souvisí, se zabývá vědní obor, který se nazývá metrologie. Základní oblasti pozornosti a činnosti metrologie jsou :

- Veličiny a jejich jednotky
- Metody měření
- Prostředky měření (měřidla)
- Vlastnosti a schopnosti osob provádějících měření

1.2 Stručná historie měření

Měřením se zjišťuje okamžitá hodnota fyzikálních veličin u měřeného objektu tak, že ji srovnáváme s jednotkami, které byly předem dohodnuty, nebo byly nařízeny určeným orgánem.

Měření nás provází v našem každodenním životě. Mnohdy si ani neuvědomujeme, že činnost, kterou provádíme, lze vlastně nazvat měřením.

Historie měření sahá daleko do minulosti lidstva a propracované systémy měření a měrných jednotek jsou doloženy už tisíce let před naším letopočtem v tehdejších vyspělých kulturách na Zemi. S rozvojem dělby práce, v souvislosti se vznikem prvních obchodních vztahů, nastala potřeba stanovit určité základní velikosti veličin, které měly být porovnávány.

Nejstarší známé jednotky měření délky byly odvozovány od rozměrů částí lidského těla. Byly to jednotky jako stopa, loket, palec a podobně. Zajímavé je, že ač měly stejné nebo podobné názvy, jejich skutečné velikosti se různily v závislosti na geografických územích, kde se používaly.

Další vývoj měření a jednotek byl ovlivněn jednak vznikem nových vědních oborů (matematika, geometrie, fyzika a jiné), jednak vznikem státních útvarů, kde bylo nutno sjednotit dosud roztříštěné a obtížně porovnatelné regionální jednotky.

Provázanost měrových systémů se správními útvary je zcela zřejmá na příkladu starověkého Říma, který postupně ovládl velkou část tehdy známé Evropy a okolí Středozemního moře a kde bylo nutno na celém poměrně velkém území používat stejné měrové jednotky.

Ještě ve středověku však byly měrové soustavy a měření velmi roztříštěné a stále se jednalo spíše o jakési národní, či regionální řešení. Časem unifikace v této oblasti překračovala hranice a nalézala stále širší uplatnění až po základy dnešní podoby, která se datuje od podpisu Metrické konvence ze dne 20. května 1875 v Paříži. Tehdy tento významný metrologický dokument podepsalo 18 zakládajících států. V dnešní době má Metrická konvence 48 členských států, mezi které patří

také Česká republika (v květnu 1875 se naše země stala členem v rámci tehdejšího Rakousko - Uherska).

Po druhé světové válce bylo dohodnuto metrickou soustavu zmodernizovat tak, aby každý stát kdekoli na světě mohl přesně reprodukovat národní etalony kterékoli měrné jednotky. Vznikla nová mezinárodní soustava měrných jednotek, nazvaná Systéme International d´Unités se zkratkou SI. V roce 1971 bylo na 14. generální konferenci pro váhy a míry vybráno sedm základních veličin a odpovídajících základních jednotek, které se staly základem Mezinárodní soustavy jednotek označované zkratkou SI a nazývané také metrická soustava.

1.3 Fyzikální veličiny

Fyzikální veličina je jakákoliv objektivní vlastnost hmoty, jejíž hodnotu lze změřit nebo spočítat. Fyzikální veličiny lze posuzovat z různých hledisek. Každé hledisko má svůj význam.

Podle prvního hlediska dělíme fyzikální veličiny na:

- Skalární veličiny – jsou určeny svou velikostí a jednotkou a nezávisí na volbě souřadné soustavy, v níž je daná veličina měřena. Je to například hmotnost, čas, teplota, tlak atd.
- Vektorové veličiny – u nich kromě číselné hodnoty a jednotek musíme určit i směr a orientaci působení. To je například síla, rychlost, intenzita elektrického pole atd.

Podle druhého hlediska dělíme fyzikální veličiny na:

- Veličiny množství – udávají kvantitu, například délku, hmotnost atd.
- Veličiny stavu – udávají kvalitu, například teplotu, tlak atd.

Sečítat a odečítat lze pouze veličiny stejnorodé. Násobením nebo dělením fyzikálních veličin vznikají nové veličiny. Například dělením délkových veličin (m) časem (s) získáváme novou veličinu – rychlost (m/s).

V praxi se ukázalo, že k popisu fyzikálních jevů postačuje poměrně malý počet základních veličin. Z těchto základních veličin pak bylo možno určit další veličiny tzv. odvozené.

1.4 Soustava jednotek SI

Základní jednotky

Základní jednotky jsou vhodně zvolené jednotky základních veličin. Každá základní veličina má pouze jedinou hlavní jednotku, která slouží současně jako základní jednotka. V mezinárodní soustavě jednotek SI je sedm základních jednotek. Jsou uvedeny v následující tabulce.

Fyzikální jednotky a veličiny

Fyzikální veličina	Značka veličiny	Základní jednotka	Značka jednotky
délka	l	metr	m
hmotnost	m	kilogram	kg
čas	t	sekunda	s
elektrický proud	I	ampér	A
termodynamická teplota	T	kelvin	K
látkové množství	n	mol	mol
svítivost	I	kandela	cd

Tabulka 1 Základní jednotky SI

Definice základních jednotek

Metr je délka dráhy, kterou proběhne světlo ve vakuu za dobu 1/299 792 458 sekundy.

Kilogram se rovná hmotnosti mezinárodního prototypu kilogramu uloženého v Mezinárodním úřadu pro míry a váhy v Sèvres u Paříže.

Sekunda je doba trvání 9 192 631 770 period záření, které odpovídá přechodu mezi dvěma hladinami velmi jemné struktury základního stavu atomu cesia 133 (^{133}Cs).

Ampér je stálý elektrický proud, který při průchodu dvěma přímými rovnoběžnými nekonečně dlouhými vodiči zanedbatelného kruhového průřezu umístěnými ve vakuu ve vzdálenosti 1 metr vyvolá mezi nimi sílu 2×10^{-7} newtonu na 1 metr délky vodičů.

Kelvin je 1/273,16 díl termodynamické teploty trojného bodu vody.

Kandela je svítivost zdroje, který v daném směru vysílá monochromatické záření s kmitočtem 540×10^{12} hertzů a jehož zářivost v tomto směru je 1/683 wattu na steradián.

Mol je látkové množství, které obsahuje právě tolik elementárních jedinců (atomů, molekul), kolik je atomů v 0,012 kilogramu izotopu uhlíku ^{12}C. Při udávání látkového množství je třeba elementární jedince (entity) specifikovat; mohou to být atomy, molekuly, ionty, elektrony, jiné částice nebo blíže určená seskupení částic.

Fyzikální jednotky a veličiny

Doplňkové jednotky

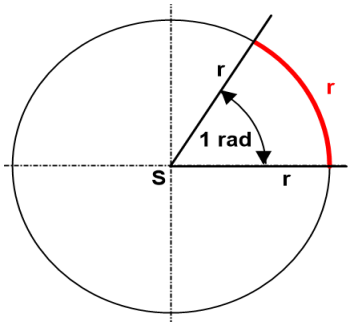
Generální konference pro váhy a míry o těchto jednotkách dosud nerozhodla, zda mají být zařazeny mezi základní jednotky nebo jednotky odvozené. Obě doplňkové jednotky jsou bezrozměrné.

Fyzikální veličina	Značka veličiny	Základní jednotka	Značka jednotky
rovinný úhel	α, φ,...	radián	rad
prostorový úhel	ω, Ω, ...	steradián	sr

Tabulka 2 Doplňkové jednotky

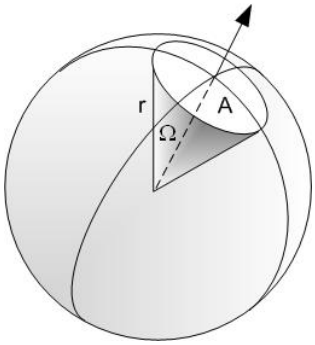
Definice doplňkových jednotek

Radián je rovinný úhel sevřený dvěma polopřímkami, které na kružnici opsané z jejich společného počátečního bodu vytínají oblouk o délce rovné jejímu poloměru.



Obr. 1 Znázornění jednotky rovinného úhlu

Steradián je prostorový úhel s vrcholem ve středu kulové plochy, který na této ploše vytíná část s obsahem rovným druhé mocnině poloměru této kulové plochy. Viz taky str. 58.



Obr. 2 Znázornění pojmu "prostorový úhel" (http://cs.wikipedia.org/wiki/Prostorový úhel)

Fyzikální jednotky a veličiny

Odvozené jednotky SI

Tyto jednotky jsou odvozeny ze základních jednotek na základě definičních vztahů, v nichž se vyskytuje násobení, příp. dělení. Dělení je v zápise odvozené jednotky obvykle nahrazeno násobením se zápornou mocninou. Některé odvozené jednotky mají vlastní názvy, převážně podle jmen významných fyziků. Přehled některých jednotek používaných v mechanice je uveden v následující tabulce:

Fyzikální veličina	Značka veličiny	Základní jednotka	Značka jednotky
plošný obsah	A	čtverečný metr	m^2
objem	V	krychlový metr	m^3
kmitočet	Hz	hertz	s^{-1}
síla	F	newton	N
tlak	p	pascal	Pa
výkon	P	watt	W
práce, energie, teplo	W, E, Q	joule	J
elektrický odpor	R	ohm	Ω
elektrické napětí	U	volt	V

Tabulka 3 Některé odvozené jednotky

Násobné a dílčí jednotky

Násobné a dílčí jednotky jsou jednotky získané jako násobek nebo díl základní nebo odvozené jednotky pomocí mocnin o základu 10. Jejich název je vytvořen přidáním předpony před základní nebo odvozenou jednotku, případně před její značku. Výjimkou je jednotka hmotnosti. Kilogram (kg) je jednotka základní, nikoli násobná. Někdy se používají ještě další předpony, které nepatří do soustavy SI, v následující tabulce jsou označeny hvězdičkou *.

Fyzikální jednotky a veličiny

Přehled normalizovaných předpon		
Předpona	Značka předpony	Poměr k základní jednotce
yotta-	Y	10^{24}
zetta-	Z	10^{21}
exa-	E	10^{18}
péta-	P	10^{15}
tera-	T	10^{12}
giga-	G	10^{9}
mega-	M	10^{6}
kilo-	k	10^{3}
hekto-*	h	10^{2}
deka-*	da	10
deci-*	d	10^{-1}
centi-*	c	10^{-2}
mili-	m	10^{-3}
mikro-	µ	10^{-6}
nano-	n	10^{-9}
piko-	p	10^{-12}
femto-	f	10^{-15}
atto-	a	10^{-18}
zepto-	z	10^{-21}
yokto-	y	10^{-23}

Tabulka 4 Přehled předpon pro násobné a dílčí jednotky

2 Měření tlaku

2.1 Základní pojmy

Základní jednotka tlaku podle soustavy SI je 1 Pa, což je tlak, který je způsoben silou 1 N, která působí kolmo na plochu 1 m^2.

$$1\ Pa = 1\ N\ m^{-2}$$

Pascal je jednotka relativně malá, proto se v technické praxi obvykle používají její násobné jednotky kPa a MPa, případně se někdy pro vyjádření barometrického tlaku používá jednotky hPa.

Pro označení tlaku se obvykle používá písmeno p. V běžné technické praxi je tlak definován jako poměr síly F, působící ve směru normály (kolmo) na plochu A.

$$p = \frac{F}{A}\ \ (Pa)$$

Tento matematický vztah vyhovuje pro definici tlaku u plynů a kapalin. U tuhých těles, kde styčné plochy obvykle nemůžeme považovat za zcela hladké a tudíž dotýkající se navzájem po celém styčném povrchu, používáme raději střední hodnotu tlaku, kterou nazýváme měrným tlakem.

U tekutin se využívá také hydrostatický tlak, který je úměrný výšce kapalinového sloupce.

$$p = \rho \cdot g \cdot h\ \ (Pa)$$

Kde

p	hydrostatický tlak (Pa)
ρ	hustota (měrná hmotnost) kapaliny (kgm^{-3})
g	tíhové zrychlení (ms^{-2})
h	výška kapalinového sloupce nad měřeným místem (m)

V proudící tekutině rozlišujeme navíc ještě tlak kinetický p_k a tlak dynamický p_d a také tlak statický p a celkový tlak p_c.

Tlak je také stavovou veličinou, která nám definuje stav plynů a par na základě stavové rovnice:

$$p \cdot V = R \cdot T\ \ (J)$$

Kde

p	tlak (Pa)
V	objem (m^3)
R	univerzální plynová konstanta ($Jmol^{-1}K^{-1}$)
T	termodynamická teplota (K)

Měření tlaku

Pro izotermický děj lze tuto rovnici psát také ve tvaru:

$$p \cdot V = konst \ \ (J)$$

Při měření je většina přístrojů určených k měření tlaku ovlivňována nejen tlakem měřeným, ale i tlakem ovzduší, tzv. tlakem atmosférickým nebo barometrickým. Naměřená hodnota pak udává tlak relativní – přetlak nebo podtlak, tj. rozdíl mezi tlakem měřeným a tlakem barometrickým.

Je třeba tedy rozeznávat některé další pojmy.

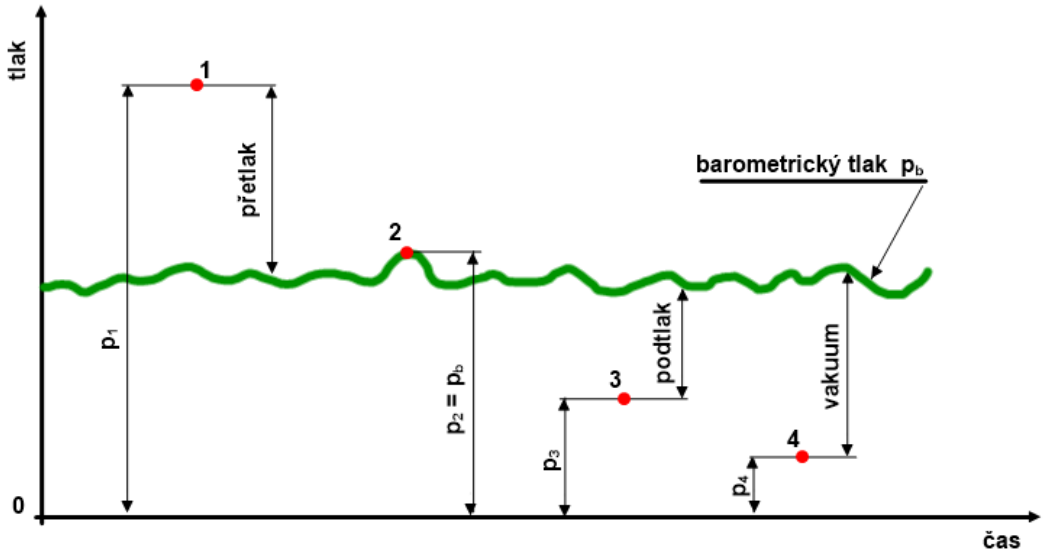
Absolutní tlak je tlak měřený od absolutní tlakové nuly. Na obr. 3 je označen jako p_1, p_2, p_3 a p_4.

Barometrický tlak je aerostatický tlak zemského ovzduší (p_b). Tento tlak je největší na povrchu Země a klesá se vzdáleností od jejího povrchu. Velikost barometrického tlaku není v daném místě v čase konstantní, ale kolísá v závislosti na atmosférických podmínkách. Barometrický tlak se měří od absolutní nuly a má tudíž charakter tlaku absolutního.

Přetlak je rozdíl velikosti absolutního tlaku, který je větší než barometrický tlak, a tlaku barometrického.

Podtlak je rozdíl tlaku barometrického a tlaku absolutního, který je ale menší než tlak barometrický.

V případech, kdy jde o velký podtlak, tedy nepatrný tlak absolutní, hovoříme o vakuu. Tento název je ale nepřesný, protože ve skutečnosti vakuum označuje prostor dokonale prázdný. Hodnotu vakua je možno udávat v jednotkách tlaku, nebo v procentech okamžitého barometrického tlaku. Nevýhodou udávání vakua v procentech je kolísání barometrického tlaku, jakož i jeho změna s nadmořskou výškou. Proto se někdy uvádí hodnota tzv. redukovaného vakua, které je vztaženo k hodnotě normálního barometrického tlaku, tj. 101325 Pa (760 mm Hg).



Obr. 3 Znázornění různých označení tlaku

2.2 Rozdělení tlakoměrů

V praxi je při měření tlaku důležitá volba správného měřicího přístroje z hlediska velikosti měřeného tlaku a také je nutno zvážit, zda chceme měřit statické, nebo dynamické vlastnosti tlaku. V praxi nastává nutnost měřit tlaky v širokém rozsahu, např. od 10^{-12} až do 10^{12} Pa. Žádný měřicí přístroj neměří celý tento rozsah, ale obvykle jen určitou část.

Přístroje pro měření tlaku, obecně nazývané tlakoměry, můžeme rozdělit podle několika hledisek.

a) Rozdělení tlakoměrů podle rozsahu měření:

- Barometry - pro měření tlaku ovzduší
- Manometry - pro měření přetlaků
- Vakuometry - pro měření podtlaků
- Mano-vakuometry - pro měření podtlaků i přetlaků
- Diferenční tlakoměry - pro měření tlakových rozdílů

b) Rozdělení tlakoměrů podle fyzikálního principu, který ke své činnosti používají:

- Pístové a zvonové tlakoměry
  Měřený tlak působí na píst a takto vyvolaná síla je mechanicky vyvážena závažím nebo pružinou. Z velikosti vyvážení a z rozměrů válce lze pak vypočítat měřený tlak.
- Kapalinové tlakoměry
  Měřený tlak je u nich vyrovnán hydrostatickým tlakem sloupce tlakoměrné kapaliny. Hodnota měřeného tlaku je dána výškou sloupce kapaliny a její měrnou hmotností.
- Deformační tlakoměry
  Měřený tlak u nich způsobuje pružnou deformaci tlakoměrného prvku. Velikost této deformace je úměrná hodnotě měřeného tlaku.
- Elektrické tlakoměry
  Používají se obvykle pro měření extrémních hodnot tlaku (velké přetlaky, nebo vakua) a využívají celé řady elektrických vlastností, např. změny elektrického odporu při vysokém tlaku.

c) Rozdělení tlakoměrů podle přesnosti měření:

- Tlakoměry provozní
- Tlakoměry kontrolní
- Tlakoměry laboratorní

Měření tlaku

2.2.1 Manometry pístové

Pístové manometry jsou tlakoměrné přístroje, u kterých je tlak měřeného prostředí přiveden do válce, kde působí na jednu stranu pístu. Tlak vyvodí na píst celkovou tlakovou sílu F, která jej vytlačuje z válce.

$$F = A \cdot p \ \ (N)$$

V uvedeném vztahu je

F	celková tlaková síla (N)
A	plocha pístu (m^2)
p	působící tlak prostředí (Pa).

Z opačné strany pístu je tato síla vyvažována tíhovou silou pístu, případně závaží a silou pružiny. Vyvažující síla F_v má pak hodnotu

$$F_v = G_p + G_z + F_p \ \ (N)$$

Po rozepsání

$$F_v = \ (m_p + m_z) \cdot g + k \cdot x \ \ (N)$$

kde

F_v	celková vyvažující síla (N)
G_p	tíhová síla hmotnosti pístu (N)
G_z	tíhová síla závaží (N)
F_p	síla pružiny (N)
m_p	hmotnost pístu (kg)
m_z	hmotnost závaží (kg)
g	tíhové zrychlení působící v daném místě (ms^{-2})
k	tuhost pružiny (Nm^{-1})
x	deformace pružiny (m)

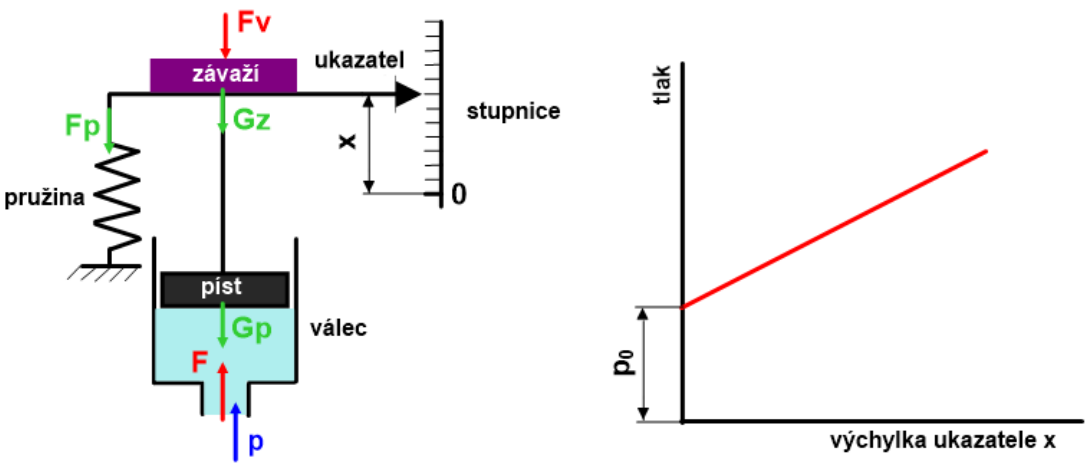
Působením těchto sil se píst posune do takové polohy, ve které nastane jejich rovnováha.

$$F = F_v \ \ (N)$$

Měřený tlak je pak dán vztahem

$$p = \frac{(m_p + m_z) \cdot g + (k \cdot x)}{A} \ \ (Pa)$$

Charakteristika přístroje, tj. grafické znázornění tlaku a výchylky ukazatele je uvedeno na obr. 4.



Obr. 4 Schéma a charakteristika pístového manometru

Z charakteristiky přístroje je patrno, že pro hodnotu výchylky x = 0 má tlak počáteční hodnotu p_0. Je to tlak, který vyvodí tíha pístu a závaží. To znamená, že přístroj měří až od této počáteční hodnoty. Charakteristika je přímková a rozdělení stupnice je rovnoměrné.

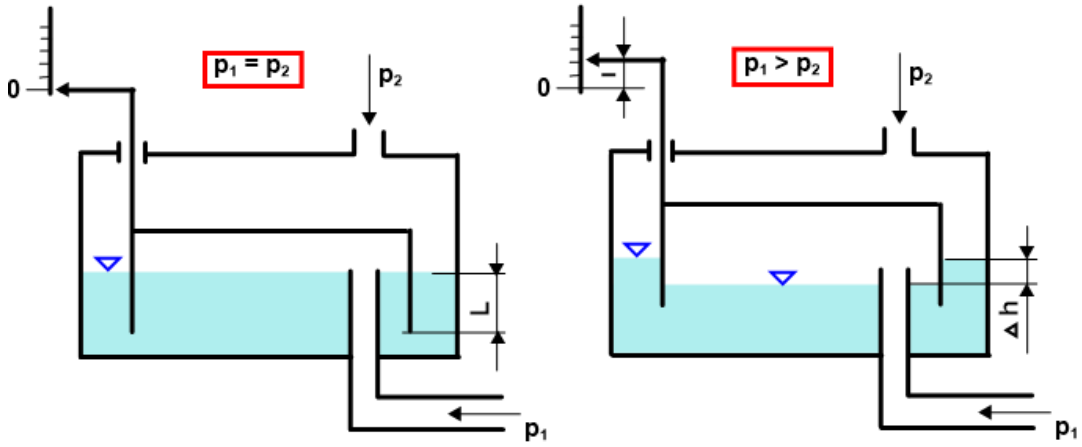
Při pohybu pístu ve válci však působí tření mezi jejich styčnými plochami a to ovlivňuje přesnost měření. Zmenšení vlivu tření lze dosáhnout buď pomocí olejové náplně ve válci, pomocí přesnosti rozměrů válce a pístu, anebo uvedením pístu do rotace. Pro nižší tlaky se používá přímé zatěžování pomocí závaží, pro vysoké tlaky se používá multiplikátor.

Pístové tlakoměry mají vysokou přesnost a proto se používají téměř výhradně ke kalibraci deformačních tlakoměrů.

2.2.2 Manometry zvonové

Princip zvonového manometru je v tom, že výsledná síla, vznikající působením připojených tlaků na zvon plovoucí v kapalině, je vyvažována úbytkem vztlaku při jeho částečném vynoření. Velikost zdvihu zvonu je úměrná rozdílu připojených tlaků.

Měření tlaku



Obr. 5 Princip zvonového manometru

Jedno z možných konstrukčních provedení zvonového manometru, které je schematicky znázorněno na obr. 5, se skládá z nádoby s kapalinou a ze zvonu, který na kapalině pluje. Znázorněný přístroj pracuje jako tlakoměr diferenční. Zjišťujeme tedy pomocí něj pouze rozdíl velikostí přivedených tlaků. Do prostoru pod zvonem je přiveden větší tlak p_1 a z vnější strany působí na zvon menší tlak p_2. Zvon je spojen s ukazatelem, který na připojené stupnici udává přímo tlakový rozdíl.

Jsou-li připojené tlaky stejné, jsou hladiny vně i uvnitř zvonu ve stejné výšce. Tíhová síla zvonu je v rovnováze se vztlakovou silou působící na ponořenou část. V této poloze ukazatel ukazuje na nulu. Po připojení rozdílných tlaků, kdy $p_1 > p_2$, dojde ke změně silových poměrů a jejich působením se začne zvon z kapaliny vynořovat. Současně se bude zmenšovat vztlaková síla působící na ponořenou část zvonu. Zvon se zvedne do takové polohy, ve které opět nastane rovnováha všech působících sil. Při znalosti rozměrů zvonu a měrné hmotnosti použité kapaliny je možno matematicky odvodit závislost mezi velikostí rozdílu tlaků p_1 a p_2 a výchylkou ukazatele l na stupnici tlakoměru.

Zvonové manometry jsou citlivé a přesné přístroje. Používá se jich k měření malých přetlaků a tlakových diferencí.

2.2.3 Kapalinové tlakoměry

Kapalinové tlakoměry patří mezi jednoduché, spolehlivé a přesné přístroje, používané především v laboratořích. Měří se jimi zpravidla malé tlaky. Rozsah měřeného tlaku a přesnost měření závisí na použité tlakoměrné kapalině a na přesnosti čtení výšky sloupce kapaliny. Jako tlakoměrná kapalina se používá obvykle destilovaná voda, rtuť, líh nebo tetrachlór. Z důvodu nutnosti odečítání výšky hladiny v trubici, bývá obvykle trubice vyrobena ze skla, což omezuje možnost měřit vysoké tlaky.

Tyto přístroje mají opět různé konstrukční provedení, ale využívají stejného principu, který se dá vyjádřit pomocí následující základní definiční rovnice.

Měření tlaku

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho \cdot g \cdot h \ \ (Pa)$$

kde

Δp	měřený tlakový rozdíl (Pa)
p_1	vyšší z obou srovnávaných tlaků (Pa)
p_2	nižší z obou srovnávaných tlaků (Pa)
ρ	hustota použité tlakoměrné kapaliny (kgm^{-3})
g	tíhové zrychlení (ms^{-2})
h	rozdíl výšek hladin (m)

2.2.3.1 U manometry

U manometr je nejjednodušším kapalinovým tlakoměrem se svislým sloupcem. Skládá se ze skleněné trubice zahnuté do tvaru U, která je zčásti naplněna tlakoměrnou kapalinou. Tlaky, jejichž rozdíl se má měřit, jsou připojeny na konce ramen trubice. Pokud se připojené tlaky navzájem rovnají ($p_1 = p_2$), jsou hladiny v obou ramenech ve stejné výšce. Po připojení tlaku p_1, který je větší než tlak p_2, vychýlí se kapalina tak, že se vytvoří sloupec, jehož hydrostatický tlak vyrovná rozdíl ve velikosti připojených tlaků. Označíme-li jeho výšku, měřenou jako svislý rozdíl hladin v obou ramenech h, bude platit pro rovnost tlaků v rovině nižší hladiny rovnice:

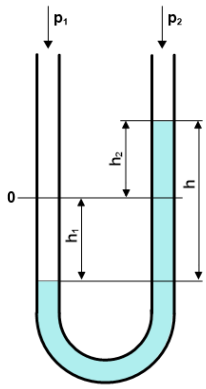
$$p_1 = \rho \cdot g \cdot h + p_2 \ \ (Pa)$$

Kde

p_1	tlak působící na nižší hladinu (Pa)
p_2	tlak působící na vyšší hladinu (Pa)
ρ	hustota tlakoměrné kapaliny (kgm^{-3})
h	rozdíl výšek hladin (m)

odtud pak měřený rozdíl tlaků bude

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho \cdot g \cdot h \ \ (Pa)$$



Obr. 6 Schéma a pohled na U manometr

Měření tlaku

Pokud budou průřezy trubic obou ramen stejné, bude i pokles hladiny h_1 měřený od původní hodnoty stejný jako vzestup hladiny h_2 ve druhém rameni. Celková výška sloupce h je dána součtem změn obou výšek hladin v jednotlivých ramenech.

$$h = h_1 + h_2 \quad (m)$$

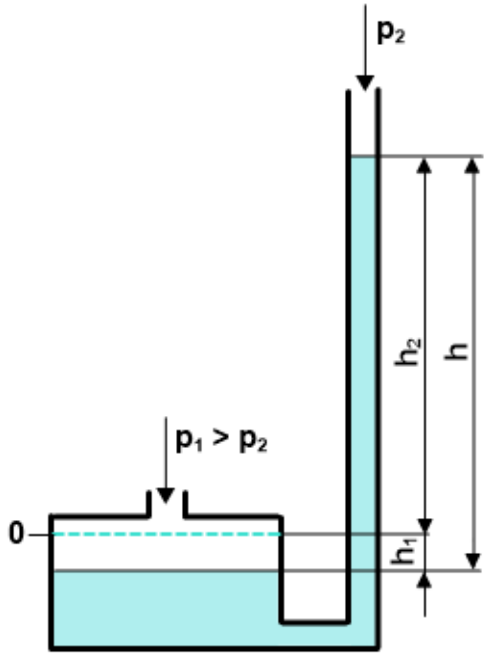
Délka trubice obvykle nepřekračuje 2 m a tím je určen měřicí rozsah tlakoměru podle použité kapaliny. Běžně se U manometry vyrábějí s délkou stupnice 300 nebo 500 mm, buď jako jednoduché s milimetrovým měřítkem, nebo jako velmi přesné s optickým čtením výšky sloupce kapaliny. Přesnost čtení výchylky lze zajistit až na 0,05 mm.

U manometry se používají pro měření přetlaků, podtlaků i tlakových rozdílů.

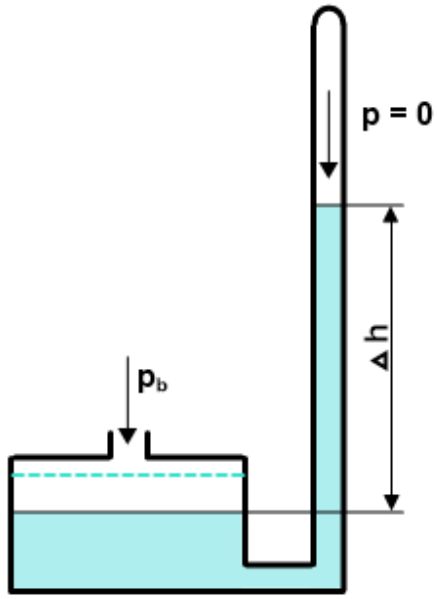
2.2.3.2 Nádobkové manometry

Nádobkové tlakoměry pracují na stejném principu jako U manometry, ale mají jednodušší odečítání výšky sloupce kapaliny. Odečet se provádí pouze na trubici.

Nádobkový tlakoměr se skládá z nádobky a ze svislé trubice, která zasahuje pod hladinu tlakoměrné kapaliny v nádobce. Při měření je větší tlak připojen na hrdlo nádobky a menší tlak na horní konec trubice. Působením obou tlaků se sníží hladina v nádobce a zvýší hladina v trubici.



Obr. 8 Nádobkový manometr



Obr. 7 Nádobkový manometr - barometr

Měření tlaku

Z podmínky rovnosti tlaků v rovině spodní hladiny pak opět vyplývá:

$$p_1 = \rho \cdot g \cdot h + p_2 \ \ (Pa)$$

Kde

p_1	tlak působící na nižší hladinu (Pa)
p_2	tlak působící na vyšší hladinu (Pa)
ρ	hustota tlakoměrné kapaliny (kgm^{-3})
h	rozdíl výšek hladin (m)

odtud pak měřený rozdíl tlaků bude

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho \cdot g \cdot h \ \ (Pa)$$

Nevýhodou nádobkového tlakoměru je, že stupnice nebývá posuvná, protože pokles hladiny v nádobce h_1 musí být zahrnut do měřené výšky h tlakoměrného sloupce na stupnici tlakoměru. Lze však poměrně jednoduše stanovit závislost poklesu hladiny na celkové výšce sloupce za pomoci rovnosti objemů. Platí:

$$A_1 \cdot h_1 = A_2 \cdot h_2 \ \ (m^3)$$

Pak tedy

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho \cdot g \cdot h = \rho \cdot g \cdot (h_1 + h_2) = \rho \cdot g \cdot \left(\frac{A_2}{A_1} + 1\right) \cdot h_2 \ \ (Pa)$$

Za předpokladu konstantních velikostí veličin ρ, g, A_1 a A_2, můžeme zjednodušit vztah na

$$\Delta p = k \cdot h_2 \ \ (Pa)$$

Kde

A_1	plocha průřezu nádobky (m^2)
A_2	plocha průřezu trubice (m^2)
h_1	pokles hladiny v nádobce (m)
h_2	vzestup hladiny v trubici (m)
k	převodní konstanta tlakoměru

V praxi se používá redukované stupnice pro odečet výšky hladiny, která již tento přepočet zahrnuje.

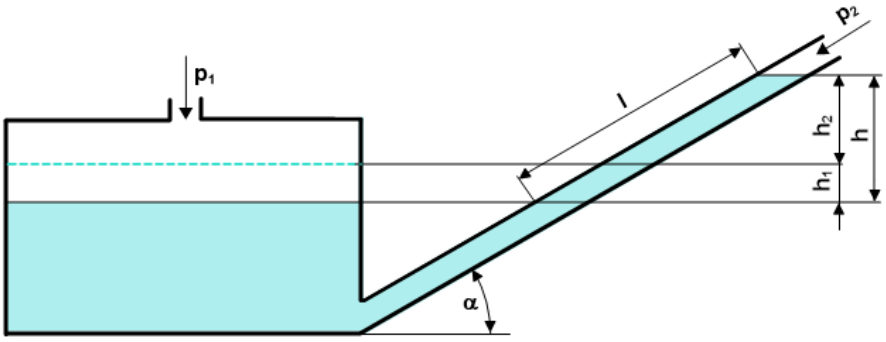
Nádobkových tlakoměrů různých konstrukcí se používá jako manometrů, vakuometrů i barometrů.

V případě použití nádobkového tlakoměru jako barometru je trubice na horním konci zatavena a nad hladinou kapaliny – v tomto případě rtuti – je vytvořeno vakuum. Na hladinu rtuti v trubici tedy působí nulový tlak. Na hladinu rtuti v nádobce působí okolní barometrický tlak. Výška sloupce rtuti v trubici udává přímo barometrický tlak.

Měření tlaku

2.2.3.3 Mikromanometr

Pro měření velmi malých tlakových rozdílů je odečítání na svislé stupnici trubicového tlakoměru nepřesné, protože odečítaná změna výšky sloupce je malá. Citlivější je odečet na šikmé stupnici mikromanometru. Je to v podstatě nádobkový manometr, jehož trubici lze sklápět a tím zvětšovat jeho citlivost. Rozdíl připojených tlaků vytvoří sice stejnou, svisle měřenou výšku kapalinového sloupce h, ale protože se výška odečítá na šikmé stupnici, odpovídá jí větší délka l. Schéma mikromanometru je znázorněno na obr. 9.



Obr. 9 Princip mikromanometru

Měřený tlakový rozdíl lze odvodit obdobně jako u běžného nádobkového tlakoměru a je dán vztahem

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho \cdot g \cdot h = \rho \cdot g \cdot \left(\frac{A_2}{A_1} + sin \propto\right) \cdot l \ \ (Pa)$$

Za předpokladu konstantních velikostí veličin ρ, g, A_1 , A_2 a v průběhu měření stálého úhlu sklonu trubice α, můžeme zjednodušit vztah na

$$\Delta p = k \cdot l \ \ (Pa)$$

Kde

A_1	plocha průřezu nádobky (m^2)
A_2	plocha průřezu trubice (m^2)
h	rozdíl hladin ve svislém směru (m)
l	rozdíl hladin v šikmém směru (m)
α	úhel sklonu trubice (°)
k	převodní konstanta tlakoměru

Měřicí rozsah mikromanometru je dán délkou trubice. Běžně se vyrábějí mikromanometry s trubicemi délky 200 a 600 mm. Náplní je obvykle voda nebo líh. Trubice je vedena segmentem, na němž lze polohu trubice zajistit v příslušné poloze. Vhodné úhly sklonu jsou obvykle naznačeny západkou.

Obr. 10 Mikromanometr

2.2.4 Deformační tlakoměry

Deformační manometry využívají k měření tlaku deformace některého z členů měřicí soustavy. Velikost deformace závisí na deformující síle, která je dána velikostí měřeného tlaku a na vratné síle dané pružností tlakoměrného prvku. Tlakoměrné prvky jsou deformovány v oblasti pružné deformace a tlakový účinek je v rovnováze s vnitřním napětím materiálu. Vhodná změna tvaru se pomocí mechanického převodu zvětšuje a převádí na úhlovou nebo lineární výchylku ukazatele. Tyto přístroje mohou sloužit k měření přetlaků, podtlaků i k měření tlaku barometrického. Bývají velmi často osazeny jednoduchými převodníky velikosti deformace na elektrický signál (např. potenciometr nebo tenzometr), což je možno využít pro automatizaci, dálkový přenos dat a podobně.

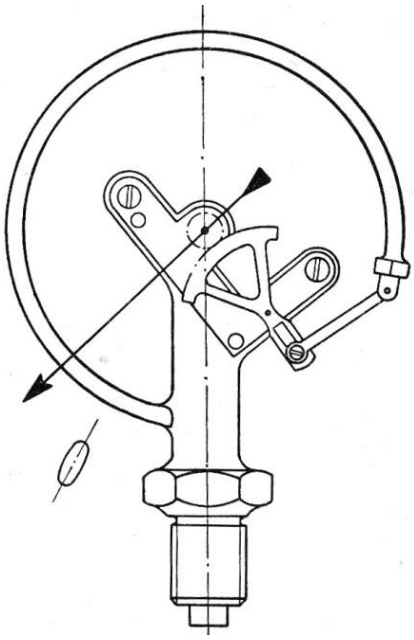
Podle druhu tlakoměrného prvku dělíme deformační tlakoměry na tlakoměry

- Trubicové
- Membránové
- Krabicové
- Vlnovcové

Měření tlaku

2.2.4.1 Trubicové tlakoměry

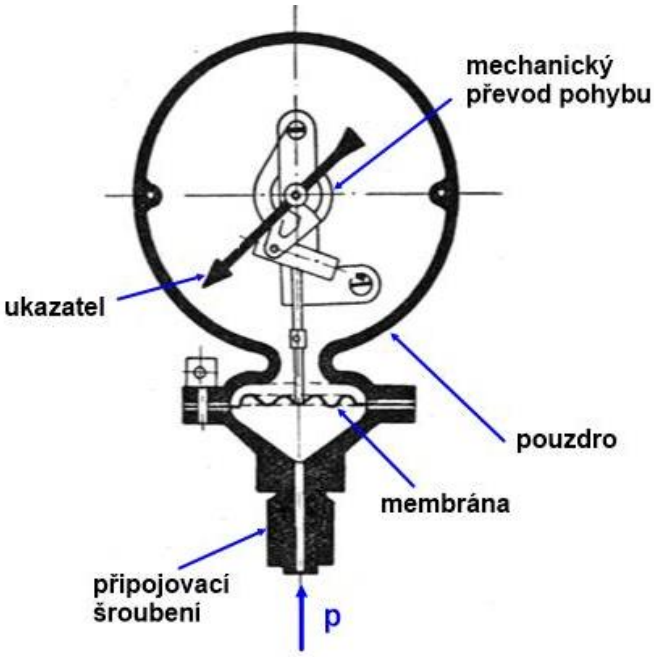
Tlakoměrným elementem tohoto přístroje je pružná kovová (bronzová, ocelová…) trubice oválného průřezu, na jednom konci uzavřená, stočená do kruhového oblouku v úhlu asi 270°. Tlak, působící na vnitřní stěnu trubice, mění průřez trubice na kruhový a zároveň trubici napřimuje. Při napřimování trubice se pohyb volného konce převádí pákovým a ozubeným převodem přes ručičku ukazatele na stupnici, která je cejchována v jednotkách tlaku. Výchylka může být také převedena na elektrický signál a vyhodnocena jiným způsobem. Citlivost těchto manometrů záleží na tvaru, rozměrech a tloušťce stěny trubice. Trubice mohou být nejen popsaného tvaru C, ale také U nebo spirály či šroubovice.



Obr. 11 Schéma a pohled zezadu na demontovaný trubicový manometr [1]

2.2.4.2 Membránové tlakoměry

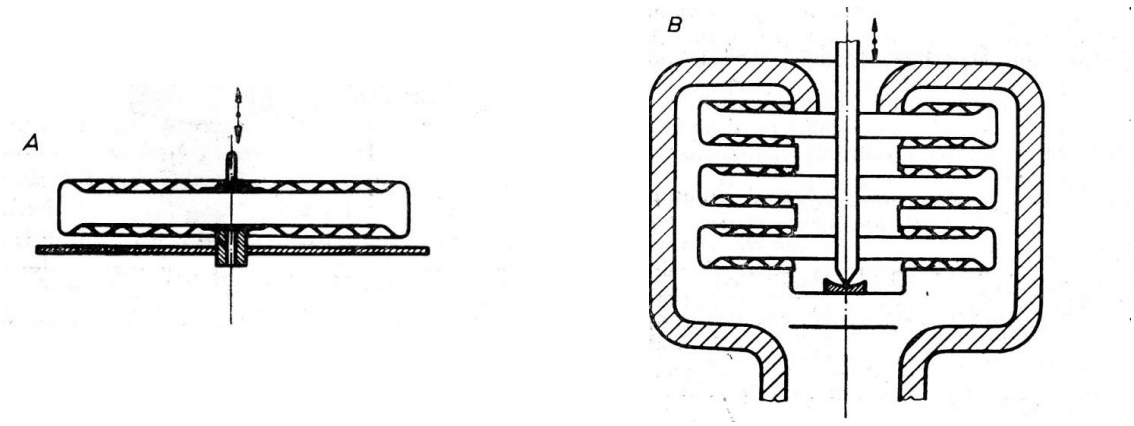
Tlakoměrným prvkem těchto přístrojů je pružná membrána sevřená po obvodě mezi přírubami tělesa tlakoměru. Membrána má obvykle tvar kruhové desky opatřené několika soustřednými vlnami. Membrána je obvykle kovová, ale může být i z jiných materiálů, např. kůže, plastu nebo pryže. Na jednu stranu membrány působí měřený tlak, na druhou stranu obvykle tlak barometrický. U diferenčních manometrů je na každou stranu membrány přiveden jeden ze srovnávaných tlaků. Průhyb membrány způsobený rozdílem tlaků se převádí buď mechanickým převodem na pohyb ukazatele, nebo převodníkem či pomocí tenzometrů na elektrický signál. Při měření dynamických tlaků je třeba chránit membránu proti protržení, případně pomocí dorazu a pojistného ventilu před přetížením.



Obr. 12 Schéma membránového tlakoměru [1]

2.2.4.3 Krabicové tlakoměry

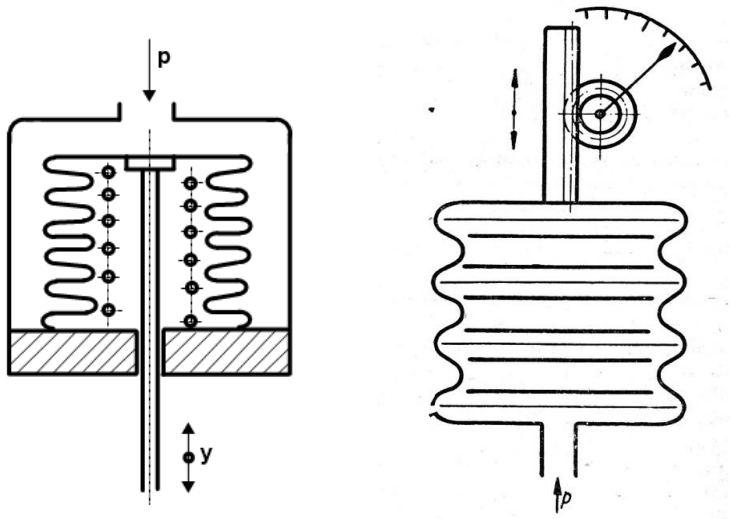
Membrána membránového tlakoměru má při měření malých tlaků malý zdvih. Použijeme-li spojení dvou, nebo více membrán do tzv. krabice, citlivost se zvýší, protože deformace nastává u všech spojených membrán. Měřený tlak se přivádí dovnitř, nebo vně krabice. Krabicové manometry jsou velmi citlivé, používají se pro měření malých přetlaků nebo podtlaků, a pro měření tlaku barometrického. Jsou-li určeny k měření rychle proměnných tlaků, bývají opatřeny tlumičem rázů.



Obr. 13 Schémata krabicových tlakoměrů - s jednou krabicí (A) a se třemi krabicemi (B) [1]

2.2.4.4 Vlnovcové tlakoměry

Na soustavu krabicových manometrů svým principem navazuje vlnovec. Vlnovcový tlakoměr je zhotoven z kovové trubice vyválcováním vln. Jeden konec je uzavřen a druhý připojen k základu přístroje. Působením přetlaku se vlnovec deformuje - mění svou délku. Deformace závisí na velikosti tlakového rozdílu, velikosti funkční plochy a na tuhosti vlnovce. Pokud nestačí vlastní pružnost vlnovce, používá se pro vyvážení sil přídavná pružina. Materiál vlnovců je obvykle kov.
Vlnovce se uplatňují hlavně jako regulační přístroje při regulaci tlaku.



Obr. 14 Schémata vlnovcových tlakoměrů

2.2.5 Elektrické tlakoměry

Elektrické tlakoměry jsou založeny na různých principech. Obvykle se jedná o přístroje pro speciální použití například pro měření velmi vysokých nebo naopak velmi nízkých tlaků nebo tlaků velmi rychle se měnících.

Pro měření extrémně vysokých tlaků se využívá principu změny odporu vodiče na základě změny velikosti jeho průřezu. Působením tlaku se krystalická mřížka materiálu drátu zatížené cívky deformuje, čímž dochází ke změně vodivosti materiálu. Na základě tohoto jevu se vyhodnocuje velikost působícího tlaku.

Velmi malé tlaky se měří například tzv. ionizačními vakuometry, u kterých je měřítkem tlaku velikost proudu iontů v trubici mezi dvěma elektrodami. Ionizační vakuometry je možno použít pro měření extrémního vakua až 10^{-12} Pa.

Velké a rychle se měnící tlaky se měří piezoelektrickými tlakoměry. Měřidlem tlaku je slabé elektrické napětí, které vzniká při tlakovém zatížení piezoelektrického krystalu (např. křemene).

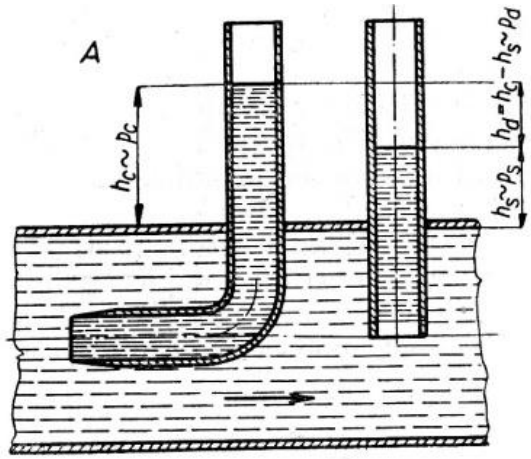
Principů, které jsou elektrickými tlakoměry využívány, je celá řada, zde je uvedeno jen několik informativních příkladů.

Měření tlaku

2.2.6 Měření dynamického tlaku

Až dosud při popisu tlakoměrných přístrojů nebyl brán ohled na to, zda se měřené médium pohybuje, či nepohybuje. Rovněž nebyl brán zřetel na způsob připojení tlakoměru k místu měření. Při měření tlaku proudících médií ale velmi záleží na způsobu připojení a nasměrování sondy manometru.

Když umístíme do potrubí, ve kterém proudí s přetlakem tekutina (viz obr. 15), trubičku kolmo na směr proudu, vystoupí v ní kapalina do určité výšky h_s, která odpovídá velikosti hydrostatického tlaku p_s v potrubí. Pokud ovšem do stejného potrubí umístíme trubičku ohnutou tak, aby její ústí směřovalo proti směru proudění, vystoupí v ní hladina do větší výšky h_c, odpovídající celkovému tlaku p_c.



Obr. 15 Vliv tvaru a umístění tlakové sondy [1]

Výška hladiny v trubičce je ovlivněna jednak tlakem hydrostatickým p_s a jednak tlakem hydrodynamickým p_d, který je vyvolán pohybovou energií proudící kapaliny. Rozdíl výšek hladin v obou trubičkách bude úměrný dynamickému tlaku kapaliny. Možno tedy psát

$$p_c = h_c \cdot \rho \cdot g = p_s + p_d \ \ (Pa)$$

Z předchozího víme, že statický tlak lze určit

$$p_s = h_s \cdot \rho \cdot g \ \ (Pa)$$

A pokud platí, že

$$h_c = h_s + h_d \ \ (m)$$

Pak hodnotu hydrodynamického tlaku lze určit

$$p_d = h_d \cdot \rho \cdot g = (h_c - h_s) \cdot \rho \cdot g \qquad [Pa]$$

Měření tlaku

V praxi se měření dynamického tlaku v potrubí využívá pro určování rychlosti proudění tekutin a následně pro určení průtočného množství tekutiny.

Dynamický tlak možno také vypočítat pomocí vztahu:

$$p_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (Pa)$$

Rychlost proudění možno pak zjistit

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_d} \quad (ms^{-1})$$

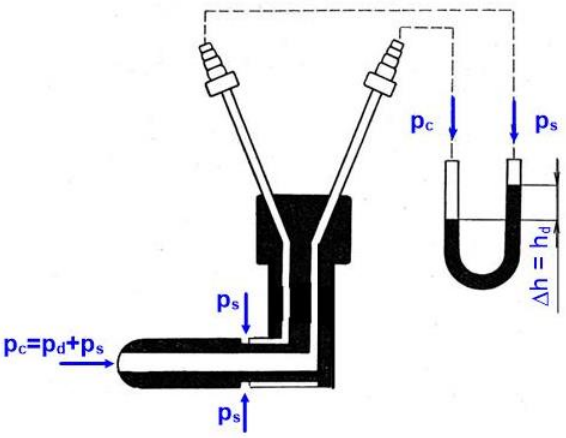
Kde

p_s	hydrostatický tlak (Pa)
p_d	hydrodynamický tlak (Pa)
p_c	celkový tlak (Pa)
h_s, h_d, h_c	výšky příslušného kapalinového sloupce (m)
v	rychlost proudění tekutiny (ms^{-1})
ρ	hustota použité tlakoměrné kapaliny (kgm^{-3})
g	tíhové zrychlení (ms^{-2})

Umíme-li zjistit rychlost proudění tekutiny potrubím a známe-li velikost průřezové plochy potrubí, můžeme vypočítat průtočné objemové množství tekutiny.

Popsaný princip měření hydrodynamického tlaku, respektive rychlosti proudění, využívá přístroj, který se nazývá Prandtlova trubice.

Přístroj je tvořen dvěma trubicemi. Jedna trubice má po obvodu radiální otvůrky, kterými se snímá statický tlak. Druhá trubice je umístěna v ose první, větší trubice a má axiální otvor pro měření celkového tlaku. Výstupy z obou trubic jsou obvykle propojeny na měřidlo diferenčního tlaku – nejčastěji mikromanometr. Z rozdílu tlaku v obou trubicích lze vypočítat velikost dynamického tlaku a tím i rychlost proudění měřené tekutiny. Schéma viz obr. 17.



Obr. 17 Schéma Prandtlovy trubice

Obr. 16 Detail sondy Prandtlovy trubice

3 Měření teploty

3.1 Základní pojmy

Teplota je jednou ze základních fyzikálních veličin, která vyjadřuje tepelný stav hmoty. Částice (molekuly, atomy…) všech látek jsou v neustálém kmitavém pohybu. Střední kinetická energie tohoto pohybu závisí na množství tepelné energie obsažené ve hmotě. Je-li tělesu dodána tepelná energie zahřátím, zvyšuje se střední kinetická energie částic, což je vnímáno jako zvýšení teploty tělesa. Naopak při odvádění tepla (ochlazováním) se pohybová energie částic zmenšuje a pozorujeme snižování teploty tělesa. Teplota je tedy určitou mírou kinetické energie pohybujících se částic látky. Tepelný pohyb částic ustává při snížení teploty na absolutní teplotní nulu tj. -273,15 °C, což je považováno za nejnižší teplotu. Podle toho by bylo možno tepelný stav hmoty vyjadřovat v jednotkách energie. Používá se však veličiny zvané teplota, která je vyjadřována v teplotních stupních.

K určování teploty se v minulosti používalo celé řady stupnic, které byly založeny na vhodných fyzikálních vlastnostech teploměrné látky. Obvykle je to teplotní roztažnost, změna elektrického odporu v závislosti na změně teploty a podobně. Z důvodů dosahování stejných a porovnatelných výsledků měření, které by byly nezávislé na principu měření, byla stanovena tzv. termodynamická teplotní stupnice (absolutní stupnice, Kelvinova stupnice), opírající se o ideální Carnotův cyklus. V termodynamické teplotní stupnici je teplota označována T a je udávána v kelvinech (označení K).

Základním pevným bodem termodynamické stupnice je trojný bod vody, který má teplotu 273,16 K. Trojný bod vody je rovnovážný stav mezi třemi fázemi vody H_2O - což jsou led, kapalina a pára. Nula této stupnice 0 K je přiřazena takovému teplotnímu stavu, při kterém je střední kinetická energie částic látky nulová. Tepelný pohyb částic při této teplotě ustává. Jeden Kelvin (1K) je tedy 273,16-díl termodynamické teploty trojného bodu vody. Bod tání ledu má na termodynamické stupnici teplotu 273,15 K.

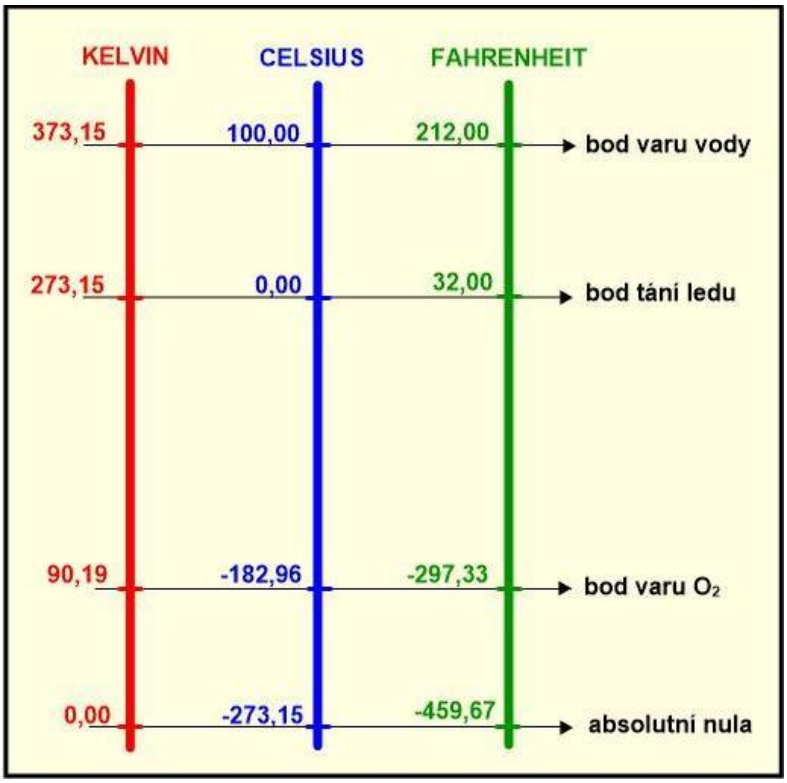
Mimo popsané termodynamické teploty se užívají ještě jiné stupnice pro měření teploty označované podle druhu teploměrné stupnice.

Často se užívá stupnice Celsiova, která se vyjadřuje ve stupních Celsia (°C). Jeden stupeň Celsia odpovídá setině teplotního rozdílu mezi bodem varu a tuhnutím destilované vody při tlaku 101325 Pa. Volba těchto dvou stavů je výhodná z důvodů snadné opakovatelnosti v libovolném místě.

Dříve se používala i stupnice Reaumurova (°R), u které byl teplotní rozdíl mezi bodem varu a tuhnutí destilované vody rozdělen na 80 dílků.

V anglosaských zemích a v USA byla často používána stupnice Fahrenheitova (°F), která přiřazuje bodu tuhnutí vody 32°F a bodu varu vody 212°F, rozděluje tedy teplotní rozdíl mezi bodem varu a tuhnutí vody tentokrát na 180 dílků.

Měření teploty



Obr. 18 Porovnání teplotních stupnic

Pro praktickou realizaci termodynamické teploty slouží Mezinárodní teplotní stupnice ITS (The Internacional Temperature Scale) s uvedením roku začátku platnosti. U ní docházelo opět k postupnému vývoji. Nejstarší Mezinárodní teplotní stupnice ITS-27 začala platit v roce 1927. Postupem času vlivem vědeckého a technického poznání přestala tato stupnice vyhovovat a v roce 1948 byla zavedena mezinárodní teplotní stupnice ITS-48. Tato stupnice měla určité, i když nepatrné odchylky od původní stupnice Celsiovy, vyhovovala termodynamickým zákonům a byly podle ní cejchovány všechny teploměry. Byla definována pomocí šesti základních teplotních bodů, které odpovídaly bodům varu nebo tuhnutí některých prvků např. bodu varu kyslíku -182,96 °C, bodu varu vody 100 °C, bodu varu síry 444,60 °C, bodu tuhnutí zlata 1063,00 °C, atd. Později byla tato stupnice doplněna a upravena ještě v letech 1960, 1968 a 1975.

Od roku 1990 platí Mezinárodní teplotní stupnice ITS 90 (The Internacional Temperature Scale of 1990). Tato stupnice, na rozdíl od předešlých, je stanovena na 17 pevně definovaných teplotních bodech a její označení je T_{90}. Tato mezinárodní teplotní stupnice ITS 90 je definována od 0,65 K až do teplot prakticky měřitelných v podmínkách Planckova zákona při monochromatické radiaci. Byla vytvořena tak, aby jednotlivé měřené rozsahy měly dobrou reprodukovatelnost. Její definiční pevné body se liší od předchozích stupnic tím, že jsou to výhradně trojné body a body tuhnutí látek (kromě jednoho). Tím se obešly některé problémy s definováním přesné teploty, např. se závislostí teploty varu prvků na tlaku vzduchu atd.

T_{90} (K)	t_{90} (°C)	Látka	Stav
3 až 5	-270,15 až -268,15	He	tlak syté páry
13,8033	-259,3467	e-H_2	trojný bod
17	-256,15	e-H_2	tlak syté páry
20,3	-252,85	e-H_2	tlak syté páry
24,5561	-248,5939	Ne	trojný bod
54,3584	-218,7916	O_2	trojný bod
83,8058	-189,3442	Ar	trojný bod
234,3156	-38,8344	Hg	trojný bod
273,16	0,01	H_2O	trojný bod
302,9146	29,7646	Ga	bod tání
429,7485	156,5985	In	bod tuhnutí
505,078	231,928	Sn	bod tuhnutí
692,677	419,527	Zn	bod tuhnutí
933,473	660,323	Al	bod tuhnutí
1234,93	961,78	Ag	bod tuhnutí
1337,33	1064,18	Au	bod tuhnutí
1357,77	1084,62	Cu	bod tuhnutí

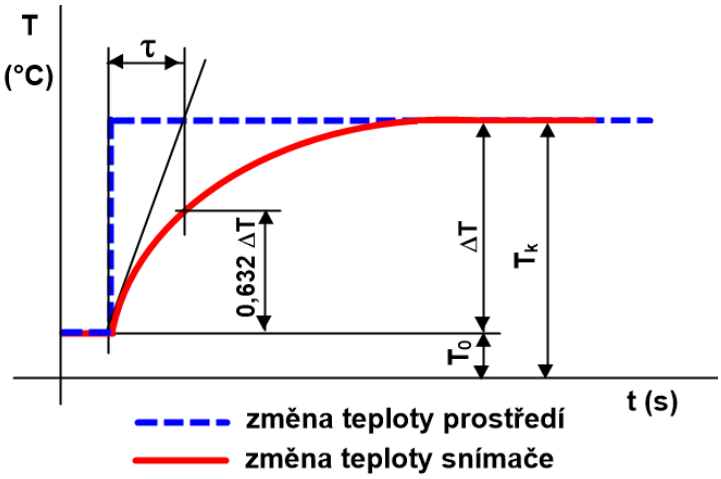
Tabulka 5 Pevné definiční body teplotní stupnice ITS-90 [9]

Správných výsledků měření je možno dosáhnout pouze volbou vhodného teploměru. Z praktických měření je známo, že od okamžiku styku teploměru s měřeným prostředím trvá určitou dobu, než přístroj ukáže velikost měřené teploty. Odečítat hodnotu je možno až po ustálení ukazatele. Toto zpoždění teploměru a jeho průběh je dáno druhem, tepelnou kapacitou snímacího orgánu, způsobem zabudování a vlastnostmi měřeného prostředí. Zpoždění ukazatele by mělo být co nejmenší. Požadavek co nejmenšího zpoždění je zvlášť důležitý pro měření nebo regulaci teploty v případě, že se hodnota teploty často a rychle mění. Zpoždění teploměru vystihuje veličina, kterou nazýváme poločas teploměru H a časová konstanta teploměru τ.

Poločas teploměru H je doba ve vteřinách, za kterou dosáhne údaj teploměru polovičního rozdílu mezi počáteční teplotou teploměru a teplotou měřeného prostředí.

Časová konstanta teploměru τ. Změní-li se měřená teplota měřeného prostředí skokem o hodnotu ΔT, bude možno časový průběh teplot ukazovaných teploměrem znázornit pomocí exponenciální křivky. Časová konstanta teploměru pak je doba, za kterou by údaj teploměru dosáhl stejné teploty, jako je teplota měřeného prostředí, kdyby rychlost změny jeho údaje byla konstantní a byla stejně velká, jako na počátku měření. Průběh hodnot ukazovaných teploměrem by pak byl představován nikoli exponenciálou, ale přímkou. Z průběhu exponenciály je zřejmé, že údaj teploměru se zpočátku mění rychle a postupně rychlost změny klesá. Graficky je možno časovou konstantu teploměru určit tak, že nakreslíme k exponenciále tečnu v jejím počátku. Délka úseku, který ohraničuje tečna

na rovnoběžce s časovou osou ve vzdálenosti hodnoty měřené teploty, je hledaná časová konstanta. Možno určit, že je to doba, za kterou dosáhne teploměr teploty odpovídající 63,2 % původního teplotního rozdílu.



Obr. 19 Časová konstanta teploměru

Při umístění teploměru do měřeného prostředí mohou vznikat další chyby a nepřesnosti také vedením tepla, a to tak, že přístroj umožňuje odvod nebo přívod tepla z okolního prostředí.

3.2 Rozdělení teploměrů

Při změně teploty se mění některé fyzikální vlastnosti tuhých látek, kapalných látek a plynů. Těchto změn se využívá pro měření teploty. Princip měření pak spočívá v měření změny sledované vlastnosti, z níž pak usuzujeme na změnu teploty, která byla její příčinou.

Podle oblasti použití se teploměry dělí na dotykové a bezdotykové. Dotykové teploměry jsou při měření v přímém kontaktu s měřeným objektem nebo prostředím. Naopak bezdotykové teploměry využívají obvykle tepelné záření měřeného objektu.

Dotykové teploměry dělíme podle toho, ze které fyzikální veličiny odvozujeme výšku teploty, takto:

- Dilatační teploměry
  Teplota se u nich určuje na základě délkové nebo objemové roztažnosti hlavně tuhých nebo kapalných látek.
- Tlakové teploměry
  Teplota se určuje na základě změny velikosti tlaku teploměrné látky (kapaliny nebo plynu) při stálém objemu.
- Odporové teploměry
  Teplota se určuje na základě změny elektrického odporu vodiče, při změně teploty.

Měření teploty

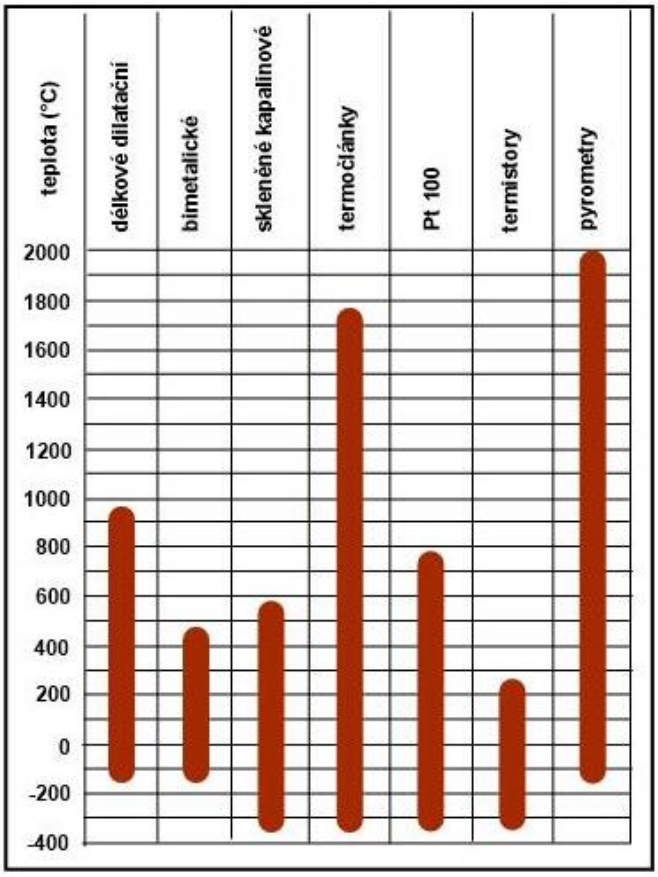
- Termoelektrické teploměry (termočlánky)
  Teplota se určuje na základě termoelektrického napětí vznikajícího ve spoji dvou různých kovů.

- Speciální teploměry
  K měření teploty se využívá změn některých specifických fyzikálních vlastností tuhých látek a kapalin, jako je měknutí, tavení, index lomu atd.

Bezdotykové teploměry lze dělit podle měřicího principu na přímoměřící a zobrazovací.

- Přímoměřící teploměry jsou např. pyrometry.
  Pyrometry možno dělit podle dalších hledisek, jako je spektrální oblast využitého záření, použitý optický systém, způsob měření atd. Pyrometry podle oblasti využitého záření pak mohou být spektrální, pásmové, barvové nebo radiační.

- Zobrazovací bezdotykové teploměry jsou termovize a fototermometry.
  Termovize používá speciální kamery s detektorem tepelného záření v infračervené oblasti, které snímají povrch měřených objektů a promítají jej na speciální monitor.
  Fototermometry užívají klasický fotoaparát s fotomateriálem citlivým na infračervené záření.



Obr. 20 Orientační rozsahy měření základních typů teploměrů

Měření teploty

3.2.1 Dilatační teploměry

Tento typ teploměrů je založen na principu roztažnosti látek, v závislosti na vzrůstající teplotě. Podle skupenství použité teploměrné látky se dělí obvykle na teploměry využívající roztažnosti tuhých látek (tyčové teploměry, bimetalické teploměry…), kapalin (skleněné teploměry…) nebo plynů (tlakové teploměry).

3.2.1.1 Skleněné teploměry

Teploměry skleněné jsou teploměry dilatační, založené na sledování změn objemu teploměrné kapaliny v závislosti na změnách teploty. Skládají se obvykle ze skleněné nádobky - jímky, která přechází v kapiláru, která je na konci uzavřená. V jímce je teploměrná kapalina zasahující částečně do kapiláry. Při změně teploty změní kapalina svůj objem, což má za následek změnu délky kapalinového sloupce v kapiláře. Změny objemu se odečítají na stupnici připojené ke kapiláře a cejchované ve stupních teploty. Podle druhu použité náplně lze využít tyto teploměry v rozmezí od cca - 60 °C do +600 °C. Pro vyšší teploty se používá místo skla taveného křemene. Těchto teploměrů lze využít v rozmezí od -200 °C až do +1 050 °C.

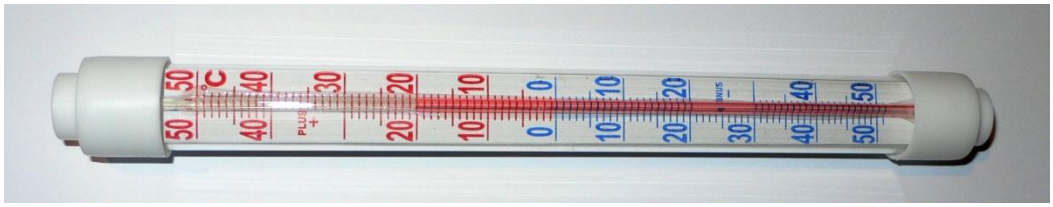
Jako teploměrná látka se často používá rtuť. Rtuťová náplň je vhodná pro teploty -30 °C až +300 °C. S pomocí přídavného tlaku inertního plynu nad rtuťovým sloupcem v kapiláře se zvýší bod varu kapaliny a tím i horní mez rozsahu. V tomto případě lze rtuťové teploměry využít až do teploty +700 °C. Rtuť je jako teploměrná látka výhodná, protože má velký součinitel objemové roztažnosti, dobrou tepelnou vodivost a je neprůhledná. Neprůhlednost umožňuje snadné sledování sloupce a odečítání polohy hladiny. Výhodou je také to, že rtuť nesmáčí sklo. Jako inertní plyn se používá pro teploty do 400 °C vzduch a pro vyšší teploty oxid uhličitý nebo dusík.

Pro měření nízkých teplot se používají náplně organických látek jako technický pentan, líh a toluol. Tyto látky jsou bezbarvé a z důvodu čitelnosti se musí barvit. Nevýhodou je, že barvivo může ulpívat na stěnách kapiláry a proto se užívá kapilára se zataveným barevným vláknem. Sloupec kapaliny v kapiláře působí jako čočka a tím rozšiřuje obraz vlákna. Odečítání hodnot je pak snadnější.

Skleněné teploměry se vyrábí jako tyčinkové a obalové.

Obalový teploměr

Obalové teploměry mají kapiláru s připojenou stupnicí zatavenou do skleněného obalu. Stupnice bývá přichycena ke kapiláře pomocí drátků. Výhodou těchto teploměrů je snadnější odečítání. Používají se pro nižší teploty.



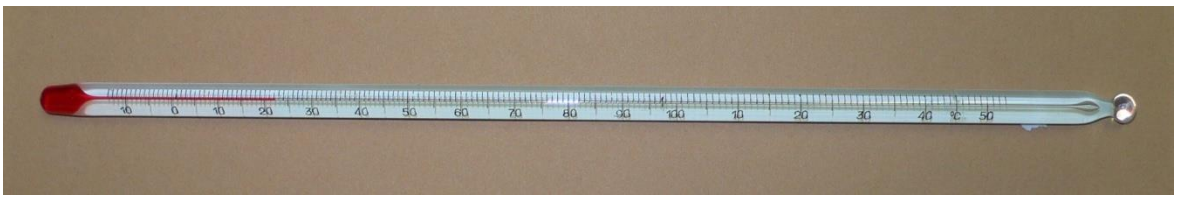
Obr. 21 Obalový teploměr

Měření teploty

Tyčinkový teploměr

Tyčinkové teploměry jsou zhotoveny z tlustostěnné kapiláry a stupnici mají vyleptánu přímo na jejím povrchu. Výhodou je homogenní tvar. Při odečítání hodnot nutno však dbát na to, aby ryska stupnice a hladina kapaliny byly v rovině kolmé na podélnou osu sloupce.

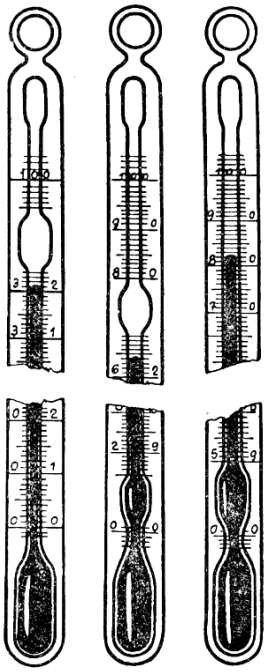
Jímka na kapalinu u skleněných teploměrů má kulový nebo válcový tvar. Válcový tvar má při stejném objemu větší povrch, takže umožňuje lepší přestup tepla. Horní konec kapiláry může mít také tvar jímky. Ta slouží k ochraně teploměru před roztržením při případném menším přehřátí. Skleněné teploměry se vyrábějí maximálně v délkách do 500 mm. Delší teploměry nejsou výhodné, protože už vykazují větší chybu.



Obr. 22 Tyčinkový teploměr

Teploměr s potlačenou stupnicí

Pro přesná měření se v určitém rozsahu při omezené délce používají teploměry s potlačenou stupnicí. To znamená, že mají ve vhodném místě kapiláry jisté rozšíření (mezijímku), která pojme sloupec kapaliny odpovídající potlačenému rozsahu. Tímto způsobem lze získat jemnější rozdělení stupnice, aniž bychom zvětšovali celkovou délku teploměru.

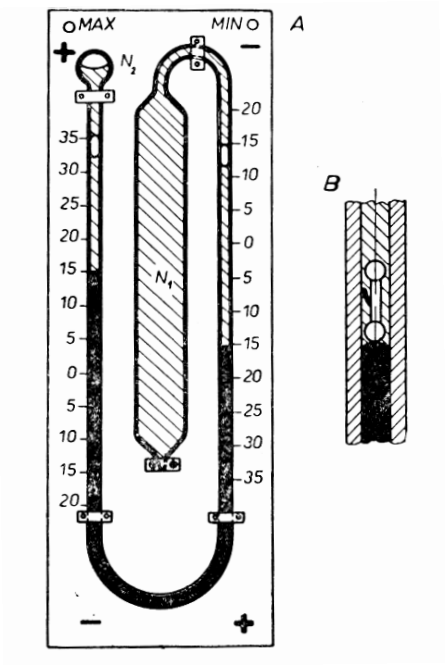


Obr. 23 Teploměry s potlačenou stupnicí [1]

Měření teploty

Teploměr maximo-minimální

Záznam nejvyšších a nejnižších dosažených teplot v průběhu určité doby lze zajistit poměrně jednoduchým principem teploměru maximo-minimálního. Tento teploměr je tvořen kapilárou tvaru U, která je na obou koncích opatřena jímkami. Teploměrnou látkou, kterou bývá obvykle líh, je naplněna větší jímka. V kapiláře bývá rtuť, která slouží jako ukazatel. Nad hladinou rtuti jsou v obou ramenech kapiláry umístěny malé skleněné plováčky opatřené ocelovými drátky. Třením drátků o stěny kapiláry se plováčky po posunutí rtuťovým sloupcem drží v poslední dosažené poloze. K povrchu rtuti se stahují pomocí magnetu. Při změně teploty se mění objem teploměrné látky a rtuťový sloupec se posouvá. Teplotu lze odečítat u obou hladin rtuťového sloupce na stupnicích v obou ramenech. Protože v jednom ramenu je v nejvyšší poloze minimální teplota a ve druhém ramenu maximální, označují skleněné tyčinky maximální a minimální teplotu dosaženou během doby měření.



Obr. 24 Sixův maximo - minimální teploměr [1]

Spínací teploměr

Pro dvoupolohovou regulaci teploty v různých laboratorních zařízeních se s výhodou používá spínacího teploměru. V podstatě se jedná o rtuťový skleněný teploměr, který je opatřen dvěma elektrickými kontakty. Pohyblivý kontakt se může posouvat v kapiláře pomocí speciálního mechanismu. Spínací teplota se nastaví tak, že se kontakt umístí do úrovně žádané rysky stupnice. Druhý kontakt tvoří rtuťový sloupec. Přívod k němu je zataven do jímky. Při dosažení nastavené teploty rtuť uzavře elektrický obvod, který dá signál pro potřebný, obvykle regulační děj. Tyto přístroje mohou pracovat pouze ve spojení s relé, protože je nelze zatěžovat většími proudy.

Měření teploty

Při měření teploty laboratorními teploměry je potřeba, aby byla měřené teplotě vystavena nejen jímka s teploměrnou kapalinou, ale také celý kapalinový sloupec. Tento požadavek není možno vždy splnit. Proto nastává potřeba údaj teploměru opravit, protože teploměrná kapalina ve vyčnívající části má jinou teplotu než je v měřeném prostoru. Velikost opravy teploty se počítá na základě výšky vyčnívající části sloupce teploměrné kapaliny, rozdílu teplot mezi hodnotou udávanou teploměrem a hodnotou teploty okolního prostředí a teplotní roztažnosti teploměrné kapaliny. Pro přesná laboratorní měření je určení opravy na vyčnívající sloupec velmi důležité, protože vzniklá chyba může několikrát přesáhnout chybu vlastního teploměru.

3.2.1.2 Tyčové teploměry

Mezi teploměrné přístroje založené na principu teplotní roztažnosti tuhých látek řadíme tyčové teploměry. Teplotní roztažnost tuhých látek je relativně velmi malá. Lze ji vyjádřit pomocí součinitele teplotní roztažnosti α. Protože hodnota α není konstantní a mění se s teplotou, udává se obvykle jako střední hodnota pro určitý teplotní interval. Hodnoty součinitele teplotní roztažnosti pro některé materiály jsou uvedeny v následující tabulce.

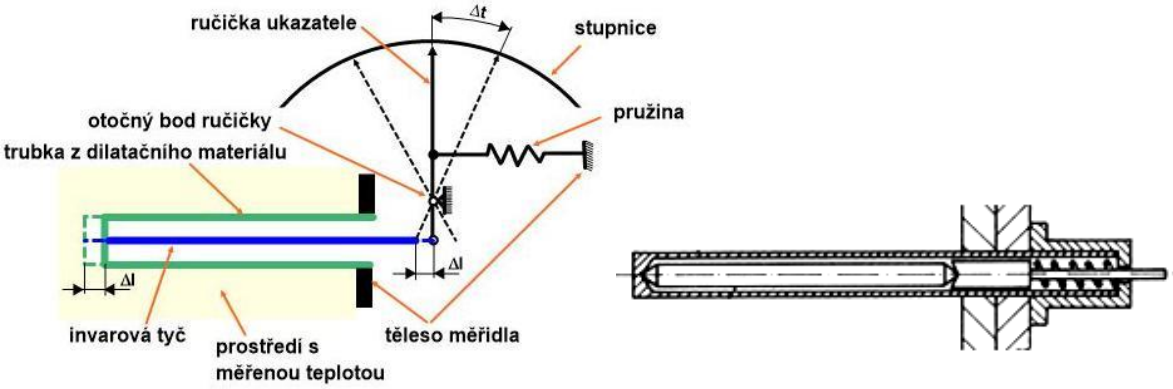
materiál	střední součinitel teplotní roztažnosti $\alpha \cdot 10^6$ (K^{-1})
ocel	11 - 16
invar (36 % Ni, 64 % Fe)	0,3 - 1,5
porcelán	3,0
křemenné sklo	0,5
měď	16,5
aluminium	23,8
mosaz (62 % Cu, 38 % Zn)	16,3

Tabulka 6 Teplotní roztažnost některých materiálů

Tyčové teploměry využívají rozdílné tepelné roztažnosti dvou konstrukčně oddělených součástí a to trubice a vnitřní tyče. Tenkostěnná trubice je zhotovena z materiálu o velké teplotní roztažnosti (bronz, mosaz, měď, ocel…) a má na jednom konci uzavřené dno. Při změnách teploty trubice dilatuje a její volný konec se posouvá. Do trubice je vložena tyč opírající se o dno trubice, která dilataci trubice přenáší na převodový mechanismus. Tyč ale s teplotou rovněž mění svou délku a tím zmenšuje přenášenou výchylku. Materiál tyče (invar, tavený křemen…) musí proto mít co nejmenší roztažnost. Výchylku konce tyče v závislosti na změně teploty určíme jako rozdíl délkové změny trubice a tyčky.

Měření teploty

Změna teploty je přímo úměrná posuvu konce tyče. Čím bude délka prvku větší, tím větší bude výchylka a tím přesněji lze měřit. Přístroj měří průměrnou teplotu podél celého čidla. Výhodou těchto teploměrů je velká přestavující síla, velký teplotní rozsah (až 1000 °C), nízké pořizovací náklady, robustní konstrukce a rychlá odezva na změnu teploty. Nevýhodou je menší přesnost.

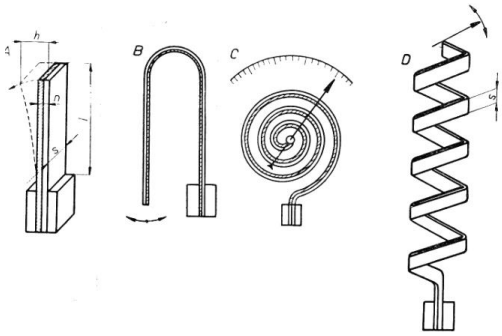


Obr. 25 Princip funkce tyčového teploměru [1]

3.2.1.3 Bimetalické teploměry

Bimetalické teploměry se používají častěji než teploměry tyčové. Teploměrným orgánem je prvek vzniklý pevným spojením dvou kovových pásků z materiálů o různé teplotní roztažnosti. Spojené pásky na jednom konci pevně upnuté v tělese teploměru, jsou za normální teploty rovné, po ohřátí se vyhnou na stranu pásku z kovu o menší tepelné roztažnosti. Volný konec, který se tak s teplotou vychyluje, je připojen přes převod na ručičku ukazatele. Z velikosti výchylky se usuzuje na velikost měřené teploty. Stupnice je cejchována přímo v hodnotách teploty.

Velikost výchylky bimetalického pásku je závislá na rozdílu součinitelů teplotní roztažnosti materiálu obou pásků, na délce a tloušťce pásků a na rozdílu působících teplot. Z toho je zřejmé, že pro přístroje indikační, kdy má mít prvek velkou výchylku, je třeba použít pásků dlouhých a tenkých s co největším rozdílem teplotní roztažnosti. S ohledem na stavební rozměry přístrojů se takové pásky zhotovují ve tvaru U, ploché spirály nebo šroubovice. Tvar spirály a šroubovice je navíc výhodný i tím, že volný konec prvku se i natáčí, a proto k němu může být ručička ukazatele připojena přímo.



Obr. 26 Tvary pásků bimetalických teploměrů [1]

U přístrojů určených k regulaci není nutná tak velká výchylka, ale spíše větší přestavná síla. U nich lze použít přímých kratších prvků o větší tloušťce.

Výhodou bimetalických teploměrů jsou malé pořizovací náklady, jednoduchá údržba a obsluha, robustní konstrukce a velká přestavná síla. Mezi nevýhody těchto teploměrů patří poměrně malý rozsah teplot, malá přesnost a u některých dlouhá doba reakce na změnu teploty. Měřicí prvek během doby mění své vlastnosti a proto je třeba teploměr častěji kontrolovat a cejchovat.

3.2.2 Tlakové teploměry

Tlakové teploměry měří teplotu na základě změny tlaku látky, která je uzavřena v prostoru o stálém objemu. Podle skupenství teploměrné látky se dělí tlakové teploměry na teploměry kapalinové (rtuťové, lihové, glycerínové, acetylénové…) a teploměry plynové (dusíkové, vodíkové, argonové…). Zvláštní skupinu mohou tvořit teploměry parní.

3.2.2.1 Tlakové teploměry kapalinové

Změna objemu kapaliny při stálém tlaku je dána známým vztahem:

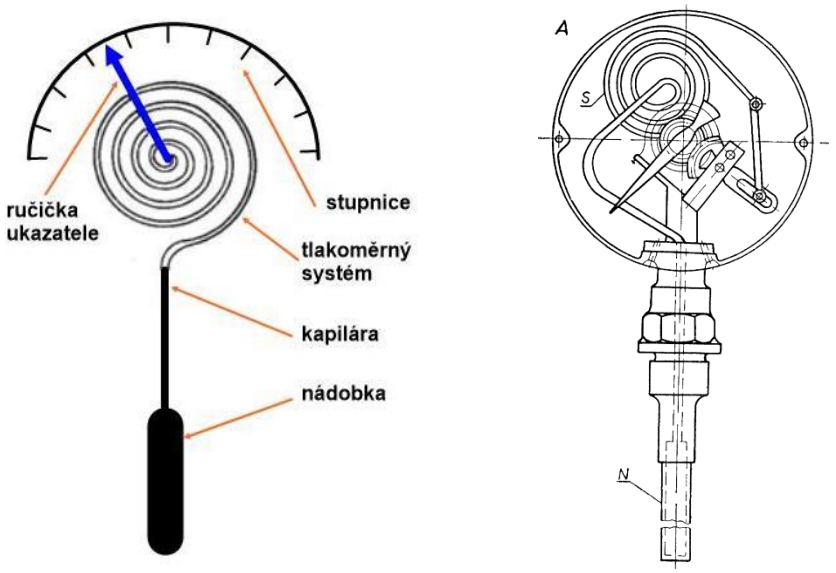
$$\Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta t \qquad (m^3)$$

Kde

ΔV	změna objemu teploměrné látky (m^3)
γ	součinitel objemové roztažnosti ($°C^{-1}$)
V_0	původní objem látky při teplotě před změnou (m^3)
Δt	rozdíl teplot (°C)

Ze vztahu vyplývá, že změna objemu kapaliny je přímo úměrná změně teploty. V uzavřeném prostoru, kde kapalina nemůže expandovat, se tato změna projeví jako změna tlaku, která je rovněž úměrná změně teploty.

Kapalinový tlakový teploměr se skládá z nádobky na teploměrnou kapalinu, kapiláry a tlakoměrného systému (např. deformačního tlakoměru). Tento celý systém je naplněn teploměrnou kapalinou. Změna objemu vyvolaná změnou teploty se převádí na změnu tlaku, který se následně měří pomocí tlakoměru, obvykle deformačního. Stupnice tlakoměru je lineární a je cejchovaná v teplotních jednotkách.



Obr. 27 Princip tlakového teploměru [1]

Tlakové teploměry se rtuťovou náplní se vyrábějí pro rozsahy -30 až +600 °C. Pro měření tlaku se užívá tlakoměrné trubice ve tvaru ploché spirály nebo šroubovice. Tyto trubice mají velkou výchylku a dostatečnou přestavnou sílu.

Přesnost kapalinových tlakových teploměrů je poměrně nízká, asi 2 – 3 %. Používají se ale často, protože jejich údaje lze snadno přenášet i na poměrně velké vzdálenosti (50 m) jednoduchým vložením kovové kapiláry mezi nádobku a tlakoměr. Je-li ale kapilára vystavena vlivům změny teploty, nastávají u ní změny objemu teploměrné kapaliny a tím i chyby měření. Proto se volí objem nádobky teploměrné kapaliny podstatně větší, než objem kapiláry. Pro větší vzdálenosti se přesto musí kapilára teplotně kompenzovat.

3.2.2.2 Tlakové teploměry plynové

Princip měření plynovými tlakovými teploměry je opět založen na změně tlaku plynu při stálém objemu v závislosti na změně teploty. Tato závislost je dána vztahem:

$$\frac{p_0}{T_0} = \frac{p_1}{T_1}$$

Kde

P_0 počáteční tlak (Pa)

P_1 konečný tlak (Pa)

T_0 počáteční teplota (absolutní) (K)

T_1 konečná teplota (absolutní) (K)

Tlak je opět přímo úměrný absolutní teplotě. Tlakoměr přístroje má rovněž rovnoměrnou stupnici, která je cejchovaná v jednotkách teploty.

Podobně jako u tlakových teploměrů kapalinových se přístroj skládá z jímky, kapiláry a tlakoměru. Místo kapaliny je v soustavě plyn. Použitý plyn by měl být chemicky neagresívní, měl by mít velký součinitel objemové roztažnosti při konstantním objemu, malou viskozitu a malou měrnou tepelnou kapacitu. Obvykle se používá dusík, vodík, hélium, kyslík nebo oxid uhličitý. Nejnižší teplota měřicího rozsahu musí být vyšší než teplota, při které plyn začíná kondenzovat. Horní mez rozsahu je omezena těsností všech částí, protože některé plyny při vyšších teplotách pronikají kovy.

Měřicí rozsah tlakových plynových teploměrů bývá běžně mezi -60 °C a + 550 °C. Při zvláštním provedení přístrojů možno měřit teploty od -260 °C až do +800 °C. Tlakoměry se používají obvykle trubicové nebo vlnovcové. Tvar tlakoměru musí umožňovat dobrý přestup tepla mezi měřeným prostředím a plynovou náplní. Pro velmi přesná měření by bylo potřeba, stejně jako u kapalinových tlakových teploměrů provádět kompenzaci na teplotu okolí kapiláry, ale běžně se tato kompenzace neprovádí.

Plynové tlakové teploměry patří mezi velmi přesné teploměry a jsou používány i jako teploměry etalonové. Výhodou těchto teploměrů je dlouhodobá stabilita, necitlivost vůči vnějšímu barometrickému tlaku, možná velká délka kapiláry a možnost instalace v agresivním prostředí.

Nevýhodný je malý přírůstek tlaku s teplotou a poměrně vysoké pořizovací náklady.

3.2.2.3 Tlakové teploměry parní

Parní tlakové teploměry mají v podstatě stejnou konstrukci jako tlakové teploměry kapalinové. Jímka mívá menší objem a je částečně naplněna kapalinou. Prostor nad hladinou kapaliny je vyplněn její sytou párou. Při změně teploty se tlak par mění mnohem výrazněji, než tlak plynu nebo kapaliny. Z velikosti tlaku nasycených par se opět usuzuje na měřenou teplotu.

Jako náplň se používá etylchlorid, aceton, etylén, oxid siřičitý a jiné vhodné kapaliny.

Výhodou parních tlakových teploměrů je jejich velká citlivost, rychlá reakce na změnu teploty, jednoduchá konstrukce a nízká cena.

Nevýhodou těchto teploměrů je nelineárnost stupnice, (protože tlak nasycených par není přímo úměrný teplotě), malý rozsah a rozpětí měření.

Parní tlakové teploměry se používají pro běžná provozní měření, registraci a regulaci teploty v rozsahu od -40 do + 350 °C.

3.2.3 Odporové teploměry

Odporové teploměry jsou založeny na skutečnosti, že elektrický odpor vodiče se mění v závislosti na teplotě vodiče. Každé teplotě odpovídá určitý odpor, na základě něhož se určuje teplota. Odpor

kovových vodičů se vzrůstající teplotou roste. Změnu velikosti elektrického odporu vodiče v závislosti na teplotě je možno určit z následujícího vztahu:

$$\Delta R = \alpha \cdot R_0 \cdot \Delta t \quad (Ohm)$$

Kde

ΔR	změna velikosti odporu ($\Delta R = R - R_0$)
R_0	velikost odporu vodiče při počáteční teplotě
R	velikost odporu vodiče při změněné teplotě
Δt	změna teploty ($\Delta t = t - t_0$)
t_0	počáteční teplota
t	změněná teplota
α	teplotní součinitel odporu

Konečný odpor vodiče po změně teploty pak bude:

$$R = R_0 + \Delta R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t)$$

Uvedený vztah počítá s lineární závislostí odporu na teplotě. To ale platí pouze v poměrně malém teplotním rozsahu. Ve skutečnosti se hodnota teplotního součinitele odporu s teplotou mění. Do uvedeného vztahu se dosazuje jeho střední hodnota, která se stanovuje pouze pro předpokládaný interval měřených hodnot. Například pro rozsah od 0 do 100 °C se počítá

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0}$$

Kde

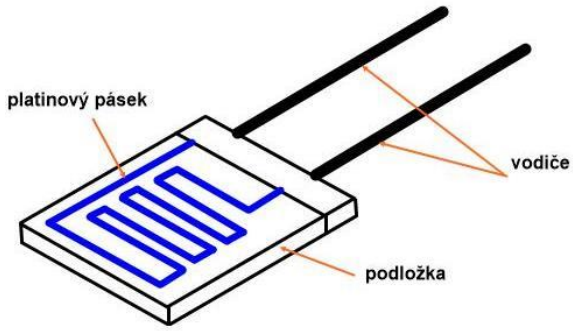
R_0	odpor vodiče při teplotě 0 °C
R_{100}	odpor vodiče při teplotě 100 °C
α	střední hodnota teplotního odporu pro interval 0 – 100 °C

K měření teploty se u odporových teploměrů používá kovů, které lze poměrně jednoduše vyrobit v náležité čistotě a které jsou odolné proti oxidaci. Používá se např. platina (pro rozsah měření -200 až +600 °C), nikl (pro rozsah měření -70 až +150 °C) nebo měď (pro rozsah měření -50 až +150 °C) a další materiály. Z uvedených materiálů nejlépe plní dané podmínky platina. Má relativně velký součinitel odporu, který je časově stálý. Tím je umožněna vzájemná výměna měřicích odporů bez dalšího ověřování hodnot. Pro svoji stabilitu, přesnost a spolehlivost se používají často jako provozní měřidla. Platinové odporové teploměry jsou jedny z nejpřesnějších a používají se i jako etalonová měřidla.

Platinové měřicí odpory jsou vyráběny v několika provedeních jako keramické, pertinaxové, skleněné nebo vrstvové.

Měření teploty

Vlastní měřicí těleso tvoří tenký (0,05 mm) odporový drát navinutý na izolační kostru nebo destičku. Používá se také tělísek, jejichž vinutí je na kovové trubce, nebo je přímo zataveno do skleněného válečku. Používaná izolace je volena podle provozní teploty a bývá to papír, pertinax, slída nebo plastické hmoty. U vrstvových měřicích odporů je tenký platinový pásek přímo tištěn na korundovou podložku, čímž se dosáhne miniaturních rozměrů, a takovéto teploměry se používají obvykle pro měření povrchových teplot.



Obr. 28 Možné provedení odporového čidla Pt 100

Celá konstrukce odporového měřiče teploty se skládá z odporového teploměru, spojovacího vedení, měřidla odporu a ze zdroje proudu. Vlastní odporový teploměr se skládá z měřicího tělesa a armatury. Armatura konstrukčně umožňuje umístění měřicího tělesa v daném místě měření např. v potrubí. Je tvořena obvykle ochrannou trubkou a hlavicí se svorkovnicí pro připojení teploměru k vedení.

Měření teploty u odporových teploměrů je vlastně převedeno na měření elektrického odporu. O druhu měřidla použitého k měření odporu čidla teploměru rozhoduje způsob použití teploměru, jeho instalace a požadovaná přesnost měření.

V podstatě se používají dvě metody měření. Je to buď metoda můstková, která může být buď výchylková, nebo nulová, a metoda kompenzační.

Nulová můstková metoda je přesnější než výchylková, ale vyžaduje složitější přístrojové vybavení. Oba způsoby jsou založeny na principu Wheatstoneova můstku. Zapojení můstku pro měření odporu odporového teploměru je uvedeno na obr. 30. Odpory R_1, R_2 jsou v zapojení můstku konstantní. Odpor R_3 je možno ručně regulovat. R_t představuje odpor teploměru připojeného dvěma přívodními vodiči. Odpor každého vodiče má hodnotu R. Celý můstek je připojen na zdroj stejnosměrného proudu. Rovnováha můstku je pak dána vztahem:

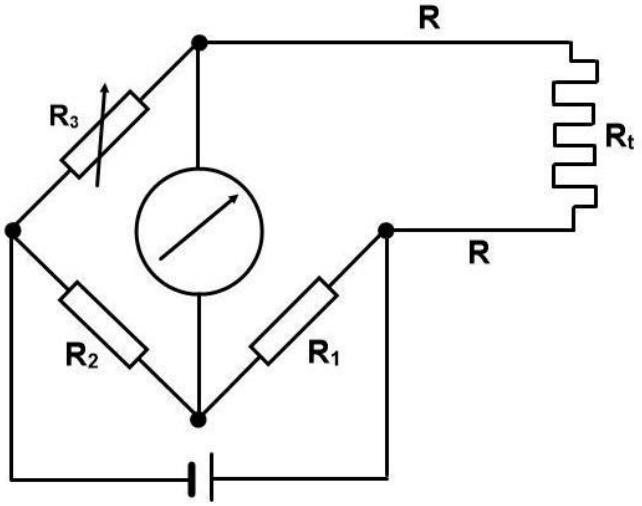
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_t + 2R}{R_3}$$

A měřený odpor R_t pak lze vypočítat

$$R_t = R_3 \cdot \frac{R_1}{R_2} - 2R$$

Měření teploty

Pokud jsou odpory R_1, R_2 a R konstantní, je odpor teploměru R_t daný jeho teplotou, přímo úměrný hodnotě nastavitelného odporu R_3. Velikost odporu R_3 se odečítá na stupnici, která je přímo cejchovaná v jednotkách teploty.



Obr. 29 Příklad zapojení můstku pro měření odporu odporového teploměru

Při měření se ručně nastavuje odpor R_3 na takovou hodnotu, při které je můstek v rovnováze, což znamená, že galvanometr ukazuje nulovou výchylku. Z polohy ukazatele připojeného k běžci odporu R_3 se stanoví měřená teplota odečtením na stupnici.

Výhodou tohoto způsobu měření je nezávislost výsledku na kolísání napětí použitého zdroje napájení. Při popsaném postupu měření nutno nastavovat velikost odporu R_3 ručně, proto se používá spíše pro přesná laboratorní měření. Pro použití v provozu lze celý postup automatizovat. Při velmi přesných měřeních je opět nutno kompenzovat některé doprovodné jevy jako např. ohřívání propojovacích vodičů, čímž se opět mění jejich odpor.

Pro měření teploty založené na změně odporu materiálu s teplotou se používá kromě kovových odporů také odporů polovodičových tzv. termistorů. Ty jsou vyrobeny spékáním např. oxidů niklu, titanu, kobaltu, železa, manganu a dalších. Odpor termistorů při vzrůstající teplotě na rozdíl od kovů klesá. Jejich teplotní součinitel odporu je asi desetkrát větší než součinitel kovů. Závislost odporu termistoru na teplotě je ale složitější. K měření odporu termistoru lze použít podobné přístroje jako pro platinové teploměry.

3.2.4 Termoelektrické teploměry

Termoelektrické teploměry využívají k měření teploty termoelektrický jev u termoelektrického článku - zkráceně termočlánku.

Měření teploty

Termočlánek se skládá ze dvou vodičů z různých kovů na obou koncích vodivě spojených. Je-li teplota obou spojů rozdílná, vznikne mezi oběma větvemi termoelektrické napětí, které vytvoří v obvodu elektrický proud. Závislost termoelektrického napětí na rozdílu teplot obou spojů je dána vztahem:

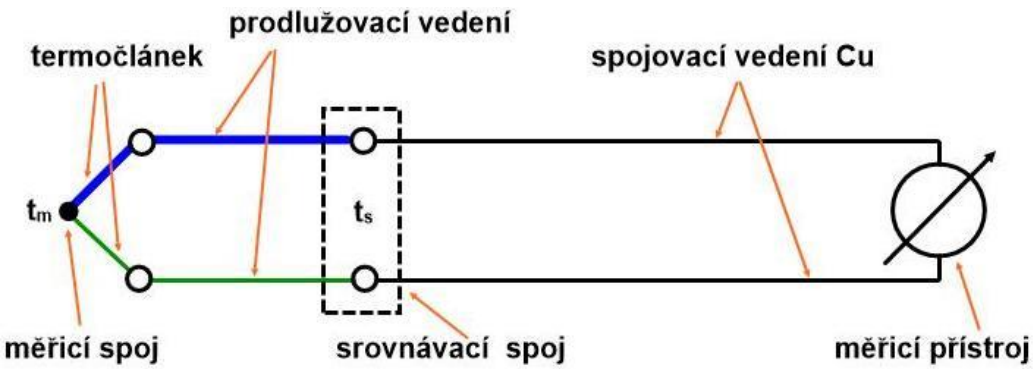
$$E = \alpha \cdot (T - T_0) + \beta \cdot (T - T_0)^2$$

Kde

E	termoelektrické napětí (mV)
α, β	konstanty závislé na použitých kovech
T	absolutní teplota teplejšího spoje (K)
T_0	absolutní teplota chladnějšího spoje (K)

Termoelektrické napětí se mění s teplotním rozdílem podle rovnice kvadratické paraboly. Pro měření se používá jen stoupající části křivky. V tomto úseku je změna napětí přibližně lineární se změnou rozdílu teplot.

Termočlánkové teploměry měří termoelektrické napětí a na základě něho vyhodnocují teplotu. Proto je nutno jeden spoj udržovat na konstantní teplotě o známé velikosti. Spoj, který je udržován na stálé teplotě, nazýváme srovnávací. Druhý spoj, který je umístěn v měřeném prostředí, nazýváme měřicí.

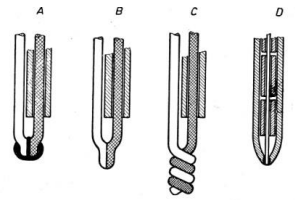


Obr. 30 Schéma zapojení termočlánku

Teplota srovnávacího spoje má velký vliv na přesnost měření. Pro méně přesná měření lze konce termočlánku připojit přímo na svorky měřicího přístroje. Srovnávací spoj, kterým jsou vlastně svorky přístroje, má tedy teplotu okolí. Pokud je teplota okolí stálá, lze toto zapojení provizorně použít. Pro přesná měření je třeba vliv kolísání okolní teploty vyloučit. K tomu se používá zvláštních kompenzačních krabic nebo termostatů. Srovnávací termostat je obvykle vyhříván na teplotu 50 °C a používá se v případě měření více termočlánky. Zjednodušeně lze použít pro udržování stálé teploty srovnávacího, čili tzv. studeného spoje, třeba izolovanou nádobu s tajícím ledem.

Dvojice materiálů na výrobu termočlánků má mít pokud možno co největší nárůst termoelektrického napětí s teplotou, stabilitu při dlouhodobém použití a odolnost proti chemickým a mechanickým vlivům. Termočlánky jsou vyráběny např. z následujících materiálů a slitin: měď – měďnikl (Cu-CuNi)

pro teploty – 200 až 400 °C, niklchrom – nikl (NiCr-Ni), niklchrom – niklhliník (NiCr-NiAl) pro teploty – - 200 až + 1300 °C atd. Pro vysoké teploty se používá např. platinarhodium – platina (PtRh-Pt), pro teploty 0 až 1800 °C a jiné. První kov z uvedených dvojic tvoří kladný pól termočlánku. Termočlánkové kovy jsou obvykle ve formě drátků nebo pásků, zřídka ve tvaru trubiček. Oba kovy jsou od sebe po celé délce, kromě spoje, odizolovány. Spoj se provádí obvykle spájením, svařením nebo pouze zkroucením.

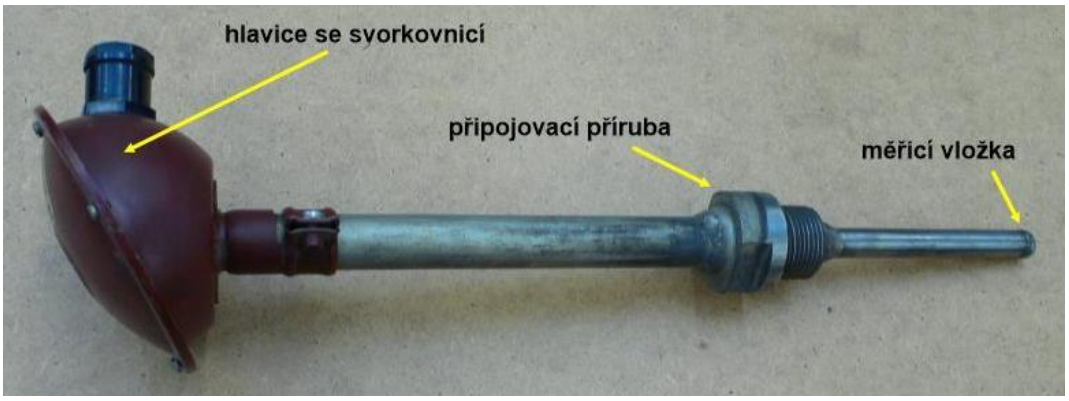


Obr. 31 Možnosti vodivého spojení termočlánkových drátů - pájení, svaření, zkroucení a trubičkové spojení [1]

Ze srovnávacího místa může být termoelektrický článek připojen k měřicímu přístroji spojovacím měděným vedením. Zapojení termočlánku je včetně popisu jednotlivých částí uvedeno na obr. 31.

Obr. 32 Termočlánková čidla

Vlastní konstrukční provedení termočlánkového měřidla může mít nejrůznější formy, které jsou odvislé od místa a účelu použití. V případě laboratorních měření může být používáno pouze izolované termočlánkové vedení, které je připojeno na vyhodnocovací přístroj. V případě průmyslového provozního měřidla se termočlánkové teploměry skládají z vlastního termočlánku (měřicí vložky) a z armatury, kterou tvoří izolovaná trubice s připojovací přírubou a hlavice se svorkovnicí.



Obr. 33 Provozní termočlánkové měřidlo

3.2.5 Speciální teploměry

K měření teploty se využívá změn některých specifických fyzikálních vlastností látek.

Iontové teploměry

U iontových teploměrů se využívá skokové změny elektrické vodivosti v oblasti fázové změny pevných elektrolytů. Při změnách teploty dochází k přechodům pevné fáze na kapalnou a naopak. Při vzrůstu teploty dochází k rozpadu krystalů a tím k uvolňování iontů, které jsou nositeli proudu. Nastává iontová vodivost. Tato změna je velmi výrazná u látek s iontovou vazbou. Čidlem těchto teploměrů je skleněná nádobka s elektrolytem, v němž jsou umístěny dvě platinové elektrody a přídavné topení. Teplota v čidle je udržována na teplotě fázové přeměny a měřítkem měřené teploty prostředí kolem čidla je velikost topného proudu. Moderní iontové teploměry mohou mít i pevný elektrolyt ve formě tenké vrstvičky nanesené na keramické podložce. Podle druhu použitého elektrolytu se používají iontové teploměry pro měření teplot 200 až 700 °C.

Krystalové teploměry

Jako čidlo teploty u nich slouží speciální výbrus krystalu. Ten je zapojen v obvodu tranzistorového oscilátoru. Měřená teplota u krystalu vyvolává změny jeho rezonančního kmitočtu. Na základě porovnávání kmitočtu krystalu a referenčního kmitočtu nezávislého oscilátoru se vyhodnocuje velikost měřené teploty. Teploměry založené na tomto principu se používají pro teplotní rozsah -80 až +250 °C. Výhodou je velká přesnost měření a rozlišitelnost až 0,0001 °C.

Barevné indikátory teploty

Tyto teploměry jsou určeny převážně pro speciální jednorázové použití. Podle principu, na kterém fungují, se dělí na chemické, tavné, kapalné krystaly a luminiscenční.
Chemické barevné indikátory jsou látky, které při dosažení určité teploty výrazně změní svoji barvu. V závislosti na složení se dají použít v rozmezí 40 až 1000 °C.
Teploměrné barvy pracují na podobném principu. Základem barev jsou obvykle sloučeniny stříbra, rtuti, mědi, olova, antimonu a jiných prvků. Barvy se nanášejí na povrch materiálu před zahřátím. Jejich teplotní rozsah je 40 až 1350 °C.
Teploměrné tužky slouží pro měření teploty kovových předmětů, na které se aplikují nanášením. Mohou reagovat na jednu nebo dvě teploty, případně mohou být reverzibilní, což znamená, že po poklesu teploty se vracejí ke své původní barvě.
Luminiscenční barevné indikátory teploty mění svůj jas nebo barvu světélkování. Některé mění současně světélkování i barvu. Některé jsou použitelné při běžném denním světle, jiné je nutno ozářit ultrafialovým světlem. Měřená teplota závisí na druhu použité luminiscenční látky.

Optoelektronické snímače teploty

Podle principu možno rozdělit tyto snímače teploty na refraktometrické, absorpční, polarizační a fluorescenční.

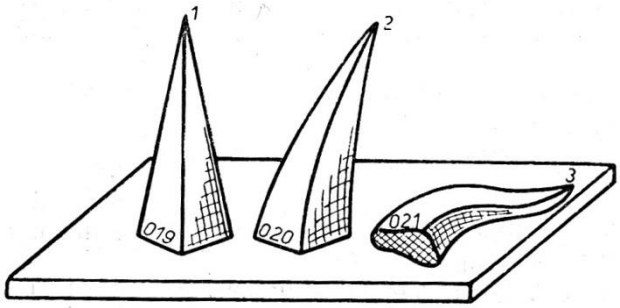
Refraktometrické snímače využívají závislost indexu lomu vlákna na indexu lomu okolního prostředí. Vlákno je nutno kalibrovat pro zvolený rozsah teploty a pro měřené prostředí, jehož teplotní závislost indexu lomu je známa.

Polarizační snímače využívají teplotní závislosti natáčení roviny polarizace křemíkových čidel. Velikost natočení roviny polarizace světla záleží na jeho vlnové délce, optické dráze a teplotě materiálu.

Výhodou optoelektrických snímačů teploty je velká odolnost proti rušivým vlivům a možnost oddělení vyhodnocovací elektroniky od míst měření. Optický signál lze přenášet na velké vzdálenosti například i v korozním prostředí pomocí chráněných světlovodů. Tyto snímače mají poměrně vysokou přesnost a velký rozsah měření -100 až 700 °C.
Pro vyhodnocování měřicích signálů je ale nutno používat poměrně složité vyhodnocovací zařízení a kvalifikovanou obsluhu.

Tavná měřidla teploty

V některých průmyslových odvětvích, například v keramickém průmyslu, se využívá k hrubému měření teplot, tzv. Segerových jehlanů. Měření teploty je založeno na změně skupenství látek. Segerovy jehlany jsou vyrobeny ze směsí vápence, křemene, kaolinu a dalších přísad. V závislosti na složení mají různé teploty tání. Vyrábějí se pro rozsah teplot 600 až 2000 °C. Měření teploty tímto způsobem je poměrně málo přesné a závisí na mnoha podmínkách při měření.



Obr. 34 Segerovy jehlany [1]

Na podobném principu je založeno měření teplot pomocí tavných kolíků. Kolíky mají známé teploty tavení o různé výši a používají se v sadách podle předem očekávaného teplotního rozsahu. Po jejich umístění na měřená místa, například na pístech spalovacích motorů, se nechá zařízení zahřát na provozní teplotu a po demontáži je možno podle vytavených kolíků usuzovat na teplotu, která v provozu působila v prostoru jejich umístění.

3.2.6 Pyrometry

Princip bezdotykových teploměrů spočívá v měření tepelné energie vyzařované měřeným prostředím. Každé těleso vysílá tepelnou energii zářením, tedy elektromagnetickými vlnami stejného druhu, jako je viditelné záření – světlo. Barva vyzařování tělesa závisí na jeho absolutní teplotě. Čím má těleso vyšší teplotu, tím má záření kratší vlnovou délku. Lidské oko vnímá záření o vlnové délce zhruba od 0,37 do 0,7 μm. Do teploty asi 500 °C má záření vlnovou délku poměrně

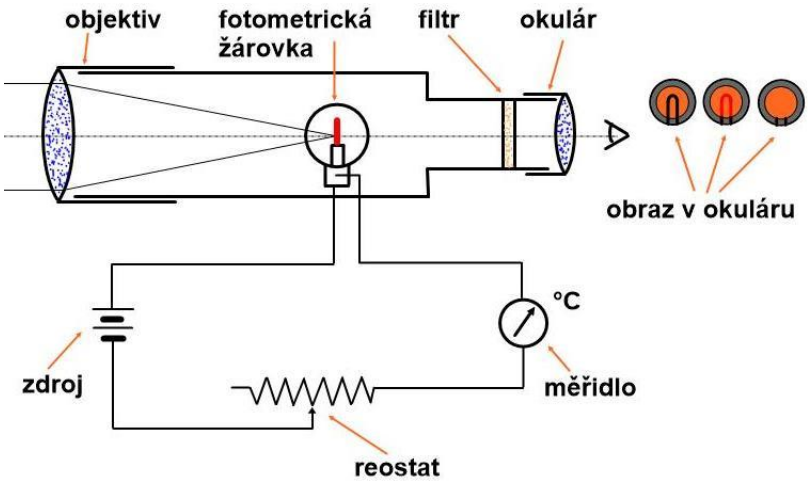
dlouhou a je pro lidské oko neviditelné. Teprve nad tyto hodnoty se objevuje záření o viditelné vlnové délce a to červené barvy. S rostoucí teplotou se délka elektromagnetických vln zkracuje, což vnímáme jako změnu barvy, která přechází přes žlutou (1200 °C), zelenou (2000 °C) a modrou (3000 °C). Krátké ultrafialové záření převládá při teplotách kolem 6000 °C. Při všech teplotách tedy vysílají tělesa elektromagnetické vlny v rozsahu vlnových délek 0,2 (ultrafialové) až 20 μm (infračervené).

Bezdotykové teploměry dělíme na subjektivní a objektivní. Subjektivní přístroje vyžadují obsluhu a jejich přesnost závisí na osobě, která měření provádí. K těmto přístrojům patří pyrometry monochromatické (jasové) a pyrometry na spektrální rozložení (barvové). Objektivní pyrometry nevyžadují obsluhu, jejich přesnost nezáleží na schopnostech obsluhy. Sem patří pyrometry termoelektrické a fotoelektrické. Tato pyrometry se používají pro běžná provozní měření, registraci a regulaci teploty.

3.2.6.1 Monochromatické pyrometry

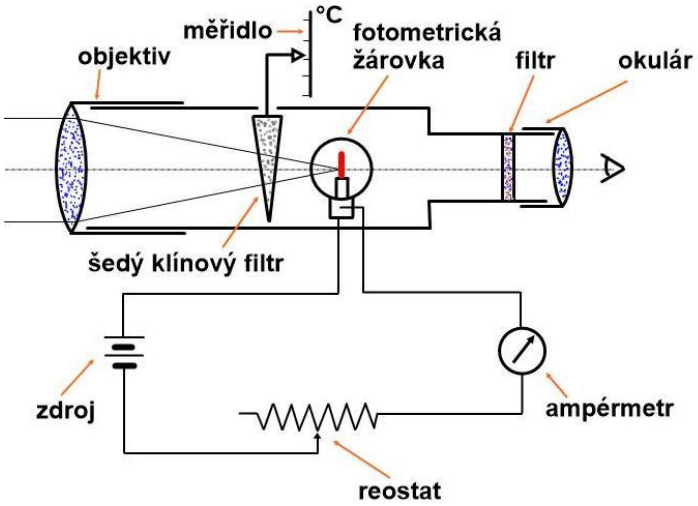
Obvykle jsou známy pod názvem jasové pyrometry. Na teplotu usuzují ze záření o vlnové délce 0,65 mm, což odpovídá červenému světlu. Toto záření získávají použitím červeného filtru, který je propouští a záření o jiných vlnových délkách pohlcuje. Principem měření pyrometru je srovnávání jasu měřeného předmětu s jasem srovnávacího zdroje, kterým je pyrometrická žárovka. Přitom se buď mění jas srovnávacího zdroje – tedy žárovky, nebo při stálém jasu se filtrem omezuje jas měřeného zářiče.

Princip přístroje je na obr. 35. Optická soustava přístroje se skládá z objektivu, okuláru a monochromatického filtru. Mezi objektivem a filtrem je fotometrická žárovka. Proud z napájecí baterie, a tím i jas žárovky, je regulován reostatem a měřen miliampérmetrem. Při měření sledujeme měřený povrch přes vlákno žárovky a reostatem měníme napájecí proud žárovky do té doby, dokud barva vlákna nesplyne s barvou měřeného povrchu. Napájecí proud je mírou měřené teploty a stupnice miliampérmetru je cejchována v hodnotách teploty.



Obr. 35 Schéma jasového pyrometru

Jiný princip jasového pyrometru je na obr. 36. U něj je napájecí proud žárovky stálý, ale mezi žárovku a objektiv se zasouvá klínový šedý filtr, který postupně zeslabuje záření měřeného povrchu. Po srovnání obrazu vlákna s měřeným povrchem se podle tloušťky použitého filtru usuzuje na teplotu měřeného povrchu tělesa.



Obr. 36 Schéma jiného jasového pyrometru

Tyto přístroje jsou cejchovány pro záření absolutně černého tělesa. Pro jiné poměry nutno výsledky měření korigovat obvykle podle korekční tabulky dodávané výrobcem měřidla. Těmito přístroji v závislosti na provedení lze měřit teploty od 700 do 3500 °C.

Pyrometry, využívající širšího spektrálního pásma než pyrometry monochromatické, se nazývají pásmové. Šířka pásma je vymezena optikou, filtry a citlivostí detektoru záření.

3.2.6.2 Pyrometry na spektrální rozložení

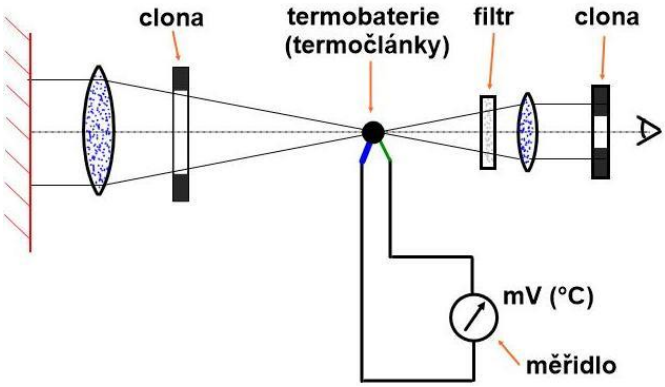
Tyto pyrometry byly dříve označovány jako pyrometry barvové. Jsou založeny na teplotní závislosti spektrálního rozložení zářivosti tělesa. Barevnou teplotu tělesa lze určit buď pomocí barevného vjemu vyvolaného smíšením dvou jednobarevných záření, nebo pomocí poměru jasů ve dvou spektrálních oblastech. Podle toho lze tedy tyto pyrometry dělit na srovnávací a poměrové.

Principiálně barvové pyrometry určují teplotu podle poměru dvou barevných složek vstupujícího záření. Z celkového záření odlučují záření červené a zelené, které smíšením dává výslednou barvu. Ta se porovnává se stejně zpracovanou barvou získanou ze světla porovnávací žárovky, žhavené konstantním proudem. Nastavení jednotlivých barev je pak měřítkem teploty měřeného tělesa.

3.2.6.3 Termoelektrické pyrometry

Termoelektrické pyrometry nejsou závislé na obsluze. Na teplotu se zde usuzuje z celkového záření vysílaného na všech vlnových délkách. Svazek paprsků je opticky soustředěn na černou plošku termočlánku. Energie záření, která je pohlcena, se mění na energii tepelnou a teplota na termočlánku se zvýší. Naměřené termoelektrické napětí je pak mírou měřené teploty tělesa. Rozsah měření lze

měnit clonami s různě velkým otvorem, které se vkládají za objektiv. Pyrometry založené na tomto principu mohou mít měřicí rozsah až od – 40 °C do + 5000°C.



Obr. 37 Princip termoelektrického pyrometru

3.2.6.4 Fotoelektrické pyrometry

Jedná se v podstatě o pyrometry monochromatické, které sledují úzký obor záření. Vyhodnocení je dáno fotonkou. Podle výstupních elektrických parametrů fotonky se usuzuje na velikost měřené teploty. Tyto pyrometry mají malé zpoždění, proto jsou vhodné i pro měření rychle se měnících teplot.

Měření teploty

Obr. 38 Pyrometr DIT - 500

Měření teploty

Měření teploty

3.2.7 Fototermometry

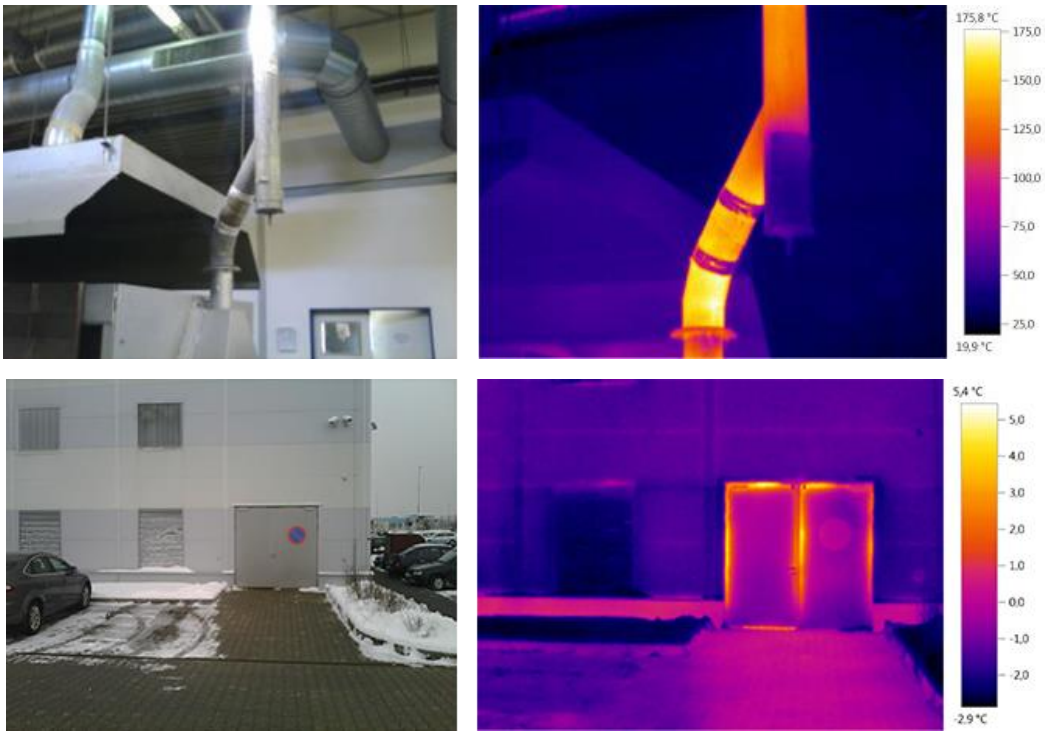
Fototermometrie využívá při měření teplot fotografický materiál, který je citlivý na infračervené záření s vlnovou délkou 0,78 μm. Při snímkování měřeného objektu se současně fotografuje i tzv. teplotní měřítko se známým rozložením teplot. Měřítko se skládá ze soustavy destiček, z nichž každá je ohřátá na jinou teplotu určenou pomocí termočlánku. Tím se získá stupnice pro vyhodnocení snímku. Citlivost tohoto způsobu měření je poměrně vysoká. Rozsah měřených teplot je od +250 do +1000 °C.

3.2.8 Termovize

Termovizní měřiče teplot využívají opět infračervené záření povrchu měřených objektů. Teplotní pole je snímáno speciální kamerou a zobrazováno na speciálním monitoru. Různé teploty se na monitoru zobrazí jako plochy s odpovídajícími odstíny šedé barvy nebo jako různobarevná pole. Jako detektor infračerveného záření se používají kvantové detektory nebo bolometry.

Kvantové detektory pracují na principu změny jejich elektrické vodivosti v závislosti na infračerveném záření, které na ně dopadá. Vyžadují chlazení na nízkou teplotu. Materiálem je obvykle antimonit india (InSb) chlazený kapalným dusíkem.

Bolometrické detektory se po dopadu infračerveného záření ohřívají a mění elektrický odpor. Pracují při běžné teplotě.



Obr. 39 Příklady použití termovize (http://www.termovize.com/prumyslove-objekty-termosnimky)

4 Měření vlhkosti vzduchu

4.1 Základní pojmy

Spodní vrstvy atmosférického vzduchu jsou v kontaktu s vodním povrchem moří, řek nebo jezer. Z vodní hladiny se přitom voda odpařuje, proto vzduch prakticky vždy obsahuje určité množství vodní páry. Toto množství závisí na atmosférických podmínkách. Největší vliv na obsah vodních par má teplota a tlak vzduchu.

Vlhkost vzduchu, tedy množství vodních par, které jsou ve vzduchu momentálně obsaženy, se měří v případech, kdy je to potřeba. Například v potravinářském průmyslu, při některých speciálních výrobních postupech, při zpracovávání hygroskopických materiálů, v chemickém průmyslu a v mnoha dalších odvětvích lidské činnosti. Vlhkostí vzduchu je ovlivňován i pocit komfortu životního prostředí a doporučené hodnoty vlhkosti vzduchu jsou dány hygienickými předpisy.

Obsah vodních par ve vzduchu možno vyjádřit několika způsoby. Určujeme absolutní a relativní vlhkost vzduchu a tzv. rosný bod. Princip měření vlhkosti vzduchu lze prakticky použít i pro měření vlhkosti jiných plynů.

Obr. 40 Měřidlo relativní vlhkosti a teploty vzduchu Testo 610

Absolutní vlhkost vzduchu

Absolutní vlhkost vyjadřuje hmotnostní množství vodní páry, která je obsažena v objemové jednotce vlhkého vzduchu nebo plynu.

$$\Phi' = \frac{m}{V_v} \quad (kgm^{-3})$$

Kde

Φ'	absolutní vlhkost plynu (kgm^{-3})
m	hmotnost vodní páry (kg)
V_v	objem vlhkého plynu (m^3)

Měření vlhkosti vzduchu

Při určité teplotě má vzduch schopnost pojmout jen určité maximální množství vodní páry. V takovém případě je vodní parou nasycen a dále ji nepřijímá. Absolutní vlhkost pro stav nasycení můžeme nazývat maximální absolutní vlhkost a značit ji Φ'_n. Čím je teplota vzduchu vyšší, tím je vzduch schopen pojmout větší množství vodní páry. Pro každou teplotu tedy existuje hodnota maximální absolutní vlhkosti. Absolutní vlhkost se zjišťuje tehdy, má-li se určit skutečné množství vodní páry ve vzduchu.

Relativní vlhkost vzduchu

Vliv absolutní vlhkosti vzduchu a teploty lépe vystihuje pojem relativní vlhkost vzduchu. Relativní vlhkost vzduchu udává poměr mezi skutečným absolutním a maximálním absolutním (tedy nasyceným) obsahem vody ve vzduchu při dané teplotě. Udává se v procentech. Vyjadřuje procentuální nasycení suchého vzduchu vodní parou při dané teplotě. Suchý vzduch má relativní vlhkost 0% a vzduch plně nasycený vodní parou při dané teplotě má relativní vlhkost 100%. Pro výpočet relativní vlhkosti platí vztah:

$$\varphi = \frac{\Phi'}{\Phi''} \cdot 100 \quad (\%)$$

Kde

Φ' absolutní vlhkost vzduchu (kgm^{-3})

Φ'' maximální absolutní vlhkost vzduchu při dané teplotě (kgm^{-3})

φ relativní vlhkost vzduchu (%)

Tlak plynu je dán součtem parciálních (dílčích) tlaků jednotlivých složek. Tlak vlhkého vzduchu lze tedy rozdělit na parciální tlak vodní páry a parciální tlak ostatních plynů. Relativní vlhkost vzduchu můžeme potom také vyjádřit vztahem:

$$\varphi = \frac{P'}{P''} \cdot 100 \quad (\%)$$

Kde

P´ parciální tlak vodních par ve vzduchu (Pa)

P´´ parciální tlak páry, kterou je vzduch při téže teplotě nasycen (Pa)

Z uvedeného je zřejmé, že při změně teploty vzduchu se mění i relativní vlhkost. Ochlazováním se relativní vlhkost zvětšuje, až při určité teplotě dosáhne hodnoty 100%. Při dalším snižování teploty se vzduch přítomným množstvím páry přesytí a přebytečné množství páry zkondenzuje. Teplota, při které bylo dosaženo nasycení, se nazývá rosný bod. Absolutní vlhkost vzduchu při nasycení vodní parou (100% relativní vlhkosti) při vybraných teplotách je uvedena v následující tabulce.

Teplota vzduchu (°C)	Max. absolutní vlhkost vzduchu Φ´´ (g/m^3)
-100	0,000018
-80	0,0006
-60	0,011
-40	0,12
-20	0,889
0	4,83
20	17,29
40	51,15
60	130,2
80	293,3
100	591

Tabulka 7 Maximální absolutní vlhkost vzduchu v závislosti na teplotě

4.2 Vlhkoměry

K měření absolutní i relativní vlhkosti vzduchu slouží vlhkoměry, které používají různé metody měření. Hlavně jsou to následující metody:

- psychrometrická metoda – použití hlavně pro měření relativní vlhkosti
- hygrometrická metoda – určují absolutní i relativní vlhkost
- kondenzační metoda – měří absolutní i relativní vlhkost na základě rosného bodu

4.2.1 Psychrometry

Princip psychrometrické metody spočívá v měření rozdílu teploty měřeného vzduchu a teploty teploměru, který je trvale navlhčován. Nejjednodušší přístroj pro měření vlhkosti vzduchu je vybaven dvěma teploměry. Jeden teploměr je suchý a druhý je vlhčený tkaninovou punčoškou, která přivádí k teploměru vlhkost z vodní lázně. Oba teploměry jsou obtékány proudem měřeného vzduchu. Čím je vzduch sušší, tím má vodní pára v něm obsažená menší parciální tlak a tím rychleji se odpařuje voda z punčošky vlhčeného teploměru. Teplo potřebné k odpaření vody sníží teplotu vlhkého teploměru.

Teplota vlhkého teploměru je nižší, než teplota suchého teploměru. Rozdíl teplot obou teploměrů je přímo úměrný tzv. nedosytnosti vzduchu a nepřímo úměrný statickému tlaku vzduchu a tzv. psychrometrickému součiniteli. Možno pak počítat:

$$t_1 - t_2 = \frac{P''_2 - P'_1}{A \cdot P_s} \quad (°C)$$

Měření vlhkosti vzduchu

Kde

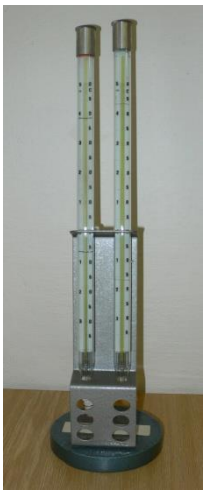
t_1	teplota suchého teploměru (°C)
t_2	teplota vlhkého teploměru (°C)
P''_2	tlak syté páry nasyceného vzduchu při teplotě t_2 (Pa)
P''_1	tlak syté páry nasyceného vzduchu při teplotě t_1 (Pa)
P'_1	parciální tlak vodní páry vlhkého vzduchu při teplotě t_1 (Pa)
P_s	statický tlak vzduchu, obvykle se bere barometrický tlak (Pa)
A	psychrometrický součinitel (zahrnuje hlavně vliv rychlosti proudění vzduchu přístrojem) (K^{-1})

Relativní vlhkost vzduchu pak lze určit:

$$\varphi = \frac{P'_1}{P''_1} = \left(\frac{P''_2}{P''_1} - \frac{P_s}{P''_1 \cdot A} \cdot (t_1 - t_2)\right) \cdot 100 \quad (\%)$$

Jako teploměrů pro psychrometry se používá teploměrů rtuťových, termočlánkových, odporových a tlakových. Vzhledem k tomu, že rychlost proudění měřeného vzduchu kolem obou teploměrů má vliv na výsledky měření, je přístroj pro přesnější měření (aspirační psychrometr) vybaven ventilátorem, který zajišťuje stálou rychlost proudění vzduchu. Aby nebylo nutno počítat hodnoty podle výše uvedeného vztahu, používají se pro určení relativní vlhkosti vzduchu obvykle tabulkově sestavené hodnoty. Psychrometry jsou vhodné pro měření vlhkosti plynů do 90%, při teplotách nad 0°C. Vzhledem k nasycování okolního prostoru vlhkostí z mokrého teploměru nejsou vhodné pro měření v malých, uzavřených prostorách.

Pro měření v provozech a k regulaci se běžně používá psychrometrů odporových. Princip měření u nich je stejný, rozdíl je hlavně v použití odporových teploměrů a ve vyhodnocování měření na základě měření elektrických hodnot.



Obr. 41 Psychrometr

Teplota vzduchu (°C)	Rozdíl teplot na suchém a mokrém teploměru (°C)													
	1	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8
0	80	60	51	41	32	22	13	4						
2	82	64	55	47	38	30	21	13	5					
4	84	67	59	51	44	36	29	21	14					
6	85	70	63	56	48	41	35	26	21	14	8			
8	86	72	66	59	53	46	40	34	27	21	15	6		
10	87	74	68	62	56	50	44	39	33	27	22	16	11	6
12	88	76	70	65	59	54	48	43	38	33	28	23	18	13
14	89	78	72	67	62	57	52	47	42	37	32	28	23	19
16	89	79	74	69	64	60	55	50	46	41	37	33	28	24
18	90	80	76	71	66	62	58	53	49	45	41	37	33	29
20	91	81	77	73	68	64	60	56	52	48	44	40	37	33
22	91	82	78	74	70	66	62	58	54	51	47	43	40	39
24	91	83	79	75	71	68	64	60	57	53	50	46	43	40
26	92	84	80	76	73	69	66	61	59	55	52	49	46	43
28	92	84	81	77	74	71	67	64	60	57	54	51	48	45
30	93	85	82	78	75	72	68	65	62	59	56	53	50	47
32			83	79	76	73	70	67	64	61	58	5	52	49
34							71	68	65	62	59	57	54	51

Tabulka 8 Psychrometrická tabulka pro určení relativní vlhkosti vzduchu

4.2.2 Hygrometry

Hygrometrická metoda využívá změny některých fyzikálněchemických vlastností materiálů, ke kterým dochází při změně množství absorbované vody. Vlhkost může ovlivňovat délku, hmotnost, objem, elektrický odpor a další vlastnosti materiálů. Existuje celá řada přístrojů, kterými lze absolutní nebo relativní vlhkost měřit.

4.2.2.1 Vlasový vlhkoměr

Vlasový vlhkoměr je hlavním představitelem dilatačních hygrometrů. Používá jako měřicího orgánu lidské vlasy. Lidský odmaštěný vlas mění svou délku v závislosti na vlhkosti prostředí. Při změně relativní vlhkosti z 0 na 100 %, vlas mění svou délku až o 3 %. Závislost poměrného prodloužení vlasu na relativní vlhkosti vzduchu je dána vztahem

$$\varepsilon = C \cdot T \cdot log\varphi \quad (-)$$

Kde

- ε poměrné prodloužení vlasu (-)
- C konstanta
- T absolutní teplota (K)
- φ relativní vlhkost (%)

Měření vlhkosti vzduchu

Délkové prodloužení jednoho vlasu nebo celého svazku vlasů lze jednoduše pomocí pákového mechanismu převést na výchylku ručičkového ukazatele, který je cejchován přímo v hodnotách relativní vlhkosti. Výchylku je možné vhodným zařízením převést i na elektrický signál. Vlasový vlhkoměr pracuje spolehlivě i při teplotách pod bodem mrazu. Nevýhodou je možnost jeho přetížení silového nebo teplotního a to, že jimi nelze měřit proudící plyny. Lze je nahradit pomocí pásků z plastické hmoty, která má obdobné vlastnosti. Vlasové psychrometry jsou velmi jednoduché, ale jejich přesnost je pouze asi 3 %.

Obr 42 Vlasový vlhkoměr (http://cs.wikipedia.org/wiki/Vlhkoměr)

4.2.2.2 Elektrolytický vlhkoměr

Tyto vlhkoměry se používají jako náhrada vlasových vlhkoměrů. Převádějí změnu vlhkosti na změnu elektrického odporu. Na skleněné trubce je navléknuta punčoška ze skleněné příze. Ta je napuštěna roztokem chloridu lithnatého LiCl, který slouží jako elektrolyt. Přes punčošku jsou navinuty dvě drátové elektrody, které jsou připojeny na střídavý proud o napětí 24 V. Proud mezi elektrodami prochází elektrolytem, který se ohřívá, a voda se odpařuje. Teplota elektrolytu se ustálí na rovnovážné hodnotě, která je funkcí parciálního tlaku vodní páry obsažené v měřeném vlhkém plynu. Stupnice přístroje je cejchována přímo v hodnotách absolutní vlhkosti. Měřidlo relativní vlhkosti používá stejný princip měření, je však doplněno teploměrem, který snímá teplotu měřeného plynu.

4.2.3 Rosné vlhkoměry

Rosné vlhkoměry využívají k určení vlhkosti vzduchu teploty, při které je plyn vodní parou nasycen. Princip měření spočívá v tom, že je ochlazován senzor v podobě destičky tak dlouho, až se objeví kondenzát – kapičky vody. V tom okamžiku se přeruší ochlazování a začne ohřev. Nyní se měří teplota, při které rosa opět zmizí. Ze střední hodnoty těchto teplot se usuzuje na relativní vlhkost měřeného plynu.

Existuje více konstrukcí rosných vlhkoměrů. Pracují však na stejném principu, jak bylo popsáno. Liší se například způsobem ochlazování měřicí destičky, způsobem určování okamžiku dosažení orosení nebo způsobem měření teplot.

5 Měření intenzity osvětlení

5.1 Základní pojmy

Mezi významné činitele podmiňující život patří světlo. Světlo umožňuje zrakové vjemy a přispívá k vytváření celkové duševní pohody lidí. Prostřednictvím zraku získává člověk asi 80 až 90% všech informací o prostředí, které ho obklopuje.

Světlo je příčné elektromagnetické vlnění. Ke svému šíření nepotřebuje látkové prostředí (šíří se i ve vakuu). Rychlost světla ve vakuu je přibližně 3×10^8 ms^{-1}. Jde o maximální rychlost, kterou se může fyzikální objekt pohybovat. V látkovém prostředí je rychlost světla vždy menší a je ovlivněna prostředím a frekvencí světla.

Do spektra elektromagnetického vlnění patří rovněž záření kosmické, záření gama, rentgenové záření, optické záření, radiové a televizní vlny. Viditelné světlo je tedy elektromagnetické vlnění, které je lidské oko schopno vnímat. S oblastí viditelného světla sousedí záření ultrafialové a záření infračervené. Obě tato záření mají z fyzikálního hlediska obdobné vlastnosti jako záření viditelné, zrak je však není schopen vnímat.

Stejně jako jiné druhy vlnění, charakterizuje i světlo vlnová délka, kterou lze vypočítat:

$$\lambda = \frac{c}{f} \ (m)$$

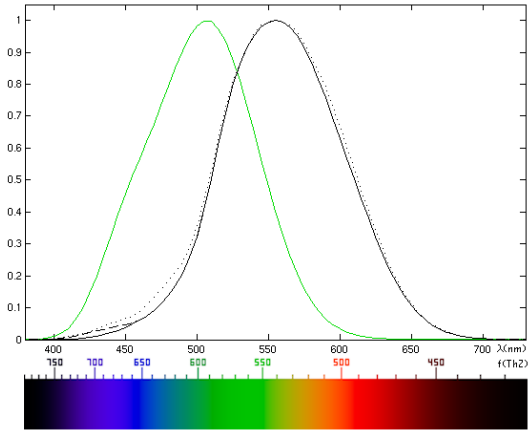
Kde

λ	vlnová délka (m)
c	rychlost - v tomto případě rychlost světla (ms^{-1})
f	frekvence (s^{-1})

Lidské oko je schopno vnímat elektromagnetické vlnění v rozmezí vlnových délek zhruba 390 nm až 790 nm. Světlo různých frekvencí a tedy i vlnové délky vyvolává u člověka různý vjem, který lze charakterizovat jako barvu světla. Interval viditelného světla je vymezen na straně ultrafialového záření fialovou barvou (vlnění o vlnové délce 390 nm) a na straně infračerveného záření červenou barvou (vlnění o vlnové délce 790 nm). Toto vymezení je ale ovlivněno individuálními vlastnostmi lidského oka. Nejcitlivější je lidské oko na barvu žlutozelenou (vlnění o vlnové délce λ = 550 nm). V praxi většinou vnímáme světlo složené z vlnění různých frekvencí. Při určité kombinaci barevných složek světla vnímáme světlo jako bílé.

U lidského oka se rozlišuje citlivost fotopická (vidění za dne) a skotopická (vidění za tmy). Maxima obou citlivostí se v závislosti na vlnové délce liší. Je to způsobeno rozdílnou citlivostí čípků a tyčinek v oku. Čípky jsou citlivější na denní světlo a umožňují barevné vidění. Čípky ale potřebují k činnosti více světla a proto lidské oči v noci nevidí barevně. Tyčinky jsou citlivější než čípky, proto je lidské oko využívá k vidění za nízké intenzity ozáření, tedy za šera a v noci.

Měření intenzity osvětlení



Obr. 43 Spektrální citlivost oka (http://cs.wikipedia.org/wiki/Světlo)

Veličiny, které popisují vlastnosti zdrojů světla, jeho přenos prostorem, i děje spojené s dopadem světla na plochu nebo předměty, jsou označovány jako veličiny fotometrické. Třemi základními veličinami jsou svítivost, světelný tok a intenzita osvětlení.

Prostorový úhel

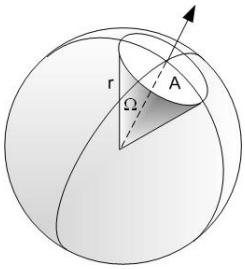
Prostorový úhel je důležitou geometrickou veličinou, kterou je nutno znát při definování fotometrických veličin. Označuje se Ω a jeho jednotkou je steradián (sr). Prostorový úhel je vrcholový úhel Ω kužele, který vytíná na povrchu koule o poloměru r a středu ve vrcholu kužele kulový vrchlík o plošném obsahu A. Prostorový úhel je pak definován vztahem

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (sr)$$

Kde

Ω	prostorový úhel (sr)
A	plocha vytnutá kuželovou plochou na povrchu koule (m^2)
r	poloměr koule (m)

Jeden steradián odpovídá takovému úhlu vrcholu kužele, který vytíná na kouli o poloměru r = 1 m plochu A o obsahu 1 m^2. Plný prostorový úhel má velikost 4π (sr).



Obr. 44 Znázornění pojmu "prostorový úhel" (http://cs.wikipedia.org/wiki/Prostorový úhel)

Měření intenzity osvětlení

Světelný tok

Světelný tok vyjadřuje intenzitu zrakového vjemu normálního oka, který je vyvolán energií světelného záření, které projde za jednotku času určitou plochou prostoru, jímž se světlo šíří. Zjednodušeně lze říci, že označuje světelnou energii, kterou zdroj vyzáří. Jedná se tedy o určitou formu výkonu. Světelný tok odpovídá zářivému toku ve wattech s tím, že bere do úvahy citlivost lidského oka na jednotlivé části barevného spektra. Světelný tok je fotometrická veličina charakterizující světelný výkon záření či jeho zdroje. Označuje se Φ a jednotkou je lumen (lm). Běžná žárovka o příkonu 100 W má světelný tok asi 1350 lm.

Svítivost

Svítivost je jedna ze základních jednotek soustavy SI. Svítivost udává prostorovou hustotu světelného toku zdroje v různých směrech. Lze ji určit pouze pro bodový zdroj, tj. pro zdroj, jehož rozměry jsou zanedbatelné v porovnání se vzdáleností kontrolního bodu od zdroje. Označuje se I a hlavní jednotkou je kandela (cd). Svítivost 1 cd přibližně odpovídá svítivosti plamenu svíčky; žárovka o elektrickém příkonu 100 W má svítivost zhruba 200 cd.

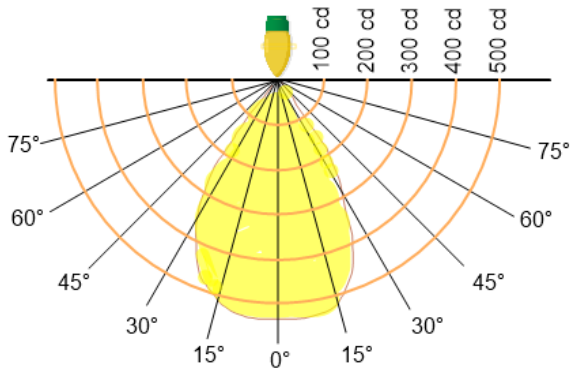
Svítivost zdroje v daném směru lze spočítat jako podíl světelného toku Φ vyzářeného zdrojem v tomto směru do prostorového úhlu Ω a velikosti tohoto prostorového úhlu.

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (cd)$$

Kde

I	svítivost (cd)
Φ	světelný tok (lm)
Ω	prostorový úhel (sr)

Názorně vyjadřuje svítivost tzv. diagram svítivosti, který ukazuje vyzařování světla světelného zdroje do různých směrů. Světelné zdroje obvykle nesvítí do všech směrů stejně. Směr vyzařování světla lze vhodně ovlivnit, např. automobilový reflektor svítí silně směrem dopředu, ale velmi málo do stran.



Obr. 45. Diagram svítivosti

Měření intenzity osvětlení

Diagram svítivosti vyjadřuje, jaká část světelného toku je daným zdrojem vyzařována do daného směru. Z výše uvedeného diagramu je zřejmé, že přímo ve směru osy (tj. v úhlu 0°) má zdroj svítivost přibližně 540 cd, do úhlu 15° je její svítivost zhruba 510 cd a do úhlu 30° přibližně 300 cd. Do úhlu většího, než je 35° na obě strany od osy žárovky, je její svítivost téměř nulová.

Osvětlení

Osvětlení je fotometrická veličina, která závisí na vzdálenosti osvětlené plochy od zdroje světla. Označuje se E a jednotkou je lux (lx). Osvětlení je závislé na části světelného toku Φ, který dopadá kolmo na plochu S. Lze tedy určit ze vztahu:

$$E = \frac{\Phi}{S} \quad (lx)$$

Kde

E	osvětlení (lx)
Φ	světelný tok (lm)
S	plocha (m^2)

S rostoucí vzdáleností osvětlené plochy od zdroje světla se osvětlení zmenšuje. Závisí i na úhlu α, pod kterým světlo na plochu dopadá. Nejlépe je osvětlená plocha, na kterou dopadají paprsky kolmo. Pokud do výše uvedeného vztahu zahrneme i směr dopadajících paprsků (z definice prostorového úhlu), můžeme odvodit vzorec pro výpočet osvětlení v následujícím tvaru:

$$E = \frac{I \cdot cos\alpha}{r^2} \quad (lx)$$

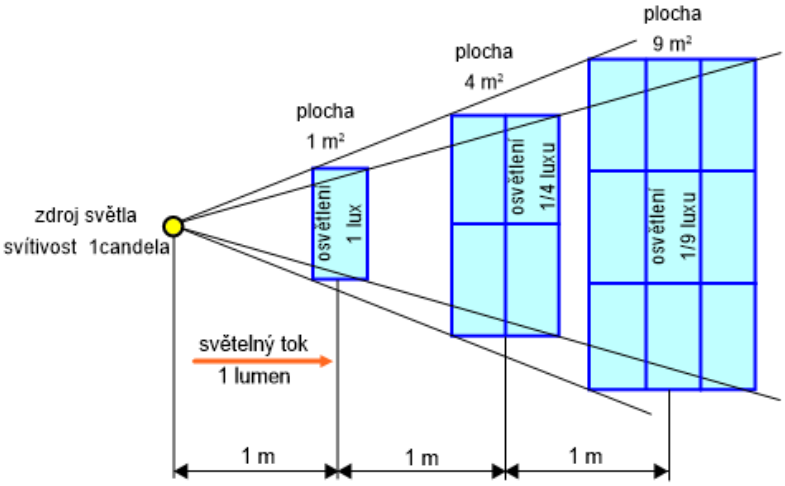
Kde

I	svítivost zdroje světla (cd)
α	úhel mezi dopadajícím paprskem světla a kolmicí na plochu dopadu (°)
r	vzdálenost zdroje od plochy (m)

Na tomto vztahu je založeno měření osvětlení, které je z hlediska potřeby nedůležitější fotometrickou veličinou. Dostatečné osvětlení patří k základním požadavkům na hygienu práce a jeho hodnota je stanovena normami.

Pro představu možno uvést hodnoty osvětlení: například osvětlení za úplňku má velikost asi 3 luxy, zatažená zimní obloha dává osvětlení 3 000 luxů, za slunečného letního dne je osvětlení až 120 000 luxů, ale 100 W žárovka ve vzdálenosti 2 m má intenzitu osvětlení jen 35 luxů.

Měření intenzity osvětlení



Obr. 46 Znázornění pojmu osvětlení (http://palobastl.sweb.cz/svetlo/svetlo.html#Intenzita_osvetleni)

5.2 Měření osvětlení

Příjemný psychofyziologický stav, při němž zrak plní své funkce s maximální účinností a při němž má člověk nejen pocit, že dobře vidí, ale cítí se také psychicky dobře, se označuje pojmem zraková pohoda.

Kvalitní osvětlení má významný vliv na výkon, zdraví a bezpečnost lidí. Účelem měření osvětlení je zajištění plnění všech požadavků na osvětlení prostor, které musí vyhovovat předepsaným hodnotám.

Metody měření světelných veličin lze rozdělit na vizuální (subjektivní metody), při kterých se jako indikátor využívá zrak, a na fyzikální (objektivní), při kterých se měří fyzikálními čidly.

Funkce lidského zraku jako přijímače záření při vizuálních měřeních se v objektivní fotometrii nahrazuje fyzikálními čidly a tím se vylučuje závislost měření na míře dokonalosti zraku pozorovatele.

Fyzikálními čidly mohou být emisní fotonky, fotoelektrické násobiče i fotorezistory. V praxi se nejčastěji používají fotočlánky, obvykle křemíkové nebo selénové. Měřicí fotočlánky musí vyhovovat množství podmínek. Zejména je třeba, aby se průběh křivky spektrální citlivosti fotočlánku co nejvíce shodoval s křivkou spektrální citlivosti oka standardního fotometrického pozorovatele CIE. Pokud tomu tak není, musí být naměřené hodnoty korigovány. Průměr čidla luxmetru nesmí být větší než 60 mm, doporučuje se průměr čidla do 30 mm.

Přístroje pro měření osvětlení se nazývají luxmetry. Existuje velký výběr vhodných luxmetrů od přesných profesionálních až po přístroje s údaji zcela informativními. Luxmetry se zařazují do čtyř tříd přesnosti, které se označují písmeny L, A, B, C. Uvedeným třídám odpovídají největší dovolené souhrnné chyby luxmetrů 2, 5, 10 a 20 %. Luxmetry třídy přesnosti L a A se využívají jako etalony a pro přesná laboratorní měření. Pro běžná provozní měření osvětlenosti postačují přístroje s třídou přesnosti B, popřípadě C.

Měření intenzity osvětlení

Profesionální přístroje umožňují navíc třeba i zaznamenávat a popisovat jednotlivé body měřící sítě, jakož i programovatelně odečítat a zaznamenávat hodnoty za daný časový úsek, např. při měření osvětlenosti venkovní vodorovné roviny. Přesnost a rozsah přístrojů je vysoká. Výsledky je možné vyhodnocovat s využitím firemních softwarů, včetně možnosti přehledného grafického znázornění.

Parametry luxmetrů se mohou časem měnit, proto je zapotřebí přístroje pravidelně kalibrovat. Například přístroje pro přesná měření nutno kalibrovat minimálně každé dva roky, přístroje určené k orientačnímu měření postačí kalibrovat v intervalu pěti let.

Obr. 47 Přesný laboratorní luxmetr PRC Krochmann Radiolux 111
(http://www.hellopro.fr/images/produit-2/6/7/7/luxmetres-luminancemtres-radiolux-111-2542776.jpg)

Malé kapesní luxmetry se používají pouze pro orientační měření. Podobné luxmetry slouží pro zjišťování potřebné doby osvitu při fotografování u expozimetrů fotoaparátů.

Obr. 48 Univerzální měřidlo DT 8820 s čidlem pro měření osvětlení

Měření intenzity osvětlení

Kromě hodnot osvětlení se zjišťuje i rovnoměrnost intenzity osvětlení v zorném poli, čili jak může být exponováno místo, kde se nachází např. pracovní předmět. Nadměrná nerovnoměrnost osvětlení (třeba nezacloněný zdroj světla v zorném poli) může vést k oslnění, které snižuje schopnost rozpoznávat detaily a způsobuje pocit nepohodlí. Rovnoměrnost intenzity osvětlení musí být rovněž zachována v čase, vzhledem k tomu, že oko potřebuje určitý čas pro svoje přizpůsobení se změnám. Důležitá je tedy úroveň pulsování či blikání světla.

5.2.1 Osvětlení vnitřních prostor

Osvětlení ve vnitřních prostorách se měří z důvodu ověření, zda byly splněny podmínky a hodnoty osvětlení podle projektu, zda jsou hodnoty osvětlení v souladu s platnými normami a pro porovnání různých řešení z hlediska hospodárnosti při dosažení podmínek zrakové pohody.

Podrobné podmínky pro měření osvětlení jsou přesně uvedeny v normách. České technické normy nejsou obecně závazné, avšak vládní nařízení č. 178/2001 Sb. mimo jiné uvádí: „Osvětlení pracovišť denním, umělým, popřípadě sdruženým osvětlením musí odpovídat nárokům vykonávané práce na zrakovou činnost, pohodu vidění a bezpečnost zaměstnanců v souladu s normovými hodnotami. Normovou hodnotou se rozumí konkrétní technický požadavek obsažený v příslušné české technické normě“. Problematiku osvětlení pracovišť nařízení tedy neřeší, ale odkazuje na platné ČSN, čímž se tyto normy stávají pro oblast hygienického posuzování závaznými.

Druh prostoru nebo činnosti	Osvětlení $\overline{E}$ (lx)	Poznámka
učebny	300	regulovatelné
posluchárny, laboratoře, dílny	500	regulovatelné
tabule	500	bez zrcadlových odrazů
kreslírny	750	
počítačové učebny	300	
chodby	100	
schodiště	150	
tělocvičny	300	
jídelny	200	

Tabulka 9 Příklady požadovaných hodnot osvětlení pro školní prostory

Měření intenzity osvětlení

Pro světlo a osvětlení platí závazná norma ČSN EN 12464-1 „Osvětlení pracovních prostorů- Část 1: Vnitřní pracovní prostory“. Základní termíny pro svítidla a osvětlení, pro jejich navrhování, výpočty a měření osvětlení vnitřních i venkovních prostor uvádí norma ČSN EN 12665 „Svítidla a osvětlení“. Důležitou normou je norma popisující metodiku měření a požadavky na měřicí přístroje včetně jejich přesnosti. Tou je ČSN 36 0011:2014 „Měření osvětlení prostorů“. Skládá se ze tří částí: Základního ustanovení, Měření denního osvětlení a Měření umělého osvětlení.

V zásadě existují tři základní druhy měření:

- přesné – pro výzkumné účely nebo pro náročné vnitřní prostory
- provozní – pro ověřování navržených a realizovaných podmínek a jejich dodržování
- orientační – ověřování základních podmínek zrakové pohody

Měřené veličiny

Při měření denního osvětlení a sdruženého osvětlení ve vnitřních prostorách se jako základní veličina měří a uvádí úroveň osvětlení ve vybraných kontrolních bodech ve vnitřním prostoru. Dále se měří osvětlenost venkovní nezacloněné vodorovné roviny. Z těchto hodnot se vyhodnocuje činitel denní osvětlenosti, tedy poměr vnitřní osvětlenosti k venkovní v procentech.

$$D = \frac{E}{E_h} \cdot 100 \quad (\%)$$

Kde

D činitel denní osvětlenosti (%)

E osvětlenost vnitřního kontrolního bodu (lx)

E_h osvětlenost venkovní vodorovné necloněné plochy (lx)

Z naměřených hodnot se určují další parametry jako rovnoměrnost osvětlení, maximální a minimální hodnota osvětlení a jiné. Obvykle se měří ještě jasy ploch v zorném poli uživatelů. Hodnoty jasů se udávají v cd/m^2 a měří se pomocí jasometrů. Jako doplňující se měří podle potřeby např. činitel odrazu důležitých povrchů, činitel znečištění, teplota v měřeném prostoru, různé úhly (směry pohledu, úhly stínění atd.) a další veličiny.

Kontrolní body

Osvětlení a jeho rozložení se měří v kontrolních bodech, rozmístěných v pravidelné pravoúhlé síti po srovnávací rovině v celém prostoru nebo na vymezených pracovních místech. Srovnávací rovina je obvykle vodorovná, ale může být i svislá nebo šikmá. Výška vodorovné srovnávací roviny je 0,85 m nad podlahou, není – li stanoveno jinak; např. u komunikací maximálně 0,2 m nad podlahou. Pro rozmístění kontrolních bodů platí přesná pravidla podle účelu, charakteru měření, velikosti prostor, možnosti umístění měřicího přístroje, charakteristických míst uživatelů atd. U dlouhých a úzkých ploch lze osvětlení měřit jen v řadě bodů, u velmi malých ploch uprostřed plochy. Pro přesná

Měření intenzity osvětlení

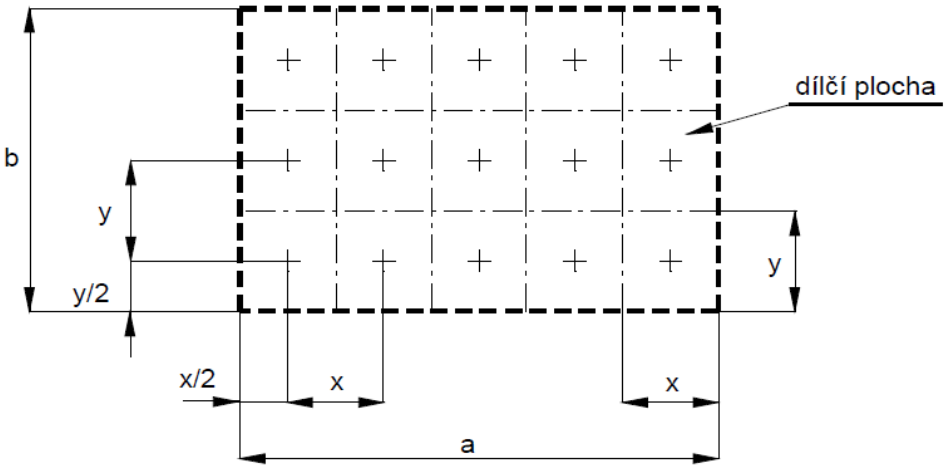
měření se doporučuje dodržet minimální rozteč kontrolních bodů podle vztahu:

$$p = 0{,}2 \cdot 5^{\log d} \ \ (m)$$

Kde

p maximální rozteč kontrolních bodů (p ≤ 10) (m)

d delší rozměr plochy (nebo pokud a/b ≥ 2, rozměr b) (m)



Obr. 49 Příklad rozložení kontrolních bodů

Vlastní měření

Před měřením nutno zkontrolovat všechny náležitosti měřicích přístrojů a měřených prostor. Osvětlovací soustavy se uvedou do stavu, který je běžný při užívání prostor. Kontroluje se ovlivnění měření cizím světlem, které není součástí měřeného osvětlení. Luxmetry musí být ve správné výšce a poloze (obvykle vodorovné). Měření nesmí ovlivňovat cizí osoby ani osoby provádějící měření např. stíněním, odrazem světla atd. Při přesném měření se postup opakuje z důvodu získání statistických souborů pro vyhodnocení.

Naměřené hodnoty se upraví do přehledných tabulek. Rozložení světla se doporučuje znázornit graficky např. pomocí izolux. Parametry určené měřením se porovnají s hodnotami požadovanými pro daný prostor nebo účel.

Protokol o měření

Protokol o měření by měl podle normy obsahovat zejména tyto údaje:

- označení objektu a vymezení prostoru, kde probíhalo měření
- datum a hodina měření
- účel měření a stupeň přesnosti
- údaje o měřicích přístrojích

Měření intenzity osvětlení

- údaje o způsobu měření
- rozměry nebo výkresy měřeného prostoru
- údaje o funkci a vlastnostech prostoru a prováděných činnostech
- údaje o osvětlovacích soustavách
- údaje o okolnostech ovlivňujících měření
- údaje o srovnávací rovině a kontrolních bodech
- naměřené a výsledné hodnoty včetně nejistot a porovnání s doporučenými hodnotami
- závěr, vyhodnocení, doporučení
- jména účastníků měření
- podpis osoby zodpovědné za měření

Při měření umělého vnitřního osvětlení je nutné přesně specifikovat druhy osvětlení, které se měří a vyloučit vliv denního osvětlení. Proto se měří v noci nebo při zatemnění. Při měření umělého osvětlení se osvětlenost vzhledem ke stálosti osvětlení vyhodnocuje pouze hodnotami osvětlenosti v luxech. Při vyhodnocování se bere ohled například i na nerovnoměrnost osvětlení.

Z množství a obsáhlosti norem a činností je patrno, že přesná měření fotometrických veličin jsou poměrně náročná jak na metodiku provedení, tak na přístrojové a softwarové vybavení. Vzhledem k tomu se naše školní případy měření a vyhodnocení osvětlení vnitřních prostor nebo pracovních míst pohybují pouze v úrovni hrubého informativního a orientačního měření.

6 Měření intenzity hluku

6.1 Základní pojmy

Vědní obor zabývající se zvukem je akustika. Zvukem obecně se nazývá podélné mechanické vlnění, které se od svého zdroje šíří v plynném, kapalném nebo tuhém pružném prostředí konečnou rychlostí. Vlnění může být příčné a podélné. Postupné vlnění podélné je takové, při němž částice pružného prostředí kmitají ve směru postupu vlny.

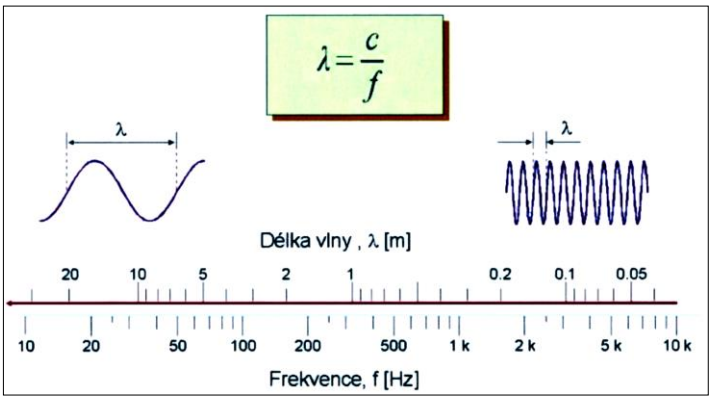
Zdrojem zvuku je chvění pružných těles, které se přenáší do okolního prostředí a vyvolává v něm zvukové vlnění. Zvuková vlna se pohybuje, avšak samotné prostředí, které ji přenáší, stojí na místě. Zvuk je přenášen silami částic, které v tomto prostředí pouze kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Ve srovnání s vlněním elektromagnetickým se tedy zvuk nemůže šířit ve vakuu. Vlněním se přenáší energie.

Množina bodů prostředí, v nichž částice kmitají se stejnou fází, se nazývá vlnoplocha. V homogenním prostředí se zvuk kolem bodového zdroje šíří v kulových vlnoplochách. Vzdálenost mezi dvěma sousedními vlnoplochami, tedy místy s maximálním zhuštěním částic, označujeme jako vlnovou délku. Pokud známe rychlost šíření vln v daném prostředí, můžeme psát:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (m)$$

Kde

λ	vlnová délka (m)
c	rychlost šíření vlny (v našem případě rychlost zvuku) (ms^{-1})
f	frekvence (kmitočet) vlnění (Hz)



Obr. 50 Závislost mezi vlnovou délkou a frekvencí [10]

Měření intenzity hluku

Rychlost zvuku je závislá na fyzikálních vlastnostech prostředí, ve kterém se zvukové vlny šíří. Orientační hodnoty rychlosti šíření zvukových vln v různých prostředích jsou uvedeny v tabulce 10. Přesná velikost rychlosti zvuku v daném prostředí bude záviset ještě na dalších vlastnostech; například na teplotě prostředí, u vzduchu na barometrickém tlaku, čistotě atd.

Látka	c [m/s]
vzduch	340
vodík	1300
voda	1500
led	3200
ocel	5900
hliník	6400

Tabulka 10 Orientační hodnoty rychlosti šíření zvuku v prostředí

Akustický tlak

Při šíření akustických vln ve vzduchu dochází k jeho periodickému stlačování a rozpínání. To je možno pozorovat jako kolísání tlaku vzduchu kolem hodnoty základní (referenční), kterou je barometrický tlak. Rozdíl mezi hodnotou referenční a celkovou hodnotou tlaku se nazývá akustický tlak (p) a je udáván v Pascalech (Pa). Akustický tlak je hlavní veličina, která ovlivňuje vnímání hlasitosti zvuku u člověka. Pro různé zvuky, od nočního ticha až po např. zvuk startujícího letadla jsou však hodnoty akustického tlaku velmi rozdílné. Liší se ve velkém rozmezí přibližně od 0,00002 Pa až do 100 Pa.

Hladina akustického tlaku

Jako vhodnější z hlediska matematického zpracovávání i praktického vnímání zvukových podnětů se jeví logaritmická veličina, a tou je tzv. hladina akustického tlaku L_p, která se udává v decibelech (dB). Hladina akustického tlaku se vypočítá pomocí vztahu:

$$L_p = 20 \cdot log \frac{p}{p_0} \quad (dB)$$

Kde

L_p hladina akustického tlaku (dB)

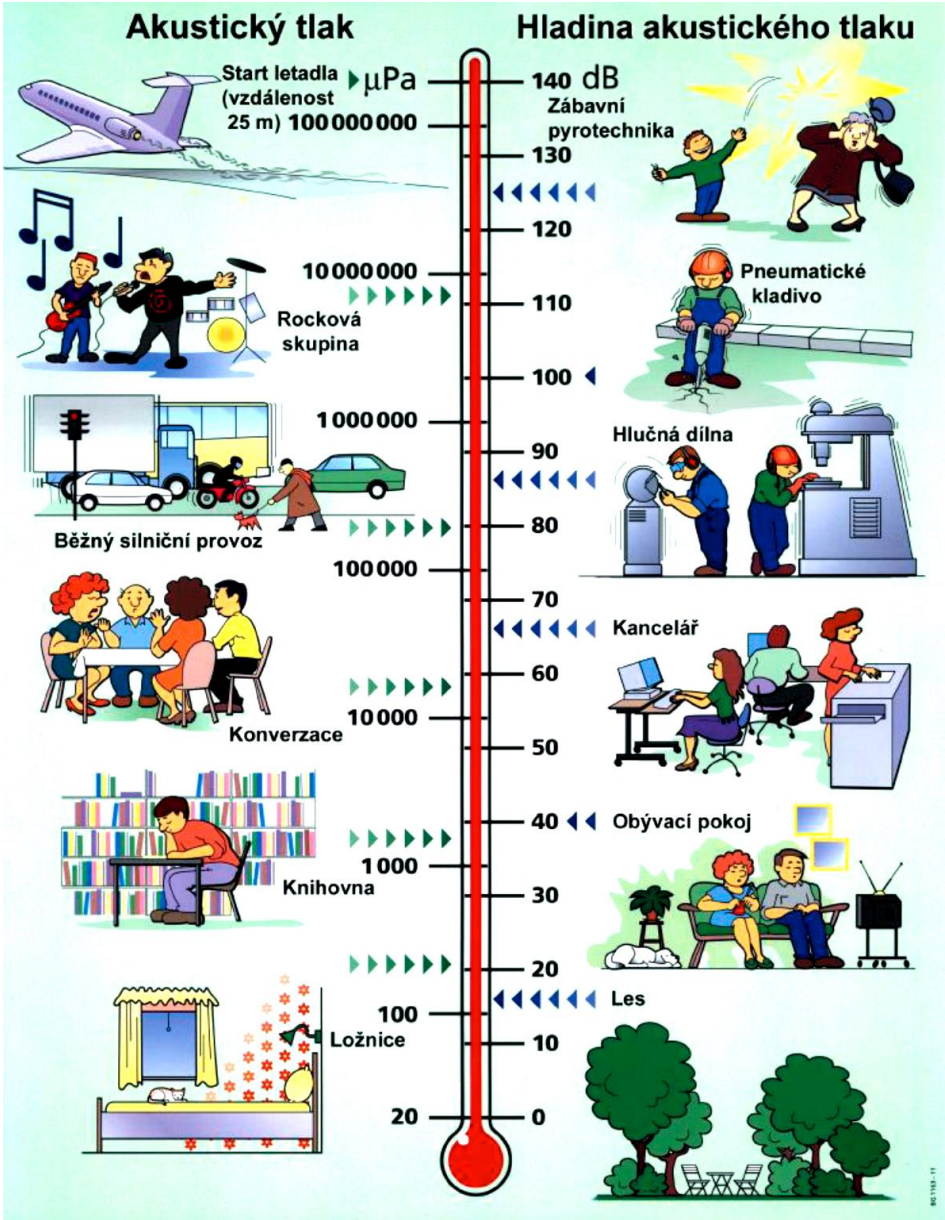
P akustický tlak (Pa)

P_0 referenční tlak (Pa)

Hodnota referenčního tlaku P_0 je $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Referenční hodnotu (0 dB) reprezentuje práh slyšitelnosti, což je nejmenší změna tlaku rozeznatelná lidským sluchem a odpovídá právě

akustickému tlaku $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Jelikož je akustický tlak projevem mechanického vlnění, musí se hladina akustického tlaku vždy uvádět ve vztahu ke kmitočtu. Naměřená hladina akustického tlaku závisí na vzdálenosti od zdroje a na vlastnostech přenosového prostředí.

Logaritmické vyjádření hladin je výhodné v tom, že má dostatečnou přesnost pro malé hodnoty a přesnost se snižuje až s jejich nárůstem. Pro vysoké hodnoty není ale přesnost až tolik důležitá, protože člověk je za zvláštních laboratorních podmínek schopen rozpoznat rozdíl hlasitosti asi 1 dB a to pouze v případě, že se jedná o jeden tón. V běžném prostředí rozeznává člověk rozdíl v hlasitosti až zhruba od 3 dB.



Obr. 51 Srovnání hodnot akustického tlaku (Pa) a hladin akustického tlaku (dB) [11]

Měření intenzity hluku

V souvislosti s logaritmickým vyjádřením hladin ale naopak zase musíme pamatovat na to, že je nelze aritmeticky sčítat. Například výsledná hladina od dvou stejných zdrojů nebude dvojnásobná, ale jen o 3 dB vyšší než jedna z nich. Pro představu 21 dB + 21 dB = 24 dB. Jinými slovy, pokud budu mít deset stejných zdrojů zvuku a pět z nich vypnu, nesníží se hladina zvuku na polovinu, ale pouze o 3 dB. V případě, že sčítané hladiny nejsou stejné, nemusí se při větším rozdílu mezi hladinami jejich součet na výšce větší z nich vůbec projevit, což je patrno z následující tabulky.

Rozdíl hlasitosti dvou zdrojů zvuku (dB)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Přírůstek k vyšší hladině (dB)	3	2,5	2	2	1,5	1	1	0,5	0,5	0

Tabulka 11 Sčítání nestejných hladin hlasitosti hluku
(http://www.acoustiproducts.com/en/quiet_pcs_noise.asp)

Hladina akustického výkonu

Postupující akustická vlna je svázána také s přenosem energie. Možno definovat, že množství energie, která projde za jednotku času určitou plochou, je akustický výkon P, udávaný ve wattech (W). Platí pro něj vztah

$$P = p \cdot v \cdot A \quad (W)$$

Kde

P akustický výkon (W)

p akustický tlak (Pa)

v akustická rychlost (ms^{-1})

A plocha kolmá na zvukový paprsek (m^2)

Pak podobně jako u akustického tlaku možno vyjádřit hladinu akustického výkonu vztahem:

$$L_W = 10 \cdot log \frac{P}{P_0} \quad (dB)$$

Kde

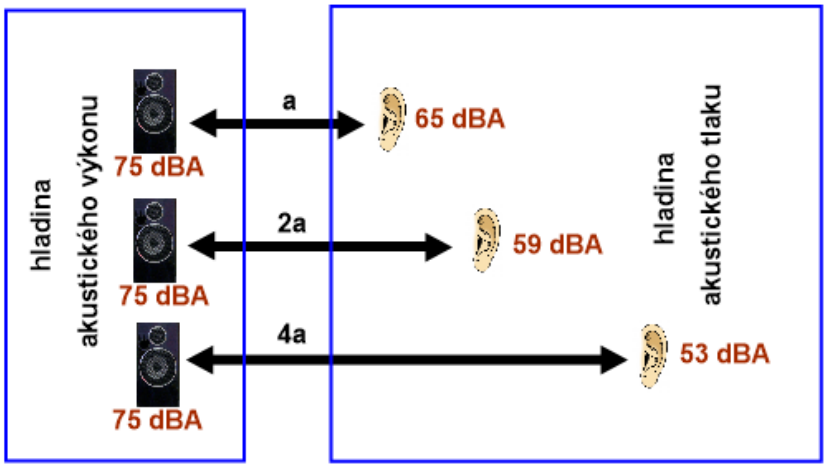
L_w hladina akustického výkonu (dB)

P sledovaný akustický výkon (W)

P_0 referenční akustický výkon ($P_0 = 1 \cdot 10^{-12}$ W) (W)

Specifickou vlastností hladiny akustického výkonu je, že nezávisí na poloze zařízení, okolních podmínkách a na vzdálenosti od měřeného bodu.

Měření intenzity hluku



Obr. 52 Vztah mezi hladinami akustického výkonu a akustického tlaku

Zákonitosti zvuku lze studovat ze dvou hledisek. V prvním případě lze popisovat zvuk pouze s využitím zákonů vlnění a cílem je pouze zpracování a hodnocení získaných veličin a jejich měření. V tomto případě se jedná o metodu objektivní.

Druhé hledisko se zabývá především účinky zvuku na lidský organizmus a jeho sluchové orgány. Vzhledem k individuálním vlastnostem lidského sluchu se jedná o metodu subjektivní, kdy se sleduje, jak fyzikálním akustickým veličinám odpovídá vnímání zvuku u člověka.

Intenzitě zvuku možno přiřadit pojem hlasitost, kmitočtu zvukových vln výšku tónu a frekvenčnímu rozložení zvukových vln barvu tónu. Protože vnímání zvuku je pro každého jedince odlišné, byly zavedeny jako normální průměrné hodnoty těchto veličin.

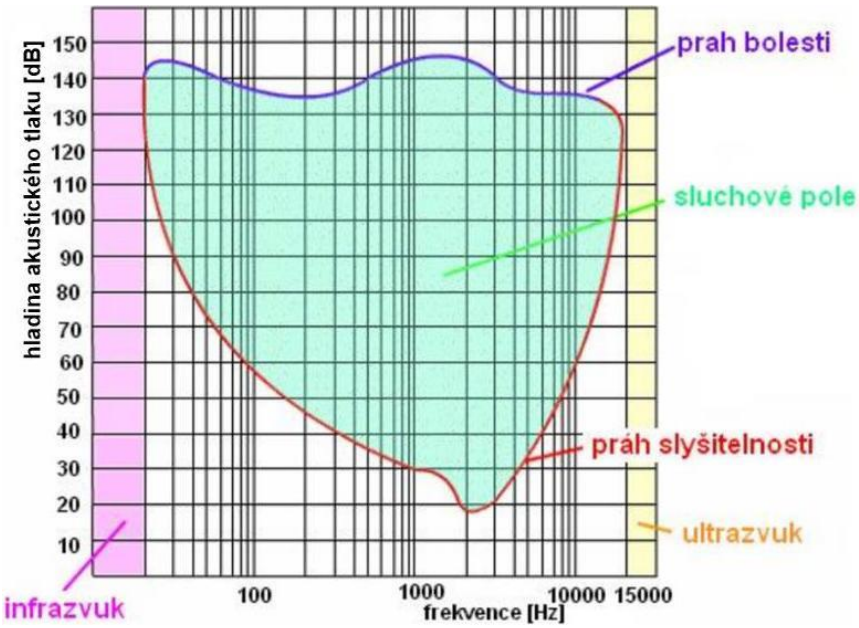
Lidské sluchové orgány nejsou schopny vnímat jakékoli vlnění, které se prostředím šíří. Člověk je schopen vnímat pouze takové vlny, jejichž frekvence je v rozmezí zhruba od 20 Hz do 20 kHz. Kmitání s frekvencí nižší, tedy pod 20 Hz se nazývá infrazvuk a kmity s frekvencí nad 20 kHz jsou označovány jako ultrazvuk.

Do oblasti infrazvuku je možno zařadit především otřesy a záchvěvy půdy, těžké dopravní prostředky vyvolávající kmity domů a půdy. Například zemětřesení způsobuje kmity o frekvenci nižší než 1 Hz. Infrazvuk působí na člověka nepříznivě.

Ultrazvuk, tedy mechanické kmitání o frekvenci vyšší než 20 kHz, lidské ucho také nevnímá. Ačkoli ultrazvuk neslyšíme, mají ultrazvukové kmity velký vliv na živé organismy a to jak nepříznivý, tak pro lidi třeba i užitečný. Ultrazvuku se využívá například v medicíně.

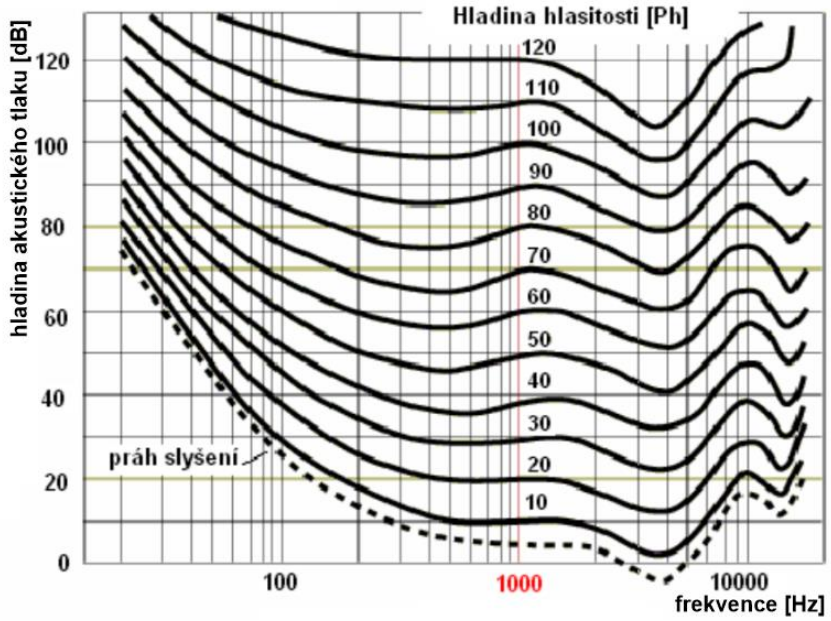
Schopnost vnímání zvuku závisí kromě frekvence zvukových vln také na hlasitosti zvuku. Rozmezí vnímaného zvuku se označuje jako tzv. sluchové pole. Člověk může vnímat všechny zvuky, které leží v rozmezí mezi tzv. prahem slyšitelnosti, kdy člověk začíná zvuk registrovat a prahem bolesti, kdy je hlasitost již tak vysoká, že může působit bolest a případně vést k poškození sluchu nebo psychiky člověka.

Měření intenzity hluku



Obr. 53 Sluchové pole [12]

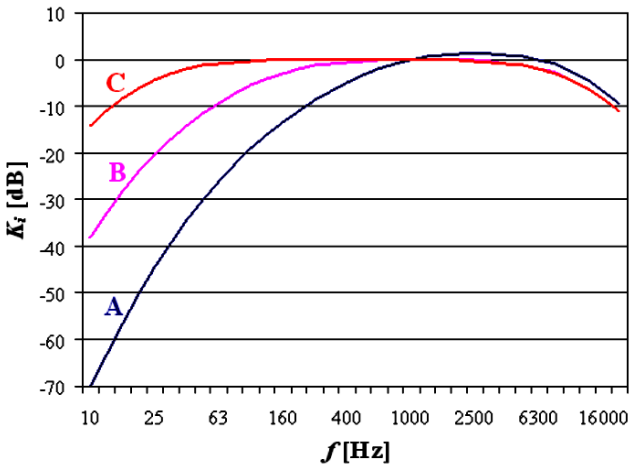
Intenzita sluchových vjemů neodpovídá přesně fyzikálním parametrům. Míra podráždění sluchu, kterou vnímáme jako hlasitost, je opět závislá na frekvenci vlnění. Jako jednotka hlasitosti byl zaveden fón (Ph). Z grafu na obr. 54 vyplývá, že subjektivní vnímání hlasitosti, udávané ve fónech, odpovídá fyzikálním hodnotám intenzity zvuku udávaným v decibelech přesně pouze při frekvenci 1000 Hz. Pro frekvence nižší i vyšší se tyto hodnoty rozcházejí. Tento graf ale platí pouze pro jednotlivé frekvence, pro zvuky obecné je závislost poněkud složitější.



Obr. 54 Vnímání hlasitosti zvuku v závislosti na frekvenci [10]

Měření intenzity hluku

Z uvedeného je zřejmé, že lidský sluch má nestejnou citlivost pro různé kmitočty. Již práh slyšení je odlišný pro různé kmitočty. Při vnímání zvuku tak dochází ke zkreslení, jehož charakter navíc závisí na velikosti akustického tlaku přijímaného zvuku. Lidský sluch je nejcitlivější právě v oblasti okolo 1000 Hz, což zhruba odpovídá průměrné hodnotě kmitočtu lidské řeči. Z důvodu přiblížení se k těmto vlastnostem sluchového orgánu jsou používány při měření fyzikálních veličin zvuku váhové filtry, které v souladu s citlivostí lidského sluchu upravují naměřené hodnoty měřicího přístroje. Filtry se označují písmeny velké abecedy. Nejpoužívanější je filtr A, který má hodnoty inverzní ke křivce stejné hlasitosti pro hladinu 40 dB. Zvukoměr ke každé skutečně změřené hladině zvuku připočte příslušnou korekci KA a přepočítá tím hladinu zvuku tak, jak ji vnímá lidský sluch. Takto vzniklá veličina se označuje symbolem A. Například LA [dB] se čte jako hladina akustického tlaku A. Velké písmeno A je součástí názvu této veličiny. Váhové korekce jsou dány normou. Na obr. 55 jsou uvedeny frekvenční závislosti korekcí filtrů A, B a C. Při frekvenci 1000 Hz jsou korekce v podstatě nulové.



Obr. 55 Průběhy váhových korekcí filtrů A, B a C [10]

6.2 Měření hluku

Měření hluku je prováděno v zásadě ze dvou důvodů. Jednak je to měření, kterým se zjišťuje hluk výrobků vznikající při jejich činnosti a používání. Druhým důvodem měření hluku je vliv hluku na lidské zdraví, přičemž významným faktorem, kromě intenzity hluku, je doba, po kterou je člověk účinkům hluku vystaven.

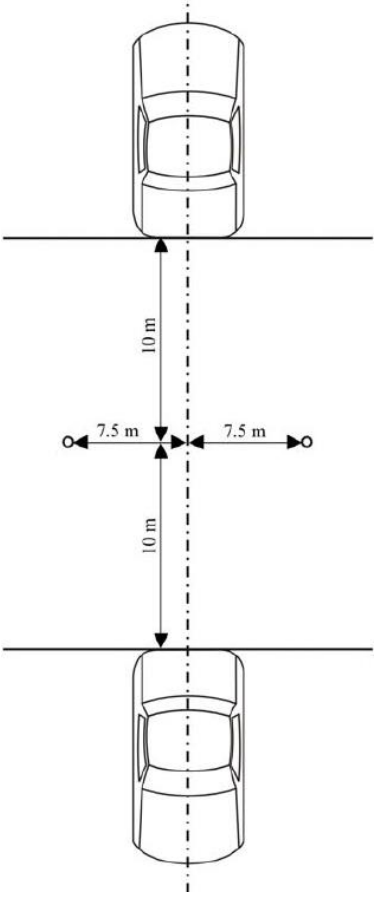
6.2.1 Hluk vznikající při činnosti a používání výrobků

Měření se může provádět z důvodů vědeckých, výzkumných nebo vývojových. Požadavkům na výsledky měření bude odpovídat i metodika měření. Lze tak zjišťovat například montážní prvky strojů, které vykazují lokálně nejvyšší hlukové emise. Je možno zpracovávat hlukové mapy s plochami o stejné intenzitě vyzařovaného hluku atd.

Měření intenzity hluku

Obr. 56 Měření a vyhodnocování hluku při výstupní kontrole nápravy z vozidla T 810

K tomuto druhu měření hluku patří třeba také měření hluku motorových vozidel (Předpis č.51 EHK/OSN) z důvodu plnění hlukových emisí podle mezinárodních platných předpisů a další obdobné případy. Pro tato měření platí podrobné speciální předpisy, které upřesňují podmínky měření a jeho vyhodnocování.

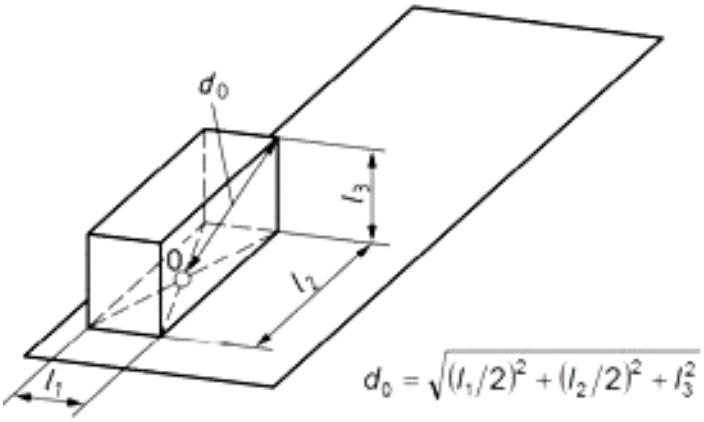


Obr. 57 Příklad předpisu pro umístění mikrofonů při měření hluku vozidla za jízdy

Měření intenzity hluku

Zdroje hluku mohou být zkoumány ve speciálních laboratorních podmínkách v tzv. bezodrazovém prostředí nebo poloodrazovém prostředí nebo i v podmínkách praktického provozního umístění.

Tato měření popisuje ČSN EN ISO 3744. Provozní měření se provádí v místnosti nebo venkovní ploše izolované od hluku pozadí, ve které může být použita korekce na prostředí a kde bude minimální vliv podmínek prostředí, jako jsou elektrická a magnetická pole, meteorologické podmínky atd. Odrazivé roviny musí být nejméně o 0,5 m větší, než jsou průměty rovin měřicích. Zkoušený zdroj hluku se umisťuje a upevňuje na odrazivou rovinu tak, jak odpovídá obvyklému použití. Zdroj by se měl zkoušet za podmínek, které jsou reprodukovatelné a představují nejhlučnější provoz při běžném používání zdroje. Pokud existuje zkušební předpis, je nutno jej dodržet. Pokud předpis neexistuje, zvolí se zkušební režimy popsané ve výše uvedené normě (např. plné zatížení, charakteristický pracovní cyklus atd.). Hlukoměry se umísťují na měřicí plochu. Měřicí plochy jsou rovnoběžné s plochami referenční obalové plochy, která je určena povrchem nejmenšího hypotetického kvádru, který přesně uzavírá zkoušený zdroj. Referenční obalové plochy mohou mít také tvary polokoule válce a jiné. Měřicí plochy jsou vzdáleny od referenčních o hodnotu závislou na rozměru d_0.



Obr. 58 Referenční obalová plocha na jedné odrazové rovině

Pro určení vzdálenosti měřicích ploch od referenčního kvádru norma předepisuje výpočtové vztahy. Musí však být nejméně 0,25 m, raději více než 1 m.

Mikrofony se umísťují rovnoměrně po měřicí ploše podle v normě uvedeného předpisu. Minimální počet poloh mikrofonu je 9. Mikrofony musí být orientovány tak, aby referenční směr mikrofonu směřoval k počátku souřadnic referenční obalové plochy.

Pro všechny polohy mikrofonu se měří hladina časově průměrovaného akustického tlaku a z nich se počítá střední hodnota časově průměrovaného akustického tlaku $L'_{p(ST)}$ v dB. Z těchto hodnot lze pak určovat další potřebné srovnávací hodnoty a kriteria, jako hladiny časově průměrovaného akustického tlaku na měřicí ploše, hladiny akustického výkonu L_W, hladiny akustické energie atd. Důležité jsou hladiny akustického výkonu A (L_{WA}) a akustické energie A (L_{JA}). Pro všechny hodnoty se počítají obvyklé nejistoty.

Měření intenzity hluku

O měření se zpracovává protokol, ve kterém musí být uvedeny údaje:

a) o zkoušeném zdroji hluku

- popis zkoušeného zdroje (výrobce, typ, rozměry, sériová čísla, rok výroby,…)
- popis pomocných zařízení
- podmínky provozu při zkoušce
- podmínky upevnění
- poloha zdroje ve zkušebním prostředí

b) O zkušebním prostředí

- popis budovy, konstrukce, úprava zdí, podlah, náčrtky umístění zkoušeného zdroje atd.
- v případě vnějšího prostředí popis terénu, odrazivé plochy atd.
- teplotu a tlak vzduchu

c) O přístrojovém vybavení

- použité měřicí přístroje (typ, název výr. číslo, výrobce
- údaje o kalibraci

d) O akustických datech

- rozměry a tvar referenční a měřicí plochy
- polohy mikrofonu
- všechny výsledné naměřené a vypočítané hodnoty včetně korekcí a nejistot
- datum a dobu měření

K tomuto typu měření patří hlavně kontrolní měření, která mají ověřit shodu parametrů výrobků vyráběných sériově s výrobky prototypovými, které byly schváleny technickými normami.

6.2.2 Určení expozice hluku

Jak již bylo uvedeno, je zřejmé, že zvuk může mít na člověka nežádoucí účinky. Zvuk, který vyvolá nepříjemný, nebo rušivý vjem na lidský sluchový orgán, nazýváme hluk. Pro účely zákona je v § 30, odstavec 2 zákona č. 471/2005 Sb. o ochraně veřejného zdraví hluk definován takto: „Hlukem se rozumí zvuk, který může být škodlivý pro zdraví a jehož hygienický limit stanoví prováděcí právní předpis“. Nežádoucí zvuky přitom nemusí být pouze zvuky o vysoké intenzitě, ale záleží na konkrétních podmínkách a situaci, ve které se člověk právě nachází. Například při náročné duševní práci nebo při spánku. Při dlouhodobém působení hluk způsobuje únavu, stres a může mít vliv na zvýšený výskyt různých onemocnění.

Měření intenzity hluku

Při posuzování škodlivosti hluku je kromě hlasitosti dalším významným faktorem doba, po kterou je člověk účinkům hluku vystaven. Pro tyto účely se stanovují časově průměrované akustické veličiny. Délka časového úseku sledování a měření je závislá na metodice a způsobu provádění zkoušky hluku.

Jako příklad takovéhoto výpočtu lze uvést výpočet hladiny časově průměrovaného akustického tlaku.

$$L_{p,T} = 10 \cdot log \left[\frac{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt}{p_0^2} \right] \quad (dB)$$

Kde

$L_{p,T}$	hladina časově průměrovaného akustického tlaku (dB)
T	časový interval měření (s)
p	měřená hodnota akustického tlaku proměnná v čase t (Pa)
p_0	referenční hodnota akustického tlaku (Pa)

Vyhodnocování těchto matematických vztahů je poměrně složité, ale může být integrováno přímo v používaných měřicích přístrojích stejně jako celá řada dalších vyhodnocovacích a statistických funkcí. Například vyhledávání okamžitých maximálních nebo minimálních měřených hodnot, časový záznam měření atd. Tímto způsobem se celý proces měření a vyhodnocování zrychluje a zjednodušuje.

Obr. 59 Profesionální hlukoměr Brüel & Kjær typ 2231

Podrobný technický popis měření tohoto hluku je dán normou ČSN EN ISO 9612, která specifikuje metodu měření expozice zaměstnanců hlukem v pracovním prostředí. V této mezinárodní normě jsou specifikovány různé strategie měření, přičemž je popsán celý měřicí postup, včetně pozorování a analýzy podmínek expozice hluku tak, aby mohla být zajištěna kvalita měření. Norma podrobně specifikuje všechny podmínky měření, např. pokud není poloha hlavy na pracovním místě dobře stanovitelná, měří se u stojícího zaměstnance ve výšce 1,55 ± 0,075 m nad podlahou, na níž zaměstnanec stojí.

Měření intenzity hluku

Obr. 60 Měření hlukové expozice na pracovišti

Vlastní měření se může provádět buď pomocí integrujících - průměrujících zvukoměrů, nebo osobních zvukových expozimetrů. Všechny zvukoměry musí odpovídat předepsaným požadavkům a musí být periodicky kalibrovány.

Metodiku, postup a vyhodnocení měření hlukové expozice lze rozdělit do několika kroků:

- analýza práce – podle prováděných činností, podle prováděné práce na daném pracovišti, podle významných hlukových událostí, podle doby expozice atd.
- volba strategie měření – měření založené na jednotlivé pracovní úloze, nebo měření založené na profesi, anebo měření prováděné nepřetržitě po celý pracovní den
- vlastní měření – výběr měřicího zařízení, poloha zvukoměru při měření atd.
- zpracování chyb a nejistot – vliv kolísání denní práce, vliv polohy mikrofonu, vliv větru, vliv tření o oděv, netypické zdroje zvuku (nárazy na mikrofon) atd.
- výpočet a prezentace výsledků a nejistoty – zpráva o měření sumarizuje veškeré údaje podle výše uvedených kroků

Při posuzování vlivu hlukové expozice je třeba se řídit platnými hygienickými předpisy. Nejdůležitějšími legislativními normami v tomto směru jsou:

- Zákon č. 258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví, který mj. definuje základní právní rámec problému, pojmy a kompetence
- Nařízení vlády č. 148/2006 Sb., o ochraně před nepříznivými účinky hluku, které mj. určuje přípustné hygienické limity
- Ve školství se uplatňuje Vyhláška č.410/2005 Sb. o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých ve znění vyhlášky č. 343/2009 Sb.

Měření intenzity hluku

pracoviště	hluk	přípustná hodnota hladiny akustického tlaku
obecně	ustálený a proměnný	LAeq, 8h = 85 dB
	impulsní	LAeq, 8h = 85 dB LCpeak = 140dB
	vysokofrekvenční f ≥ 8 kHz.	Lteq,8h = 75 dB
	ultrazvuk	Lteq,8h = 105 dB
	nízkofrekvenční a infrazvuk	LGeq,8h = 116 dB
s vyššími nároky na pozornost a soustředění *	ustálený a proměnný	LAeq, 8h = 50 dB
výroba a skladování (mimo*)	ustálený a proměnný způsobený větráním či vytápěním	LAeq, 8h = 70 dB

Tabulka 12 Orientační hodnoty hygienických limitů expozice hluku

Hluková měření jsou obecně náročná na vybavení, dodržování podmínek měření a vyhodnocování. Pro měření ve školních podmínkách je postačující pouze orientační měření, které odpovídá požadavkům a možnostem školy.

Seznam obrázků

Obr. 1 Znázornění jednotky rovinného úhlu ... 8
Obr. 2 Znázornění pojmu "prostorový úhel" (http://cs.wikipedia.org/wiki/Prostorový úhel) ... 8
Obr. 3 Znázornění různých označení tlaku ... 12
Obr. 4 Schéma a charakteristika pístového manometru ... 15
Obr. 5 Princip zvonového manometru ... 16
Obr. 6 Schéma a pohled na U manometr ... 17
Obr. 7 Nádobkový manometr - barometr ... 18
Obr. 8 Nádobkový manometr ... 18
Obr. 9 Princip mikromanometru ... 20
Obr. 10 Mikromanometr ... 21
Obr. 11 Schéma a pohled zezadu na demontovaný trubicový manometr [1] ... 22
Obr. 12 Schéma membránového tlakoměru [1] ... 23
Obr. 13 Schémata krabicových tlakoměrů - s jednou krabicí (A) a se třemi krabicemi (B) [1] ... 23
Obr. 14 Schémata vlnovcových tlakoměrů ... 24
Obr. 15 Vliv tvaru a umístění tlakové sondy [1] ... 25
Obr. 17 Schéma Prandtlovy trubice ... 26
Obr. 16 Detail sondy Prandtlovy trubice ... 26
Obr. 18 Porovnání teplotních stupnic ... 28
Obr. 19 Časová konstanta teploměru ... 30
Obr. 20 Orientační rozsahy měření základních typů teploměrů ... 31
Obr. 21 Obalový teploměr ... 32
Obr. 22 Tyčinkový teploměr ... 33
Obr. 23 Teploměry s potlačenou stupnicí [1] ... 33
Obr. 24 Sixův maximo - minimální teploměr [1] ... 34
Obr. 25 Princip funkce tyčového teploměru [1] ... 36
Obr. 26 Tvary pásků bimetalických teploměrů [1] ... 36
Obr. 27 Princip tlakového teploměru [1] ... 38
Obr. 28 Možné provedení odporového čidla Pt 100 ... 41
Obr. 29 Příklad zapojení můstku pro měření odporu odporového teploměru ... 42
Obr. 30 Schéma zapojení termočlánku ... 43
Obr. 31 Možnosti vodivého spojení termočlánkových drátů - pájení, svaření, zkroucení a trubičkové spojení [1] ... 44
Obr. 32 Termočlánková čidla ... 44
Obr. 33 Provozní termočlánkové měřidlo ... 44
Obr. 34 Segerovy jehlany [1] ... 46
Obr. 35 Schéma jasového pyrometru ... 47
Obr. 36 Schéma jiného jasového pyrometru ... 48
Obr. 37 Princip termoelektrického pyrometru ... 49

Seznam obrázků

Obr. 38 Pyrometr DIT - 500 50
Obr. 39 Příklady použití termovize (http://www.termovize.com/prumyslove-objekty-termosnimky) 52
Obr. 40 Měřidlo relativní vlhkosti a teploty vzduchu Testo 610 53
Obr. 41 Psychrometr 56
Obr 42 Vlasový vlhkoměr (http://cs.wikipedia.org/wiki/Vlhkoměr) 58
Obr. 43 Spektrální citlivost oka (http://cs.wikipedia.org/wiki/Světlo) 60
Obr. 44 Znázornění pojmu "prostorový úhel" (http://cs.wikipedia.org/wiki/Prostorový úhel) 60
Obr. 45. Diagram svítivosti 61
Obr. 46 Znázornění pojmu osvětlení (http://palobastl.sweb.cz/svetlo/svetlo.html#Intenzita_osvetleni) 63
Obr. 47 Přesný laboratorní luxmetr PRC Krochmann Radiolux 111 (http://www.hellopro.fr/images/produit-2/6/7/7/luxmetres-luminancemtres-radiolux-111-2542776.jpg) 64
Obr. 48 Univerzální měřidlo DT 8820 s čidlem pro měření osvětlení 64
Obr. 49 Příklad rozložení kontrolních bodů 67
Obr. 50 Závislost mezi vlnovou délkou a frekvencí [10] 69
Obr. 51 Srovnání hodnot akustického tlaku (Pa) a hladin akustického tlaku (dB) [11] 71
Obr. 52 Vztah mezi hladinami akustického výkonu a akustického tlaku 73
Obr. 53 Sluchové pole [12] 74
Obr. 54 Vnímání hlasitosti zvuku v závislosti na frekvenci [10] 74
Obr. 55 Průběhy váhových korekcí filtrů A, B a C [10] 75
Obr. 56 Měření a vyhodnocování hluku při výstupní kontrole nápravy z vozidla T 810 76
Obr. 57 Příklad předpisu pro umístění mikrofonů při měření hluku vozidla za jízdy 76
Obr. 58 Referenční obalová plocha na jedné odrazové rovině 77
Obr. 59 Profesionální hlukoměr Brüel & Kjær typ 2231 79
Obr. 60 Měření hlukové expozice na pracovišti 80

Seznam tabulek

Tabulka 1 Základní jednotky SI 7
Tabulka 2 Doplňkové jednotky 8
Tabulka 3 Některé odvozené jednotky 9
Tabulka 4 Přehled předpon pro násobné a dílčí jednotky 10
Tabulka 5 Pevné definiční body teplotní stupnice ITS-90 [9] 29
Tabulka 6 Teplotní roztažnost některých materiálů 35
Tabulka 7 Maximální absolutní vlhkost vzduchu v závislosti na teplotě 55
Tabulka 8 Psychrometrická tabulka pro určení relativní vlhkosti vzduchu 57
Tabulka 9 Příklady požadovaných hodnot osvětlení pro školní prostory 65
Tabulka 10 Orientační hodnoty rychlosti šíření zvuku v prostředí 70
Tabulka 11 Sčítání nestejných hladin hlasitosti hluku (http://www.acoustiproducts.com/en/quiet_pcs_noise.asp) 72
Tabulka 12 Orientační hodnoty hygienických limitů expozice hluku 81

Seznam podkladů, literatury a norem

[1] VYSLOUŽIL, Zdeněk a Jaroslav ZELKO. *Meranie v strojárstve.* Bratislava: SVTL, 1962.

[2] KAPLER, Ivan. *Míry, jednotky, veličiny*. Ostrava: Repronis, 2000. ISBN 80-861-2243-3.

[3] JENČÍK, Josef. *Technická měření ve strojnictví*. Praha: SNTL, 1982.

[4] JENČÍK, Josef a Jaromír VOLF. *Technická měření*. Praha: ČVUT, 2000.

[5] NOVÝ, R. *Hluk a chvění*. Praha: 1995. ISBN 80-010-1306-5.

[6] CHUDÝ, Vladimír. *Meranie technických veličín*. Bratislava: STU, 1999. ISBN 80-227-1275-2.

[7] SLÁDEK, Z., F. VDOLEČEK. *Technická měření*. Brno: VUT, 1992.

[8] ŠINDELÁŘ, V., F. KRUPKA. *Měření teploty*. Praha: Práce, 1955.

[9] BOROVIČKA, M. *Medzinárodná teplotná stupnica. 1990 (ITS 90)*. Příloha časopisu Československá standardizace, č. 7, 1990.

[10] KOLEKTIV AUTORŮ. *EVROPSKÝ TÝDEN 2005: NEBEZPEČNÝ HLUK*. Praha: VÚBP, 2005. ISBN 80-903604-8-3.

[11] http://www.audified.com/projekt/vavcjamu/page58/page69/files/screen-shot-2012-08-17-at-9.23.51.png

[12] http://www.greif.cz/download/its075-zaklady-akustiky-prirucka-pro-zacatecniky.pdf

ČSN ISO 5128:2002	Akustika – Měření vnitřního hluku motorových vozidel.
ČSN ISO 1996-1:2004	Akustika – Popis, měření a hodnocení hluku prostředí – Část 1: Základní veličiny a postupy pro hodnocení.
ČSN ISO 1996-2 :2009	Akustika - Popis, měření a posuzování hluku prostředí - Část 2: Určování hladin hluku prostředí.
ČSN EN ISO 3745 :2012	Akustika – Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku – Přesné metody pro bezodrazové a poloodrazové místnosti.
ČSN EN ISO 3744 :2011	Akustika – Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku – Technická metoda pro přibližně volné pole nad odrazivou rovinou.
ČSN EN ISO 9612 :2010	Akustika – Určení expozice hluku na pracovišti – Technická metoda.
ČSN EN ISO 3746 :2011	Akustika – Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku – Provozní metoda s měřicí obalovou plochou nad odrazivou rovinou.
ČSN ISO 6394 :2013	Stroje pro zemní práce - Určování hladiny emisního akustického tlaku na stanovišti obsluhy - Podmínky stacionární zkoušky.
ČSN ISO 6395 :2013	Stroje pro zemní práce - Určování hladiny akustického výkonu - Podmínky dynamické zkoušky.
ČSN ISO 6396 :2013	Stroje pro zemní práce - Určování hladiny emisního akustického tlaku na stanovišti obsluhy - Podmínky dynamické zkoušky.

Seznam podkladů, literatury a norem

ČSN ISO 7574-2 :1993	Statistické metody pro určení a ověření stanovených hodnot emise hluku strojů a zařízení – Část 2: Metody pro jednotlivé stroje.
ČSN EN ISO 80000-8 :2008	Veličiny a jednotky – Část 8: Akustika.
ČSN EN ISO 11201 :2010	Akustika – Hluk vyzařovaný stroji a zařízeními – Určování hladin emisního akustického tlaku na stanovišti obsluhy a dalších stanovených místech v přibližně volném poli nad odrazivou rovinou se zanedbatelnými korekcemi na prostředí.
ČSN EN ISO 11202 :2010	Hluk vyzařovaný stroji a zařízeními – Určování hladin emisního akustického tlaku na stanovišti obsluhy a dalších stanovených místech s použitím přibližných korekcí na prostředí.
ČSN EN ISO 11203 :2010	Akustika - Hluk vyzařovaný stroji a zařízeními - Určování hladin emisního akustického tlaku na stanovišti obsluhy a dalších stanovených místech z hladin akustického výkonu.
ČSN ISO 11094 :1197	Akustika – Zkušební předpis pro měření hluku šířeného vzduchem, vyzařovaného motorovými žacími stroji, žacími a zahradními traktory, profesionálními žacími stroji a žacími a zahradními traktory s příslušenstvím.
NV 272 – 2011	Nařízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací
NV 9 -2002	Nařízení vlády, kterým se stanoví technické požadavky na výrobky z hlediska emisí hluku.
Zákon 258/2000 Sb.	Zákon o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů (se změnami 254/2001,…,333/2012 Sb.)
Předpis č. 51 EHK/OSN.	Jednotná ustanovení o schvalování motorových vozidel, která mají nejméně čtyři kola, z hlediska jejich emisí. Dodatek č. 50: Předpis č. 51, 2007.