

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ODBOR TERMOMECHANIKY A TECHNIKY PROSTŘEDÍ EÚ

Doc. Ing. Eva Janotková, CSc.

# TECHNIKA PROSTŘEDÍ

## 1. část



Investice do rozvoje vzdělávání

---

© Eva Janotková, 2014

1. upravené vydání studijního materiálu vydaného v roce 2011, který byl vypracován v rámci projektu CZ.1.07/2.2.00/15.0165 Absolvent energetik připraven pro trh práce

## PŘEDMLUVA

Technika prostředí je samostatný vědní obor, zaměřený na tvorbu a ochranu životního prostředí vnitřního i vnějšího. S rozvojem poznatků a technických možností jsou kladeny stále vyšší nároky na kvalitu prostředí a na zařízení pro úpravu prostředí, což se projevuje i v legislativní oblasti tvorbou mnoha zákonných opatření, hygienických směrnic a předpisů, které musí být v souladu s obdobnými materiály EU.

Studijní materiál je určen pro předmět Technika prostředí, jehož náplň je zaměřena na prostředí vnitřní, tj. v interiérech budov. Studijní materiál je věnován hodnocení stavu vnitřního prostředí, ale především pak technickým prostředkům k zajištění vhodného vnitřního prostředí, a to jak prostředkům k vytvoření komfortu v obytných budovách a přijatelného mikroklimatu v průmyslových stavbách, tak prostředkům k vytvoření vhodného mikroklimatu podle požadavků provozované technologie. Jedná se zejména o technické prostředky, které zajišťují tepelný stav prostředí a upravují jakost vzduchu, ke kterým patří zařízení větrací, klimatizační a vytápěcí. Protože uvedená zařízení bývají nežádoucími zdroji hluku, je do předmětu Technika prostředí zařazena i problematika hluku a vibrací a prostředky k jejich snižování.

Text je členěn do dvou částí. Tato 1. část studijního materiálu Technika prostředí obsahuje kapitoly Životní prostředí, Vnitřní prostředí – mikroklima, Větrání a Zařízení pro odlučování znečišťujících látek. 2. část studijního materiálu Technika prostředí pak obsahuje kapitoly Klimatizace, Vytápění a Hluk.

Technika prostředí využívá poznatky základních vědních disciplín, jakými jsou fyzika, termodynamika, přenos tepla a mechanika tekutin.

Předložený text je určen především pro posluchače strojních fakult vysokých škol technických.

Proti původnímu vydání z roku 2011 jsou v tomto vydání provedeny úpravy zejména v oblasti současně platné legislativy a platných norem.

1. upravené vydání studijního materiálu Technika prostředí 1. a 2. část je dostupné z: <http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/technika-prostredi/technika-prostredi>.

# OBSAH

<b>1. ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ</b>	6
<b>2. VNITŘNÍ PROSTŘEDÍ – MIKROKLIMA</b>	8
<b>2.1 TEPELNÁ POHODA PROSTŘEDÍ</b>	9
2.1.1 Tepelná rovnováha	10
2.1.2 Rovnice tepelné pohody	13
2.1.3 Diagramy tepelné pohody	14
2.1.4 Měření veličin určujících tepelný stav prostředí	15
2.1.5 Hodnocení tepelného stavu a tepelné pohody prostředí	18
<b>2.2 ČISTOTA VZDUCHU V MÍSTNOSTECH</b>	21
2.2.1 Hygienické limity látek v ovzduší	22
2.2.2 Účinek škodlivin na lidský organismus	22
<b>2.3 ELEKTROIONTOVÉ MIKROKLIMA</b>	23
<b>3. VĚTRÁNÍ</b>	25
<b>3.1 ROZDĚLENÍ VĚTRÁNÍ</b>	25
<b>3.2 VÝPOČET VÝMĚNY VZDUCHU PŘI VĚTRÁNÍ</b>	26
<b>3.3 PROUDĚNÍ VZDUCHU VE VĚTRANÉM PROSTORU</b>	27
3.3.1 Volný izotermní proud	28
3.3.2 Neizotermní proudy	30
3.3.3 Obrazy proudění ve větraném prostoru	31
<b>3.4 VYÚSTKY</b>	33
<b>3.5 PŘIROZENÉ VĚTRÁNÍ</b>	35
3.5.1 Infiltrace	38
3.5.2 Větrání okny	38
3.5.3 Aerace	38
3.5.4 Šachtové větrání	40
<b>3.6 NUCENÉ VĚTRÁNÍ CELKOVÉ</b>	41
<b>3.7 MÍSTNÍ VĚTRÁNÍ</b>	42
3.7.1 Vzduchové sprchy	42
3.7.2 Vzduchové oázy	44
3.7.3 Vzduchové clony	44
<b>3.8 MÍSTNÍ ODSÁVÁNÍ</b>	44
3.8.1 Sací nástavce	46

<b>3.9 HOSPODÁRNOST NÁVRHU VZDUCHOTECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ</b>	47
3.9.1 Zpětné získávání tepla z odváděného vzduchu	47
3.9.2 Použití zařízení s cirkulací vzduchu	49
<b>4. ZAŘÍZENÍ PRO ODLUČOVÁNÍ ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK</b>	50
<b>4.1 ZAŘÍZENÍ PRO ODLUČOVÁNÍ ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK         U ODSÁVACÍCH ZAŘÍZENÍ</b>	50
4.1.1 Odlučování částečkových znečišťujících látek	50
4.1.2 Odlučování plynných znečišťujících látek	54
<b>4.2 FILTRY ATMOSFÉRICKÉHO VZDUCHU</b>	55
4.2.1 Filtrace částic	55
4.2.2 Sorpční filtry	56
<b>LITERATURA</b>	58

# 1. ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

Pod pojmem „životní prostředí“ většinou chápeme životní prostředí člověka, pro které se v praxi používá následující definice: „Životní prostředí člověka se rozumí ta část světa, s níž člověk přichází do styku, kterou přetváří a využívá pro uspokojování svých potřeb. Pozornost se soustřeďuje především na hmotnou část prostředí, která je dána prostorem, kde člověk bydlí, pracuje a odpočívá.“

Uvedená definice chápe prostředí i člověka jako jediný neoddělitelný celek, neboť člověk svého prostředí nejen používá a ovlivňuje je, ale také se mu přizpůsobuje. Vztah mezi člověkem a prostředím je tedy aktivní, nemohou pouze existovat vedle sebe, ale jsou na sobě závislí, a to daleko více, než si člověk je ochoten přiznat.

Z metodických důvodů je účelné zkoumat životní prostředí člověka podle systému hmotná a nehmotná složka životního prostředí, což nejlépe vyhovuje širokému obsahu tohoto pojmu.

Složka hmotného (materiálního) prostředí v sobě zahrnuje:

- a) prostředí přírodní - prostředí abiotické (fyzikální, chemické)  
- prostředí biotické
- b) prostředí antropogenní (umělé).

Abiotické prostředí zahrnuje neživou hmotu (půdu, vodu, vzduch) a přírodní síly (záření, přitažlivost, molekulární energii aj.), s nimiž se člověk setkává a před kterými se musí chránit, nebo je může využívat k uspokojování svých životních potřeb. Prostředí biotické jsou živé organismy – živočichové, rostliny, mikroorganismy. Antropogenní (umělé) prostředí představuje materiální produkty lidské činnosti – stavby, stroje, kulturní hodnoty aj.

Složka nehmotného životního prostředí vyjadřuje sociální vztahy a mezilidské kontakty – sociální prostředí.

Uvedené třídění životního prostředí má pouze povahu typologickou. Ve skutečnosti uvedené tři základní složky životního prostředí (přírodní, antropogenní a sociální) tvoří v životním prostředí člověka vždy nedílný celek, objevují se téměř vždy současně a ve vzájemné souvislosti svého působení.

Člověk svou pracovní činností přetváří přírodní prostředí a vnáší do něho antropogenní prvky, tak aby prostředí odpovídalo jeho potřebám. V procesu své činnosti člověk mění nejen přírodu, ale přetváří zároveň povahu společenských vztahů, vytváří systém životního prostředí. V tomto pojetí vystupuje člověk ve vztahu k životnímu prostředí jako subjekt. Člověk je však současně objektem životního prostředí, je cílem působení všech složek životního prostředí, které ovlivňují jeho fyzický a duševní stav.

Hovoří-li se tedy o životním prostředí, rozumí se jím životní prostředí člověka tvořené převážně přírodními složkami hmotného světa, i když jsou ovlivněny působením člověka. Tzv. umělé (antropogenní) prostředí je životní prostředí vytvořené především výtvořou člověka, i když obsahuje i složky přírodní, např. vzduch.

Životní prostředí člověka lze rozdělit podle různých hledisek. Podle umístění se používá členění na prostředí vnější a prostředí vnitřní.

- Vnější prostředí je životní prostředí vně staveb.
- Vnitřní prostředí je životní prostředí ve stavbách, tj. v interiéru budov.

Ve vnějším prostředí jsou hlavními problémy znečištění vzduchu, vody a půdy, znečišťování oblastí živých organismů, eroze půdy, změny obsahu minerálních látek v půdě

aj. K znečišťování vnějšího prostředí dochází odpady z různých výrobních i nevýrobních činností poněvadž tyto končí buď ve vzduchu, ve vodě, nebo v půdě a dostávají se tak do koloběhu látek v přírodě a také do lidského těla.

Stav vnějšího prostředí v daném místě je závislý na zeměpisné poloze, roční a denní době, na podnebí, na produkci znečišťujících látek a energií, na počasí aj. Vnější prostředí působí nejen na člověka, ale také na přírodní prostředí abiotické i biotické, na prostředí antropogenní a ovlivňuje i prostředí vnitřní.

Ve vnitřním prostředí budov, ve kterém tráví člověk 70 až 80 % svého života, hlavními problémy jsou čistota ovzduší, zajištění tepelného stavu prostředí, ochrana proti hluku, vhodné osvětlení, ochrana před ionizujícím a elektromagnetickým zářením a další.

Vztahy bezprostřední interakce mezi člověkem a jeho životním prostředím se realizují především lidskou činností. Z tohoto hlediska je účelné členit životní prostředí podle činnosti člověka. Jedná se o tzv. funkční vymezení životního prostředí na:

- pracovní prostředí, tj. životní prostředí určené nebo využívané pro práci (např. výrobní a administrativní budovy, kabiny dopravních zařízení, řídicí kabiny, polokrytá a otevřená pracoviště),
- obytné prostředí, tj. životní prostředí určené nebo využívané pro bydlení včetně krátkodobé rekreace,
- rekreační prostředí, tj. životní prostředí určené nebo využívané pro rekreaci,
- další druhy prostředí – podle jiných činností, např. léčebné, výchovné, společensko-kulturní apod.

V jednotlivých konkrétních prostředích zkoumáme především ty vlastnosti určitých složek životního prostředí, které působí na člověka. U ovzduší je to např. jeho čistota, teplota, vlhkost, proudění atd. Takové vlastnosti složek životního prostředí označujeme jako faktory prostředí. Analýza faktorů prostředí je základem zjišťování a hodnocení stavu a úrovně životního prostředí i základem cílevědomé péče o životní prostředí. Technickou stránkou péče o životní prostředí se zabývá technika prostředí.

Následující text je věnován vnitřnímu prostředí budov, pojednává o technických opatřeních k úpravě vnitřního prostředí budov.

## 2. VNITŘNÍ PROSTŘEDÍ – MIKROKLIMA

Jak již bylo uvedeno, důležitou součástí životního prostředí je prostředí vnitřní, v němž člověk tráví převážnou část svého života, zejména pak prostředí pracovní. Jakost vnitřního prostředí (mikroklimatu) se hodnotí podle stavu činitelů prostředí. Tyto činitele prostředí, nazývané také faktory prostředí, zahrnují všechny změny jednotlivých složek prostředí a dalších faktorů, které působí na smyslové chápání člověka a mají vliv na jeho fyzický a duševní stav. Hlavní mikroklimatické činitele (faktory) jsou:

- 1) čistota okolního vzduchu,
- 2) teplota vzduchu,
- 3) teplota povrchu stěn a předmětů,
- 4) rychlost proudění vzduchu,
- 5) vlhkost vzduchu,
- 6) oděv,
- 7) intenzita osvětlení,
- 8) hluk, vibrace a ultrazvuk,
- 9) koncentrace iontů ve vzduchu,
- 10) intenzita elektrických a magnetických polí,
- 11) intenzita ionizujícího záření,
- 12) prostorové, dispoziční a estetické řešení prostředí,
- 13) tělesná konstituce člověka,
- 14) činnost člověka,
- 15) schopnost aklimatizace,
- 16) klima, rasové zvláštnosti a návyky lidí,
- 17) další vlivy – tlak vzduchu, psychické stavy atd.

Optimální stav vnitřního prostředí je takový stav mikroklimatu, které vytváří člověku podmínky pro zdravý pobyt a tvořivou práci. Takový optimální stav prostředí se nazývá pohoda prostředí.

Pohodu prostředí člověk cítí komplexně, přesto se však jednotlivé smysly uplatňují natolik specificky, že rozlišujeme pohodu celkovou a pohodu dílčí, kdy předmětem zájmu je pouze některý, nebo některé z činitelů celkové pohody – tj. pak podle jednotlivých činitelů pohoda prostředí toxická, aerosolová, mikrobiální, oděrová, tepelná, světelná, akustická, ionizační, elektrostatická, elektroiontová, psychická aj.

Některé z výše uvedených činitelů (1 až 11) se dají upravit technickými opatřeními, k nimž patří:

- zařízení na úpravu tepelného a vlhkostního mikroklimatu a čistoty vzduchu, to jsou zařízení větrací, klimatizační, vytápěcí, odsávací a odlučovací,
- opatření na ochranu proti hluku a vibracím,
- zařízení osvětlovací,
- zařízení na úpravu iontového složení vzduchu,
- opatření na ochranu proti ionizujícímu a neionizujícímu záření aj.

Problematikou řešení pracovišť a pracovního prostředí z hlediska prostorových, dispozičních, estetických a barevných činitelů (12) se zabývá nová mezioborová disciplína – ergonomie.

Činitele 2 až 6 a 14 se navzájem ovlivňují a jejich vhodné hodnoty vytváří stav, který se nazývá tepelná pohoda prostředí.



## 2.1 TEPELNÁ POHODA PROSTŘEDÍ

Tepelná pohoda prostředí, nazývaná také pohoda tepelně vlhkostní, nebo tepelný komfort, se obvykle definuje jako pocit spokojenosti člověka s tepelným stavem prostředí, či s tepelně vlhkostním mikroklimatem. Podle ČSN EN ISO 7730 [8] je tepelný komfort definována jako stav mysli vyjadřující uspokojení s tepelným prostředím. Všeobecným a nezbytným předpokladem tepelné pohody je rovnováha tepelného režimu člověka nutná k udržení stálé teploty lidského těla.

Při látkových přeměnách probíhajících v lidském těle (biochemických oxidačních pochodech) se uvolňuje tepelná energie označovaná jako metabolické teplo (metabolický tepelný tok)  $\dot{Q}_m$ , která se přenáší do okolního prostředí. Množství uvolňované energie závisí především na intenzitě fyzické činnosti a na hmotnosti člověka. Jen malá část této energie se přenáší do okolí formou mechanické práce konané člověkem, zatímco většina se přenáší formou tepla (90 až 100 %). Průměrné hodnoty metabolického tepelného toku vztaženého na 1 m<sup>2</sup> povrchu lidského těla (hustoty metabolického tepelného toku  $\dot{q}_m$ ) při různé fyzické činnosti člověka jsou uvedeny v tab. 2.1.

Hustoty metabolického tepelného toku se používají proto, aby byl eliminován vliv fyzické konstituce člověka, od které se odvíjí velikost povrchu lidského těla  $S$  [m<sup>2</sup>] závislá na hmotnosti člověka  $m$  [kg] a jeho výšce  $h$  [m]. Uvedenou závislost je možné vyjádřit vztahem

$$S = 0,202 m^{0,425} h^{0,725}. \quad (2.1)$$

Střední hodnota povrchu těla dospělých mužů je asi 1,9 m<sup>2</sup>, žen 1,75 m<sup>2</sup>.

Tabulka 2.1 Hustota metabolického tepelného toku při různé činnosti člověka

Činnost	Hustota metabolického tepelného toku $\dot{q}_m$		Mechanická účinnost $\eta$
	[W.m <sup>-2</sup> ]	[met]	
Klidné ležení	46	0,8	0
Sezení, uvolněné	58	1,0	0
Práce vsedě (úřady, školy, laboratoře)	70	1,2	0
Stání, lehká práce (nakupování, laboratoře, lehký průmysl)	93	1,6	0 až 0,1
Stání, střední práce (prodavač, práce v domácnosti, práce na strojích)	116	2,0	0,1 až 0,2
Chůze po rovině 2 km.h <sup>-1</sup>	110	1,9	0,1 až 0,2
Chůze po rovině 3 km.h <sup>-1</sup>	140	2,4	0,1 až 0,2
Chůze po rovině 4 km.h <sup>-1</sup>	165	2,8	0,1 až 0,2
Chůze po rovině 5 km.h <sup>-1</sup>	200	3,4	0,1 až 0,2
Těžká fyzická práce (těžký průmysl, stavebnictví) přenášení břemen 50 kg	235	4,0	0,1 až 0,25

$$1 \text{ met} = 58,2 \text{ W.m}^{-2}$$

Zdrojem energie v těle je potrava. Kyslík potřebný pro biochemické oxidační pochody v lidském těle je získáván z vdechovaného vzduchu. Hmotnostní tok vdechovaného vzduchu  $\dot{m}_{vzd}$  [kg.s<sup>-1</sup>] závisí na činnosti člověka a pro dospělého člověka je dán vztahem

$$\dot{m}_{vzd} = 2,58 \cdot 10^{-6} \dot{q}_m \quad (2.2)$$

Vnitřní tělesná teplota zdravého člověka je asi  $36,5 \pm 0,5$  °C, a proto musí být teplo uvolňované v těle přenášeno do okolí. K přenosu tepla do okolí dochází vedením, konvekcí, radiací, vypařováním, dýcháním a velikost přenosu tepla ovlivňuje termoregulační centrum těla.

Tepelná regulace těla je řízena hypothalamem (částí mozku), který reaguje na změnu teploty uvnitř těla i teploty kůže. Při pocitu chladu (okolí odnímá tělu více tepla, než tělo produkuje) dochází k zvýšení produkce tepla intenzivnějšími látkovými přeměnami, tj. chemická termoregulace nebo dochází ke stažení svalových vláken svírajících krevní cévy (hlavně na periférii končetin), tj. vasomotorická termoregulace. Při vasomotorické regulaci se zúžením cév pokožky sníží průtok krve a tím i teplota kůže, čímž se omezí odvod tepla konvekcí a radiací. Při pocitu tepla dochází naopak k rozšíření cév pokožky, která se zvýšením průtoku krve prohřeje a tím se zvýší odvod tepla konvekcí a radiací. Pokud je třeba dále zvyšovat odvod tepla z povrchu těla, uplatňuje se vypařovací termoregulace, tj. zvýšení produkce potu potními žlázami a jeho odpaření. Pokud uvedené termoregulace nestačí zajistit tepelnou rovnováhu člověka, dochází k výrazné změně teploty lidského těla a k ohrožení života přehřátím, nebo podchlazením.

Teplota kůže pro mírně aktivní osoby v podmínkách tepelné pohody se pohybuje v rozmezí 33 až 34 °C, nárůst teploty nad 45 °C a pokles pod 18 °C vyvolává pocit bolesti. Pokles vnitřní tělesné teploty pod 28 °C může vést k srdeční arytmii, k úmrtí a při teplotách vyšších jak 46 °C může dojít k nevratnému poškození mozku.

Mimo uvedených základních termoregulačních procesů, které se uskutečňují automaticky a bez zásahu vůle, používá člověk ještě vědomou termoregulaci. K uvědomělým konáním na zajištění pocitu tepelné pohody patří:

- změna tělesné činnosti a tím změna produkovaného metabolického tepelného toku,
- změna části povrchu lidského těla, která se účastní na přenosu tepla (větším oddálením končetin od sebe a od těla, nebo naopak „schoulením se“),
- změna oblečení,
- změna teploty prostředí.

### 2.1.1 Tepelná rovnováha

Podmínkou tepelné rovnováhy člověka je, aby energie produkovaná v těle zmenšená o energii přenášenou formou mechanické práce konané člověkem byla rovna energii odvedené formou tepla do okolí vedením, konvekcí, radiací, vypařováním a dýcháním. Tepelnou rovnováhu lze vyjádřit rovnicí

$$\dot{Q}_m (1 - \eta) = \dot{Q}_{ved} + \dot{Q}_k + \dot{Q}_r + \dot{Q}_v + \dot{Q}_d \quad [\text{W}], \quad (2.3)$$

kde  $\dot{Q}_m$  je metabolický tepelný tok,  $\dot{Q}_m = \dot{q}_m S$  [W],

$\dot{q}_m$  je hustota metabolického tepelného toku [W.m<sup>-2</sup>],

$S$  je plocha povrchu těla [m<sup>2</sup>]; závisí na hmotnosti člověka  $m$  [kg] a jeho výšce  $h$  [m] podle vztahu

$$S = 0,202 m^{0,425} h^{0,725}. \quad (2.4)$$

Pro průměrného dospělého muže se uvažuje  $S = 1,9 \text{ m}^2$ , pro ženu  $S = 1,75 \text{ m}^2$ .

$\eta$  je mechanická účinnost lidského těla,

$\dot{Q}_{ved}$ ,  $\dot{Q}_k$ ,  $\dot{Q}_r$ ,  $\dot{Q}_v$ ,  $\dot{Q}_d$  jsou tepelné toky přenášené z lidského těla do okolí vedením, konvekcí, radiací, vypařováním a dýcháním [W].

Za normálních okolností, např. u stojícího člověka, je tepelný tok přenášený vedením na místech styku těla s okolními předměty jen velmi malou položkou v tepelné bilanci člověka, a proto jej lze zanedbat. Vzhledem k tomu, že mechanická účinnost člověka je velmi malá, lze ve většině případů předpokládat, že všechnu energii uvolňovanou při látkových přeměnách v lidském těle je nutno přenášet z těla konvekcí, radiací, vypařováním a dýcháním a rovnicí (2.3) lze pak psát ve tvaru

$$\dot{Q}_m = \dot{Q}_k + \dot{Q}_r + \dot{Q}_v + \dot{Q}_d. \quad (2.5)$$

### Přenos tepla konvekcí

Tepelný tok přenášený z vnějšího povrchu oblečeného člověka do okolního vzduchu konvekcí je dán vztahem

$$\dot{Q}_k = \alpha S_{cl} (t_p - t) \text{ [W]}, \quad (2.6)$$

kde  $\alpha$  je součinitel přestupu tepla konvekcí [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ];

$$\text{při prakticky klidném vzduchu } (w \leq 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}) \text{ je} \quad \alpha = 2,38 (t_p - t), \quad (2.7)$$

$$\text{při rychlostech proudění vzduchu } 0,1 < w < 2,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \text{ je} \quad \alpha = 12,1 \sqrt{w}, \quad (2.8)$$

$t_p$  – střední teplota vnějšího povrchu oděvu,

$t$  – teplota okolního vzduchu,

$S_{cl} = f_{cl} S$  – povrch oblečeného člověka,

$S$  – povrch lidského těla,

$f_{cl}$  – poměr povrchu oblečeného člověka k povrchu lidského těla – závisí na druhu oděvu.

### Přenos tepla radiací

Tepelný tok přenášený mezi povrchem těla a okolními plochami radiací je dán rovnicí

$$\dot{Q}_r = \varepsilon \sigma_o S_r (T_p^4 - T_r^4) \text{ [W]}, \quad (2.9)$$

kde  $\varepsilon$  je poměrná zářivost mezi povrchem těla a okolními plochami; pro pokožku a většinu tkanin má hodnotu  $\varepsilon = 0,95$ ;

$\sigma_o$  – Stefanova – Boltzmannova konstanta;  $\sigma_o = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ;

$S_r$  – povrch lidského těla přenášející teplo radiací je menší než povrch oblečeného člověka;  $S_r \approx 0,71 S_{cl}$ ;

$T_r$  – střední radiační teplota [K], tj. myšlená společná teplota všech okolních ploch, při níž by byl radiační tepelný tok přenášený mezi povrchem oděvu a okolními plochami stejný jako ve skutečnosti.

### Přenos tepla vypařováním potu

Tepelný tok přenášený (odváděný) z povrchu lidského těla vypařováním je roven součtu tepelného toku odváděného difúzí, tzv. suchým pocením – neviditelným vypařováním potu z pokožky  $\dot{Q}_{vs}$  a tepelného toku odváděného tzv. mokřím pocením – viditelným vypařováním potu  $\dot{Q}_{vm}$

$$\dot{Q}_v = \dot{Q}_{vs} + \dot{Q}_{vm}. \quad (2.10)$$

Tepelný tok odváděný neviditelným vypařováním potu je dán vztahem

$$\dot{Q}_{vs} = 3,05 \cdot 10^{-3} S (p''_{p(t_k)} - p_{p(t)}) \text{ [W]}, \quad (2.11)$$

kde  $S$  je plocha povrchu těla [ $\text{m}^2$ ],

$p''_{p(t_k)}$  – parciální tlak sytých vodních par při střední teplotě pokožky  $t_k$  [Pa],

$p_{p(t)}$  – parciální tlak vodních par v okolním vzduchu závislý na teplotě okolního vzduchu  $t$  a relativní vlhkosti okolního vzduchu  $\varphi$  [Pa].

Tepelný tok odváděný z povrchu těla mokřím pocením  $\dot{Q}_{vm}$  je významným nástrojem termoregulace a jeho hodnota se řídí podle potřeby, jak je to nutné k udržení stálé teploty lidského těla.

### Přenos tepla dýcháním

Vdechovaný vzduch, jehož množství závisí na intenzitě fyzické činnosti, se v plicích zahřeje na teplotu 34 až 36 °C a současně se také nasýtí vodní parou. Tepelný tok odváděný dýcháním  $\dot{Q}_d$  je tedy roven součtu tepelného toku potřebného k ohřátí vzduchu a tepelného toku potřebného k odpaření vody v plicích

$$\dot{Q}_d = \dot{m}_{vzd} c_p (t_v - t) + \dot{m}_{vzd} l_{23} (x'' - x) \text{ [W]}, \quad (2.12)$$

kde  $\dot{m}_{vzd}$  [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ] je hmotnostní tok vzduchu plicemi a je dán vztahem (2.2),

$c_p$  – měrná tepelná kapacita vzduchu za konstantního tlaku ( $c_p = 1,01 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ),

$t_v$  – teplota vydechovaného vzduchu ( $t_v \approx 34 \text{ °C}$ ),

$l_{23}$  – měrné výparné teplo vody ( $l_{23} = 2560 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),

$x''$ ,  $x$  [ $\text{kg}/\text{kg}$  s.v.] – měrná vlhkost vydechovaného (vlhkostí nasyceného vzduchu) a okolního vdechovaného vzduchu.

### Prostup tepla oděvem

Tepelný tok přenášený konvekcí a radiací z povrchu oblečeného člověka prostupuje oděvem, což vyjadřuje rovnice

$$\dot{Q}_k + \dot{Q}_r = S(t_k - t_p) / R_{cl}, \quad (2.13)$$

kde  $R_{cl}$  [ $\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ ] je tepelný odpor oděvu.

Pro tepelný odpor oděvu se používá také bezrozměrná veličina  $I_{cl}$  definovaná vztahem

$$I_{cl} = R_{cl} / 0,155,$$

pro niž se zavedlo jednotkové označení clo.

Tabulka 2.2 Tepelný odpor pro některé druhy oděvů

Druh oděvu	$R_{cl}$ [ $\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ ]	$I_{cl}$ [clo]	$f_{cl}$ [-]
Jednovrstvý, lehký (spodky, košile s krátkými rukávy, lehké kalhoty, lehké ponožky, boty)	0,080	0,5	1,1
Dvouvrstvý (spodní prádlo, košile, kalhoty, ponožky, boty)	0,110	0,7	1,1
Třívrstvý (spodní prádlo s krátkými rukávy a nohavicemi, košile, kalhoty, pracovní blůza, ponožky, boty)	0,155	1,0	1,15
Čtyřvrstvý (spodní prádlo s krátkými rukávy a nohavicemi, košile, kalhoty, sako, svrchník, ponožky, boty)	0,230	1,5	1,2

Tepelný odpor oděvu závisí především na jeho členitosti, tj. na počtu vrstev, ze kterých se skládá. Hodnoty tepelných odporů pro některé druhy oděvů jsou uvedeny v tab. 2.2.

### 2.1.2 Rovnice tepelné pohody

První podmínkou pro dosažení tepelné pohody je, aby byla splněna rovnice tepelné rovnováhy (2.5). Při stavu tepelné pohody však musí být tepelné rovnováhy dosaženo při minimálních zásazích tělesné termoregulace. Např. nelze hovořit o tepelné pohodě, je-li rovnováhy dosaženo vylučováním potu, nebo v zimě, kdy tělesnou termoregulací se snižuje cirkulace krve mezi vnitřními a periferními orgány, což má za následek snížení teploty pokožky končetin.

Při určité produkci tepla v těle jsou teplota pokožky a pocení jediné fyziologické veličiny, které ovlivňují tepelnou pohodu. Dle literatury [5], pro stav tepelné pohody, střední teplota pokožky  $t_k$  a tepelný tok mokrým pocením  $\dot{Q}_{vm}$ , jsou vyjádřeny v závislosti na činnosti člověka  $\dot{q}_m$  vztahy

$$t_k = 35,7 - 0,0275 \dot{q}_m \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.14)$$

a

$$\dot{Q}_{vm} = 0,42 S (\dot{q}_m - 58) \text{ [W]}. \quad (2.15)$$

Tyto vztahy se pokládají za druhou a třetí základní podmínku stavu tepelné pohody.

Řešením rovnic (2.5) až (2.15) dostaneme rovnici tepelné pohody vyjádřenou funkční závislostí

$$\dot{Q}_m = f(R_{cl}, f_{cl}, t, w, t_r, \varphi). \quad (2.16)$$

Rovnice tepelné pohody vyjadřuje vzájemné vztahy mezi hlavními činiteli tepelné pohody. Tyto činitele charakterizují:

- $\dot{Q}_m$                       činnost člověka,
- $R_{cl}, f_{cl}$                       vlastnosti oděvu,
- $t, w, t_r, \varphi$                       tepelný stav prostředí.

Pozn.: Poměr povrchu oblečeného člověka k povrchu lidského těla  $f_{cl}$  lze vyjádřit jako funkci tepelného odporu oděvu  $I_{cl}$

$$f_{cl} = 1,00 + 0,2 I_{cl} \quad \text{pro} \quad I_{cl} < 0,5 \text{ clo},$$

$$f_{cl} = 1,05 + 0,1 I_{cl} \quad \text{pro} \quad I_{cl} > 0,5 \text{ clo}.$$

Bylo zjištěno, že místní ochlazování lidského těla konvekcí závisí nejen na průměrné rychlosti proudění vzduchu, ale i na časových změnách této rychlosti, které charakterizuje intenzita turbulence  $Tu$ , tj. podíl výběrové směrodatné odchylky rychlosti a střední rychlosti. Intenzitu turbulence lze určit ze vztahu

$$Tu = \frac{1}{\bar{w}} \sqrt{\frac{\sum_i (w_i - \bar{w})^2}{n - 1}}, \quad (2.17)$$

kde  $w_i$  jsou jednotlivé naměřené rychlosti,  $\bar{w}$  je střední rychlost proudění vzduchu a  $n$  je počet měření.

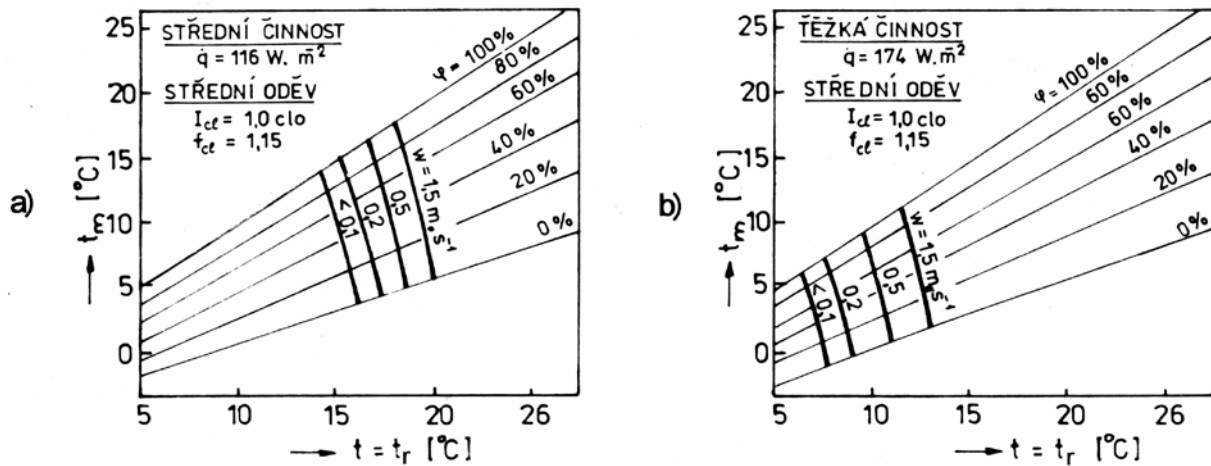
Intenzita turbulence ve větraných místnostech v pásmu pobytu osob závisí na způsobu přívodu vzduchu do větraného prostoru. Při tradičním přívodu vzduchu směřováním byla zjištěna intenzita turbulence 0,2 až 0,6. Při zaplavování pásma pobytu lidí větracím vzduchem jsou intenzity turbulence podstatně menší.

Intenzita turbulence se přiřazuje ke čtyřem činitelům charakterizujícím tepelný stav prostředí ( $t$ ,  $w$ ,  $t_r$ ,  $\varphi$ ) jako další činitel.

### 2.1.3 Diagramy tepelné pohody

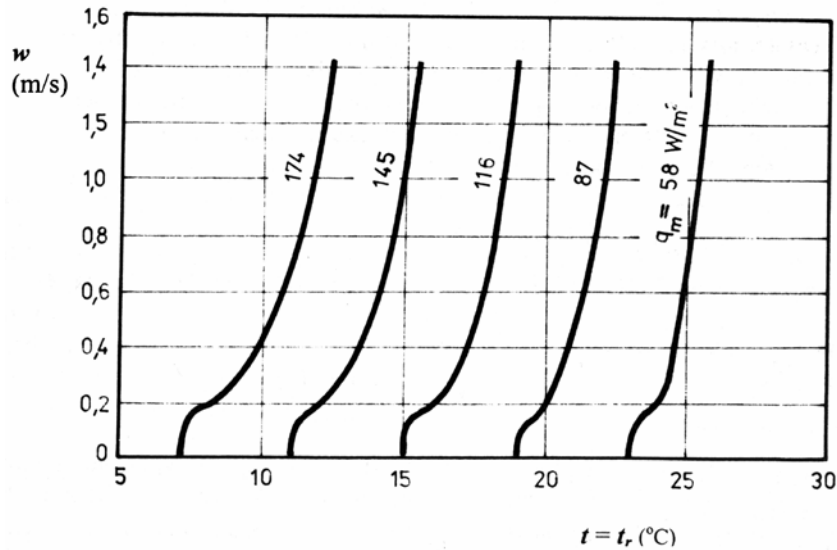
Na základě rovnice tepelné pohody jsou sestavené diagramy tepelné pohody (tepelného komfortu). Používají se tři typy diagramů umožňující posoudit vliv jednotlivých činitelů tepelné pohody, jejichž příklady jsou na obr. 2.1 až 2.3. Křivky v těchto diagramech jsou křivkami tepelné pohody, tzn. vyhovující rovnici tepelné pohody pro určitou činnost, oděv, teplotu vzduchu, střední radiační teplotu, rychlost proudění vzduchu a vlhkost vzduchu.

Diagramy, jejichž příklad je uveden na obr. 2.1, se používají v případě, kdy teplota vzduchu je přibližně rovna střední radiační teplotě. Tyto diagramy dávají všeobecný pohled na vliv vlhkosti vzduchu. Je zřejmé, že vliv vlhkosti při tepelné pohodě prostředí je relativně mírný. Křivky pohody prostředí jsou kresleny pro celý rozsah relativních vlhkostí ( $\varphi = 0$  až 100 %). Z hlediska tepelné pohody však leží pásmo tepelné pohody mezi 30 až 70 % relativní vlhkosti. Pokud je teplota okolí vzhledem k teplotě povrchu těla dostatečně nízká, snáší člověk dobře i vysoké relativní vlhkosti. Jakmile však teplota okolí se blíží teplotě těla a relativní vlhkost je vysoká, pak je znemožněno odpařování potu. Při nízkých relativních vlhkostech dochází k vysýchání sliznic a jejich porušení. (Na obr. 2.1 je  $t_m$  teplota mokrého teploměru.)



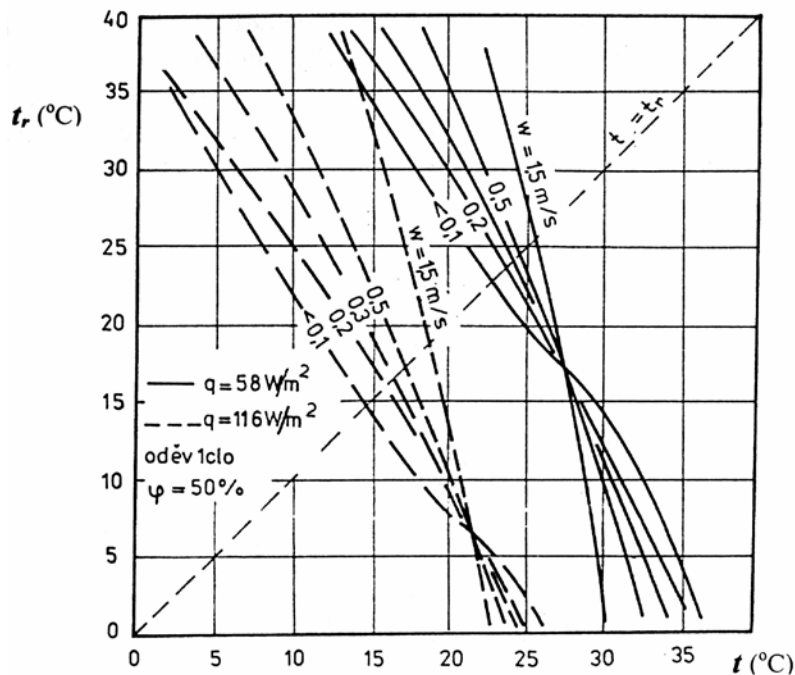
Obr. 2.1 Diagramy tepelné pohody pro parametry  $t = t_r$ ,  $\varphi$ ,  $w$

Příklad druhého typu diagramů tepelné pohody je uveden na obr. 2.2. Tento typ diagramů se doporučuje v případě, kdy relativní vlhkost se jen mírně liší od 50 %. Jak křivky pohody prostředí ukazují, do rychlosti  $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  teplota prostředí nezávisí na rychlosti vzduchu. Při rychlostech  $0,1$  až  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  mají křivky pohody prostředí inflexní bod, proto změny rychlosti v intervalu od  $0,1$  do  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  musí být kompenzovány větší změnou teploty. Porovnání diagramů pro různé typy oděvů ukazuje, že vliv oděvu na teplotu pohody prostředí má výrazný vliv při velkých produkcích metabolického tepla.



Obr. 2.2 Diagram tepelné pohody pro parametry  $\dot{q}_m$ ,  $w$ ,  $t = t_r$  (při  $\varphi = 50\%$ ,  $I_{cl} = 1 \text{ clo}$ )

Třetí typ diagramů, jejichž příklad je uveden na obr. 2.3, se používá v případě, kdy teplota vzduchu se liší od střední radiální teploty a relativní vlhkost je přibližně 50 %. V diagramech jsou sestrojeny křivky pohody prostředí pro různé typy oděvů a různé produkce metabolického tepla (označené v diagramu  $q$ ). Křivky pohody prostředí se navzájem protínají v místě, kde teplota vzduchu je rovna střední teplotě povrchu oblečeného člověka.



Obr. 2.3 Diagram tepelné pohody pro parametry  $\dot{q}_m$ ,  $w$ ,  $t$ ,  $t_r$  (při  $\varphi = 50\%$ ,  $I_{cl} = 1 \text{ clo}$ )

## 2.1.4 Měření veličin určujících tepelný stav prostředí

### Měření teploty vzduchu

Pro měření teploty vzduchu jsou vhodné teploměry dilatační, využívající roztažnosti především kapalin a pevných látek (pro získání elektrického signálu je nutný převodník) a dále pak teploměry termoelektrické a odporové.

*Dilatační teploměry kapalinové* používají jako teploměrnou látku rtuť, etanol aj. Z *dilatačních teploměrů využívajících roztažnosti pevných látek* jsou nejpoužívanější teploměry bimetalické, složené ze dvou spojených kovových pásků s různou teplotní roztažností.

*Termoelektrické teploměry*, označované také jako termočlánky, tvoří dva vodiče z různých materiálů spojené svařením či pájením. Termočlánky jsou přesné a mají malé časové konstanty. Měří teplotní diference a pro měření absolutních teplot je třeba použít referenční zdroj napětí nebo zapojení se dvěma termočlánky. Používají se termočlánky různých typů (s různými materiály vodičů) – především podle měřeného rozsahu teplot.

*Odporové teploměry* jsou přesné, měří absolutní hodnoty teplot. Čidlo z Pt, Ni, Ag, Au aj. nebo polovodičů je vyrobeno z drátku o průměru 0,01 až 0,1 mm a délce asi 1m, který je namotán na keramické kostře či slídovém rámečku, nebo také z odporového pásku či tělíska.

Při měření teploty vzduchu by čidlo mělo být chráněné proti záření z okolí a mělo by být zajištěno provětrávání (např. u odporových čidel prouděním vzduchu rychlostí 2 až 5 m.s<sup>-1</sup>). Vodiče čidel by měly být vedeny po izotermě.

### Měření vlhkosti vzduchu

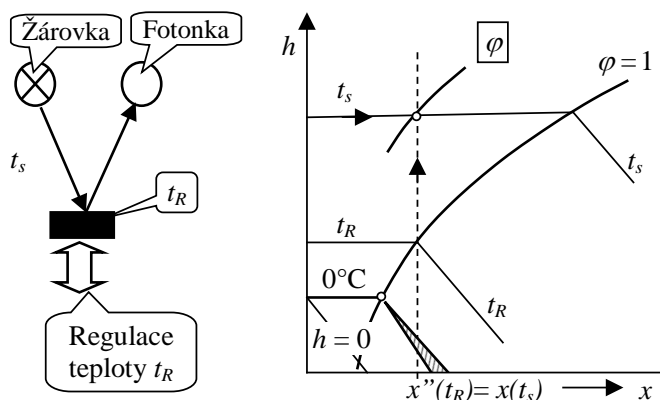
Pro nepřímá měření vlhkosti vzduchu se používají tzv. *hygrometry*, které využívají změny fyzikálních vlastností různých materiálů s vlhkostí, např.:

- Změny rozměrů organických materiálů s vlhkostí (vlasové či blánové hygrometry).
- Změny elektrické vodivosti čidla v závislosti na vlhkosti, např. hygrometr s chloridem lithným k měření rosného bodu nebo relativní vlhkosti.
- Změny elektrické kapacity čidla při změně vlhkosti.

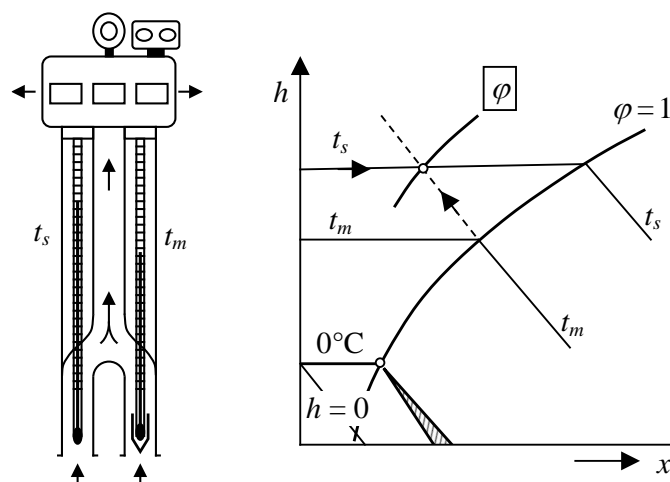
Dále se k měření vlhkosti vzduchu používají kondenzační vlhkoměry a psychrometry.

*Kondenzační vlhkoměry* určují vlhkost měřením teploty rosného bodu vzduchu  $t_R$  [°C], (na zamlžujícím se zrcátkem) a teploty suchého teploměru  $t_s$  [°C], viz obr. 2.4a. Relativní vlhkost  $\varphi$  se určí z Mollierova  $h-x$  diagramu vlhkého vzduchu (obr.2.4b), nebo z rovnice

$$\varphi = \frac{P_{ps}}{P_{ps}''}, \quad (2.18)$$



a) Schéma měření b) Určování  $\varphi$  v diagramu  
Obr. 2.4 Měření kondenzačním vlhkoměrem



a) Schéma měření b) Určování  $\varphi$  v diagramu  
Obr. 2.5 Měření psychrometrem



kde  $p_{ps}$  [Pa] je parciální tlak vodní páry ve vzduchu o teplotě  $t_s$  a relativní vlhkosti  $\varphi$ , který je roven parciálnímu tlaku syté páry při teplotě  $t_R$ , tj.  $p_{ps} = p_{pR}$  a  $p_{ps}$  [Pa] je parciální tlak syté páry při teplotě  $t_s$ . Tyto vlhkoměry jsou vhodné k měření nízkých relativních vlhkostí i při teplotách pod 0 °C.

*Psychrometry* určují vlhkost vzduchu měřením teploty mokrého teploměru  $t_m$  [°C] a teploty suchého teploměru  $t_s$  [°C]. Na obr. 2.5a je tzv. Assmannův aspirační psychrometr, který se skládá ze dvou teploměrů, z nichž jeden má teploměrnou jímku vlhčenou mokrou punčoškou a obě jímky jsou chráněny proti záření. Ventilátor zajišťuje proudění vzduchu okolo obou teploměrů. Teplota vlhčeného teploměru vlivem odpařování vlhkosti zpočátku klesá. Po jejím ustálení (po 2 až 5 min.) se odečtou údaje na obou teploměrech ( $t_m$  a  $t_s$ ). Při určování relativní vlhkosti psychrometry je třeba současně měřit barometrický tlak. Relativní vlhkost lze určit z  $h$ - $x$  diagramu vlhkého vzduchu konstruovaného pro naměřený barometrický tlak  $p$  viz obr. 2.5b. Ke stanovení relativní vlhkosti se také používá Sprungova vztahu

$$p_{ps} = p_{pm}'' - 66 (t_s - t_m) \frac{P}{100670} \text{ [Pa]}, \quad (2.19)$$

kde  $p_{pm}''$  [Pa] je parciální tlak syté vodní páry při teplotě  $t_m$ . Relativní vlhkost se pak určí dle vztahu (2.18).

### Měření rychlosti proudění vzduchu

Rychlost proudění vzduchu se měří nejčastěji mechanickými anemometry (lopatkovými a vrtulkovými), termoanemometry a ultrazvukovými anemometry.

*Lopatkové anemometry* mají průměr oběžného kola 80 až 200 mm a umožní měření rychlosti proudění od 0,1 do 20 m.s<sup>-1</sup>. *Vrtulkové anemometry* mají průměr oběžného kola 10 až 20 mm a umožní měření rychlosti proudění od 0,4 do 40 m.s<sup>-1</sup>

*Termoanemometry* jsou v dané oblasti nejrozšířenější, jelikož umožní měření rychlosti proudění od 0,01 do 100 m.s<sup>-1</sup>. Pracují na principu měření intenzity ochlazování malých elektriky žhavených tělísek, kterými jsou drátek (z Pt, W, Ni o průměru nejčastěji 0,01 až 0,1 mm, délky 1 až 10 mm, vkládá se kolmo na směr proudu), soustava drátků (pro vícerozměrné proudění), fólie (pro vyšší rychlosti), žhavená kulička (o průměru 2 až 6 mm, směrově nezávislá, potlačuje fluktuace proudění).

*Ultrazvukové anemometry* (obr. 2.6) měří rychlost proudění vzduchu od 0,01 do 100 m.s<sup>-1</sup>, a to ze změny rychlosti šíření ultrazvuku ve vzduchu v různých směrech. Čidla jsou větší a odolnější než čidla termoanemometrů.

### Měření střední radiální teploty

*Střední radiální teplota*  $t_r$  [°C] je myšlená společná teplota okolních ploch v prostoru, při níž by byl sálavý tepelný tok mezi sledovaným povrchem a okolím stejný jako ve skutečnosti, kdy plochy mají teploty odlišné.

Střední radiální teplota se nejčastěji měří kulovým teploměrem. *Kulový teploměr* je měděná dutá koule s matným černým povrchem o průměru  $D = 100$  nebo 150 mm, vybavená teploměrem, který měří tzv. výslednou teplotu kulového teploměru  $t_g$  [°C] a umožňuje spolu s měřením teploty vzduchu  $t$  a rychlosti proudění vzduchu  $w$  určit střední radiální teplotu  $t_r$  dle vztahu



Obr. 2.6 Ultrazvukový anemometr

$$t_r = \left[ (t_g + 273)^4 + k w^{0,6} (t_g - t) \right]^{0,25} - 273. \quad (2.20)$$

Konstanta  $k = 2,9 \cdot 10^8$  pro  $D = 100$  mm a  $k = 2,5 \cdot 10^8$  pro  $D = 150$  mm.

### Měření intenzity turbulence

Intenzitu turbulence lze měřit anemometry s malými časovými konstantami. Jedná se především o termoanemometry s malými žhavenými tělísky (drátky, termistorovými tělísky) a ultrazvukové anemometry. Intenzita turbulence je dána vztahem (2.17), tj.

$$Tu = \frac{1}{\bar{w}} \sqrt{\frac{\sum_i (w_i - \bar{w})^2}{n - 1}},$$

kde  $\bar{w}$  [m.s<sup>-1</sup>] je střední rychlost proudění vzduchu,  $w_i$  [m.s<sup>-1</sup>] jsou jednotlivé naměřené rychlosti a  $n$  je počet měření v daném bodě. Tyto rychlosti měříme v každém bodě minimálně po dobu 3 min.

### 2.1.5 Hodnocení tepelného stavu a tepelné pohody prostředí

Vzhledem k tomu, že tepelná pohoda prostředí závisí na řadě činitelů, pro zjednodušení hodnocení tepelného stavu prostředí se používají odvozené veličiny zahrnující společný účinek několika nebo všech činitelů určujících tepelný stav prostředí, k nimž patří např. operativní teplota nebo výsledná teplota měřená kulovým teploměrem.

#### Operativní teplota $t_o$

Operativní teplota  $t_o$  [°C] je definována jako jednotná teplota uzavřeného černého prostoru, ve kterém by tělo sdílelo radiací a konvekcí stejně tepla, jako ve skutečném teplotně nehomogenním prostředí [2]. Při známé střední radiační teplotě  $t_r$  [°C] a teplotě vzduchu  $t$  [°C] se určí z výrazu

$$t_o = t_r + A (t - t_r), \quad (2.21)$$

kde  $A$  je funkcí rychlostí proudění vzduchu a podle literatury [2] pro  $w = 0,05$  až  $1$  m.s<sup>-1</sup> je  $A = 0,75 w^{0,16}$ .

Střední radiační teplotu lze stanovit výpočtem dle vztahu (2.20), tj.

$$t_r = \left[ (t_g + 273)^4 + 2,9 \cdot 10^8 \cdot w^{0,6} (t_g - t) \right]^{0,25} - 273, \quad (2.22)$$

kde  $t_g$  je výsledná teplota kulového teploměru o průměru 0,10 m,

nebo dle vztahu

$$t_r = \left[ (t_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \cdot w^{0,6} (t_g - t) \right]^{0,25} - 273, \quad (2.23)$$

kde  $t_g$  je výsledná teplota kulového teploměru o průměru 0,15 m.

#### Výsledná teplota $t_g$

Výsledná teplota  $t_g$  [°C] je veličina, kterou lze přímo měřit kulovým teploměrem. Kulový teploměr je kulová baňka z tenkého měděného plechu s matným černým povrchem o průměru 0,15 m, nebo 0,10 m s povrchem pokrytým černým polyuretanem, v jejímž středu je teplotní čidlo (rtuťový teploměr, termočlánek, odporový teploměr). V ustáleném stavu je sálavý

tepelný tok z prostředí do kulové baňky v rovnováze s konvektivním tepelným tokem z povrchu koule do prostředí. V ustáleném stavu se ztotožní teplota povrchu baňky s teplotou čidla na výsledné teplotě  $t_g$ .

Přípustné hodnoty operativní a výsledné teploty pro pracovní prostředí jsou uvedeny v Nařízení vlády č. 93/2012 Sb. [17]. Jsou zde uvedeny v závislosti na vykonávané činnosti (třídě práce, nebo energetickém výdeji) a použitím oděvu (tepelném odporu oděvu). Současně je zde uveden přípustný rozsah rychlostí proudění vzduchu a relativní vlhkosti. Jednotlivé hodnoty jsou uvedeny v tabulkách, a to pro pracoviště přirozeně nebo nuceně větraná a pro klimatizovaná pracoviště tř. I a IIa.

Pro hodnocení tepelného stavu prostředí v obytných místnostech některých staveb, nebo v prostorách pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých se používá výsledná teplota měřená kulovým teploměrem  $t_g$ .

Požadavky na výslednou teplotu kulového teploměru v obytných místnostech některých staveb, např. ubytovacích zařízení, hal kulturních a sportovních zařízení, ústavů sociální péče, výstavišť, staveb pro obchod a dalších jsou uvedeny ve Vyhlášce č.6/2003 Sb. [18].

Požadavky na výsledné teploty v prostorách pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých jsou uvedeny ve Vyhlášce č.343/2009 Sb. [20].

### **Ukazatele PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu**

Pro **hodnocení tepelného komfortu prostředí** se používá norma ČSN ISO 7730 [8], která hodnotí tepelný komfort prostředí **pomocí ukazatelů PMV a PPD**.

Ukazatel PMV předpovídá střední tepelný pocit podle sedmistupňové stupnice

- +3 horko,
- +2 teplo,
- +1 mírně teplo,
- 0 neutrálně,
- 1 mírně chladno,
- 2 chladno,
- 3 zima.

Ukazatel PMV je možné vypočítat z energetického výdeje, tepelného odporu použitého oděvu, teploty vzduchu, střední radiační teploty, vlhkosti a rychlosti proudění vzduchu dle rovnic uvedených v [8].

Ukazatel PPD předpovídá procentuální podíl osob, které budou nespokojeny s tepelnými podmínkami prostředí (5% nespokojených – tepelná pohoda, 10% – přípustné podmínky, 20% – přijatelné podmínky). Je – li známa hodnota PMV, je možné PPD odečíst z grafu nebo vypočítat z rovnice, které jsou uvedeny v [8].

Ukazatele PMV a PPD hodnotí tepelný komfort prostředí pro tělo celkově.

Citovaná norma také vyjadřuje **místní tepelný diskomfort**, který může být způsoben průvanem, vertikálním rozdílem teplot vzduchu, příliš teplou nebo chladnou podlahou nebo asymetrií radiační teploty.

Diskomfort v důsledku průvanu je vyjádřen, jako procento osob obtěžovaných průvanem DR. Je možné ho vypočítat z místní teploty a rychlosti vzduchu a z místní intenzity turbulence.

Procento nespokojených PD vlivem vertikálního rozdílu teploty vzduchu je zde vyjádřeno závislostí na vertikálním rozdílu teplot mezi hlavou a kotníky.

Procento nespokojených PD vlivem příliš teplé nebo chladné podlahy je vyjádřeno v závislosti na teplotě podlahy.

Procento nespokojených PD v důsledku asymetrie radiální teploty je zde vyjádřeno pro asymetrii způsobenou teplým stropem, chladnou stěnou, chladným stropem a teplou stěnou.

### Ukazatel WBGT

V horkém prostředí se pro hodnocení tepelného stavu používá tepelná zátěž osob pohybujících se v horkém prostředí. Dle ČSN ISO 7243 [10] je definován tzv. **ukazatel WBGT** (teploty mokrého a kulového teploměru), který slouží ke stanovení tepelné zátěže osob. Pro prostory budov a pro venkovní prostory bez slunečního záření se ukazatel WBGT počítá ze vztahu

$$WBGT = 0,7 t_{mw} + 0,3 t_g \quad (2.24)$$

a pro venkovní prostory se slunečním zářením se počítá ze vztahu

$$WBGT = 0,7 t_{mw} + 0,2 t_g + 0,1 t, \quad (2.25)$$

kde

$t_{mw}$  [°C] je teplota přirozeně větraného mokrého teploměru,

$t_g$  [°C] – teplota kulového teploměru (o průměru 150 mm),

$t$  [°C] – teplota vzduchu v místě měření.

Takto získané údaje jsou pak srovnány s referenčními hodnotami uvedenými v normě [10].

Metoda je určena pro hodnocení průměrného účinku tepla na člověka během doby jeho činnosti, není vhodná k hodnocení tepelné zátěže ve velmi krátkých časových úsecích ani pro tepelné zátěže blízké tepelnému komfortu.

### Ekvivalentní teplota $t_{eq}$

Výše uvedené teploty operativní a výsledná nejsou vhodné pro posuzování tepelných podmínek v kabinách vozidel, poněvadž zde vnější tepelná zátěž v kombinaci se systémem větrání, vytápění či klimatizace vozidla vytváří mikroklima, které může v prostoru a čase značně kolísat. **Pro posuzování tepelných podmínek v kabinách vozidel se používá dle ČSN EN ISO 14505–2 [11] ekvivalentní teplota  $t_{eq}$ .** Tato teplota je definována jako teplota imaginárního uzavřeného prostoru při střední radiální teplotě rovné teplotě vzduchu a nulové rychlosti proudění vzduchu, ve kterém osoba sdílí celkový tepelný tok konvekcí a radiací jako ve skutečném nestejnorodém prostředí. Ekvivalentní teplota se může také použít k posuzování tepelných podmínek v dalších omezených prostorech s asymetrickými klimatickými podmínkami.

V praxi se ekvivalentní teplota stanoví a definuje vztahem

$$t_{eq} = t_p - \frac{\dot{q}_m}{\alpha_{cel}}, \quad (2.26)$$

kde

$t_p$  [°C] je povrchová teplota,

$\dot{q}_m$  [W.m<sup>-2</sup>] – hustota metabolického tepelného toku,

$\alpha_{cel}$  [W.m<sup>-2</sup>K] – celkový součinitel přestupu tepla konvekcí a radiací.

Stanovení  $t_{eq}$  je vhodné provádět pomocí tepelných figurín nebo zahříváných čidel (plochých nebo elipsoidních).

Používá se ekvivalentní teplota celého těla, segmentová ekvivalentní teplota, tj. pro jednotlivé části těla a také směrová a všesměrová ekvivalentní teplota.

V citované normě [11] jsou uvedeny hodnoty  $t_{eq}$  za podmínky tepelně neutrální situace (tepelné pohody) v závislosti na druhu činnosti a oděvu.

## 2.2 ČISTOTA VZDUCHU V MÍSTNOSTECH

Vzduch v místnostech může být znečišťován plynnými škodlivinami, různými zápachy, prachem, choroboplodnými zárodky, ale také nadměrným teplem sálavým i konvekčním.

Plyny a páry unikající z výrobních zařízení tvoří velkou skupinu průmyslových škodlivin. K odstraňování plynných škodlivin je nejvýhodnější odsávání přímo v místě jejich vzniku. I v tomto případě musíme však počítat s jistým únikem škodlivin do pracovního prostředí a celkovým větráním pak musíme udržovat jejich koncentrace pod nejvyšší přípustnou hodnotou.

V místech kde pobývají lidé, přichází do ovzduší při dýchání  $\text{CO}_2$  a vodní pára. Vydechaný vzduch obsahuje přibližně objemově 4 %  $\text{CO}_2$ , 5 % vodní páry, 16 % kyslíku a 75 % dusíku. Zvyšování koncentrace  $\text{CO}_2$  ve vzduchu je vždy spojeno s jistým poklesem obsahu kyslíku. Tento pokles však nemá nepříznivý vliv na dýchání, neboť ani při dosažení nejvyšší přípustné koncentrace  $\text{CO}_2$  (0,5 % obj.) obsah kyslíku by neklesl pod 20,5 % obj. a tvrzení, že v místnosti je vydýchaný kyslík neodpovídá skutečnosti. Většinou jde o nepříjemný pocit, vyplývající z porušení tepelné pohody při velké relativní vlhkosti vzduchu, způsobené vydechanou vodní parou.

Velmi častou příčinou zhoršování jakosti vzduchu v místnostech jsou zápachy (oděry). V obytných a občanských budovách jsou zdroji zápachů nejčastěji kuchyně, záchody, laboratoře atd. V obsazených shromažďovacích místnostech je vzduch znečišťován lidskými pachy, které vznikají rozpadem epitelu kůže a sliznic a rozkladem výpotků a jiných sekretů. Velmi nepříjemný je také zápach z oděvů a z nábytkových textilií. V průmyslových provozovnách jsou zdroji pronikavých zápachů různé chemické látky používané při technologických procesech. Pachy se odstraňují výměnou vzduchu větráním a někdy také rozstříkáváním vonných látek, tzv. dezodorizací vzduchu.

Vzduch v uzavřených místnostech je také znečišťován prachem, který vzniká rozkladem a rozpadem anorganických i organických látek. V některých průmyslových odvětvích vniká při výrobních procesech tzv. průmyslový prach, jehož některé druhy (např. křemičitý nebo azbestový) jsou velmi škodlivé.

V uzavřených místnostech, zejména kde se shromažďuje větší počet osob, obsahuje vzduch vždy choroboplodné zárodky (bakterie, viry, plísně apod.). Choroboplodné zárodky nemohou ve vzduchu existovat volně, ale jen usazené na nosičích, např. částicích prachu, kapénkách atd., proto nejjednodušším způsobem jejich odstraňování ze vzduchu je intenzivní větrání a filtrace vzduchu. Ve zdravotnictví nebo farmaceutickém průmyslu se vzduch také chemicky nebo fyzikálně dezinfikuje. K chemické dezinfekci se používá kapalných dezinfekčních prostředků, které se rozstříkují přímo v místnosti. Velmi účinná je fyzikální dezinfekce prozařováním přiváděného větracího vzduchu nebo přímo vzduchu v místnosti ultrafialovými paprsky, které ničí všechny druhy mikroorganismů ve vzduchu.

Také nadměrné teplo, projevující se vysokými teplotami vzduchu a intenzitami sálání, počítáme mezi škodliviny (nadměrně zatěžují cévní systém).

Jako ochrana proti nadměrnému sálavému teplu se provádí tato opatření:

- Snížení intenzity sálání zdroje (snížením povrchové teploty zdroje nebo snížením součinitele sálání povrchu zdroje).
- Clony proti sálání – mechanické nebo vodní.
- Ochlazování pracovníka pomocí vzduchové sprchy, přímého rozprašování vody nebo pomocí sálavých ochlazovacích panelů.
- Tepelná izolace pracovníka oděvem. Použití vícevrstvého oděvu, světlého oděvu, polepy oděvu hliníkovou fólií, nebo oděv z pokovené tkaniny. Ve zvlášť horkém prostředí se používá oděv chlazený vzduchem, např. při čištění kotlů, opravách pecí.

Rozdělení škodlivých látek podle biologických účinků rozeznává **látky toxické**, které se vstřebávají v plicích a působí na celý organismus, prach **fibrogenní**, který vyvolává zvýšení bujení vaziva v plicích. Látky karcinogenní mohou vyvolat zhoubné bujení tkáně. Látky **alergenní** mohou být příčinou např. průduškového astma, kožních ekzémů aj. **Inertní** látky nemají žádné uvedené účinky

### 2.2.1 Hygienické limity látek v ovzduší

Hygienické limity látek v ovzduší pracovišť a způsoby jejich měření stanovuje Nařízení vlády č. 93/2012 Sb. [17].

*Pro plyny, páry a aerosoly* uvádí přípustné expoziční limity *PEL* a nejvyšší přípustné koncentrace *NPK-P*. *PEL* jsou celosměnové časově vážené průměry koncentrací v pracovním ovzduší, jímž může být vystaven zaměstnanec v osmihodinové nebo kratší směně týdenní pracovní doby, aniž by u něho došlo i při celoživotní pracovní expozici k poškození zdraví. *NPK-P* je taková koncentrace chemické látky, které mohou být zaměstnanci exponováni nepřetržitě po krátkou dobu, aniž by pocítovali dráždění očí nebo dýchacích cest nebo bylo ohroženo jejich zdraví a spolehlivost výkonu práce. S hodnotou *NPK-P* se porovnává časově vážený průměr koncentrace chemické látky měřený po dobu nejvýše 15 minut. Takové úseky s průměrnou koncentrací vyšší než *NPK-P*, ale nepřesahující hodnotu *PEL*, smí být během osmihodinové směny nejvýše 4 s odstupem nejméně jedné hodiny.

*Pro prach* výše citované nařízení vlády uvádí přípustné expoziční limity, a to pro celkovou koncentraci (vdechovatelnou frakci) prachu označenou *PEL<sub>c</sub>* a pro respirabilní frakci prachu označenou *PEL<sub>r</sub>*. Vdechovatelnou frakci prachu se rozumí soubor částice polévatého prachu, které mohou být vdechnuty nosem nebo ústy. Respirabilní frakci se rozumí hmotnostní frakce vdechnutých částic, které pronikají do té části dýchacích cest, kde není řasinkový epitel a do plicních sklípků.

Limitní koncentrace chemických ukazatelů ve vnitřním prostředí pobytových místností některých staveb, např. ubytovacích zařízení, hal kulturních a sportovních zařízení, ústavů sociální péče, výstavišť, staveb pro obchod a dalších jsou uvedeny ve Vyhlášce č.6/2003 Sb. [18].

Koncentrace škodlivin se vyjadřují koncentracemi hmotnostními [ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] nebo objemovými [% obj.], [ppm]. Jednotka ppm (parts per milion) je  $10^{-4}$  % obj.

### 2.2.2 Účinek škodlivin na lidský organismus

Škodlivý účinek částečkových a plyných škodlivin na lidský organismus je závislý jednak na celkovém množství škodliviny, které se do těla dostává, jednak na její koncentraci. Účinky mohou být buď místní, nebo celkové (po absorpci v těle) a jejich charakter může být dráždivý, toxický nebo kumulovaný.

**Místní účinek** se může projevit v místě kontaktu nebo vstupu do organismu (např. horní cesty dýchací, nosní sliznice, hrtan, průduškový epitel, plicní tkáň, v zažívacím ústrojí, na

kůži, spojivce oka aj.). Místní účinky se projevují drážděním, které může být mechanické nebo chemické. Vyšší koncentrace pak způsobují zánětlivé změny. K dráždivým škodlivinám patří např. oxid siřičitý, ozón, oxidy dusíku, chlor, fluoridy, sirovodík, aldehydy, ketony, prach textilní (bavlna, len, konopí, syntetická vlákna), živočišný (peří, vlna, srst), rostlinný (mouka, čaj, káva, koření, ze dřeva).

**Působení škodlivin po absorpci v těle** může mít průběh mnohem složitější.

Plynné škodliviny, které se absorbují do krve, se přenáší do ostatních částí těla, kde mohou vyvolávat různé škodlivé účinky. Část absorbovaného plynu může být z cirkulující krve vyloučena v plicích, část v ledvinách.

Škodlivost tuhých a kapalných škodlivin závisí nejen na jejich chemickém složení a koncentraci ve vzduchu, ale i na velikosti částic. V nosních dutinách a horních cestách dýchacích dochází k odlučování větších částic – přibližně nad 5  $\mu\text{m}$ . Částice o menších rozměrech se dostávají do dolních cest dýchacích. Nerozpustné částice, které se dostanou do dolních cest dýchacích, mohou způsobit tzv. zaprášení plic (např. uhelný prach), nebo částice fibrogenní, tj. prach, který obsahuje více než 1 % fibrogenní složky (křemen, kristobalit, gama oxid hlinitý, azbest) působí fibrogenní změny na tkáních plic (silikóza, azbestóza). Fibrogenní účinek azbestu se hodnotí jako karcinogenní. Částice o velikosti menší než 0,1  $\mu\text{m}$  se znovu vydechují. Nejškodlivější jsou prachy respirabilní, ve kterých převažují částice o velikostech dovolujících volné pronikání do plicních sklípků, tj. o velikostech asi 0,1 až 5  $\mu\text{m}$ . Rozpustné škodliviny pronikají s tělními tekutinami do organismu. Některé škodliviny jsou vylučovány ledvinami, jiné střevním traktem. Může docházet i k jejich hromadění v některých orgánech a mohou vyvolávat funkční a strukturální změny.

## 2.3 ELEKTROIONTOVÉ MIKROKLIMA

Na pohodu prostředí mají vliv také elektrické jevy v uzavřených prostorech, které vytvářejí tzv. elektroiontové mikroklima. Elektroiontové mikroklima je stav daný především počtem volných iontů ve vzduchu. Podle velikosti rozeznáváme ionty lehké, střední a těžké a podle polarity rozeznáváme ionty kladné a záporné. Velikost i polarita iontů určuje jejich biologické působení na člověka. Příznivé působení na člověka je přičítáno lehkým záporným iontům.

Porušení normálních elektrických poměrů v ovzduší, na které se člověk za dlouhou dobu svého vývoje adaptoval, vyvolává narušení tvorby lehkých záporných iontů a u člověka vyvolává pocity nepohody – únavu, nespavost, bolesti hlavy, nevolnosti až závratě.

K porušení normálních elektrických poměrů dochází někdy přírozeným způsobem, např. při atmosférických poruchách a náhlých atmosférických změnách, častěji však umělým způsobem – deformací přirozeného elektrického pole Země stavební konstrukcí budov, znečištěním vzduchu zejména tuhými a kapalnými aerosoly, ale také provozem obrazovek počítačů, TV a úpravou vzduchu klimatizací. Poměrně nejmenší rušení elektrického pole a tvorby lehkých záporných iontů je u dřevěných staveb a tradičních cihlových staveb s dřevěnými stropy. Železobetonové stavby a stavby s ocelovým skeletem tvoří kolem vnitřního prostoru Faradayovu klec, a tím velmi omezují tvorbu lehkých záporných iontů. Počet lehkých záporných iontů je tím větší, čím čistší je vzduch. S rostoucím znečištěním, zejména tuhými a kapalnými aerosoly klesá počet lehkých iontů a naopak vzrůstá počet středních a těžkých iontů, které působí na pohodu člověka negativně.

Minimální počet lehkých záporných iontů v dýchací zóně by měl činit 200 až 300 v  $\text{cm}^3$  a optimální počet je 1000 až 5000 v  $\text{cm}^3$ .

Technická zařízení, kterými lze generovat tyto vzdušné ionty, jsou ionizátory vzduchu. Pracují nejčastěji na principu využití elektrického pole, nebo hydrodynamického Lenardova

jevu. U prvního typu ionizátorů se využívá vysokého stejnosměrného napětí (až 10000 V) v zařízeních deskového či válcového provedení. Jejich podstatnou nevýhodou je současná tvorba ozónu a oxidů dusíku. U druhého typu ionizátorů je využíváno prudkého nárazu vody na překážku, při němž dochází k jejímu rozprašování a tříštění na jemné částičky a na povrchu částiček vzniká záporný elektrický náboj, který působí na molekuly vzdušných plynů a dochází ke vzniku záporných iontů. Výhoda tohoto typu ionizátorů je skutečnost, že se netvoří ozón ani oxidy dusíku.

Ionizátory vzduchu současně vzduch i čistí. Mechanismus čištění vzduchu ionizací spočívá v tom, že rozptýlené částice prашného aerosolu se nabíjí ionty, tvoří kondenzační jádra, která v důsledku větší hmotnosti a vlivem tíže rychleji sedimentují. Kromě toho vlivem elektrostatických sil vznikajících při ionizaci se nabitě částice aerosolu usazují na okolních plochách. Jsou vyráběny i osobní ionizátory pro alergiky určené k zavěšení na krk a ionizátory do automobilů.



## 3. VĚTRÁNÍ

### 3.1 ROZDĚLENÍ VĚTRÁNÍ

Účelem větrání je zajistit čisté ovzduší ve vnitřních prostorech pracovních, obytných i společenských. Dosahuje se toho výměnou vzduchu za venkovní. Vzduch se může vyměňovat v opakujících se časových intervalech – občasné větrání, nebo se vyměňuje spojitě – trvalé větrání.

Výměnu vzduchu lze provádět v celém prostoru nebo v jeho části. Podle toho rozlišujeme větrání:

- Celkové, které se navrhuje tam, kde nelze předem určit místa vzniku škodlivin, nebo kde jsou zdroje škodlivin rovnoměrně rozmístěny (např. shromažďovací místnosti).
- Místní, které se navrhuje do prostorů s většími zdroji škodlivin soustředěnými do vymezeného místa. Škodliviny se odvádějí od zdroje místním odsáváním, nebo se na pracoviště do míst pobytu lidí přivádí venkovní vzduch - místní zavzdušnění (vzduchová sprcha, oáza, clona).

Systémy větrání se dělí podle toho, zda k výměně vzduchu dochází samočinně (vlivem přirozeného tlakového spádu vznikajícího účinkem rozdílných hustot vzduchu uvnitř a vně větraného prostoru a účinkem větru), nebo nuceně (ventilátory). Podle tohoto hlediska rozlišujeme:

- Větrání přirozené, které rozdělujeme na infiltraci, větrání okny (provětrávání), aeraci a šachtové větrání.
- Větrání nucené, které může mít ventilátory jen pro přívod vzduchu, nebo jen pro odvod vzduchu, popřípadě pro přívod i odvod vzduchu. Podle dimenzování obou skupin ventilátorů, může být poměr objemových toků nuceně přiváděného  $\dot{V}_p$  a nuceně odváděného vzduchu  $\dot{V}_o$ , označovaný jako součinitel větrací rovnováhy  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{\dot{V}_p}{\dot{V}_o} \quad , \quad (3.1)$$

roven, větší, nebo menší než 1.

Při  $\varepsilon = 1$  – rovnotlaké větrání, při kterém nevzniká činností větrání žádný rozdíl tlaků uvnitř a vně větraného prostoru; používá se, nemá-li docházet k proudění vzduchu mezi okolním prostředím a větranou místností;

$\varepsilon > 1$  – přetlakové větrání, které se používá tam, kde se přiváděný vzduch upravuje a kde je třeba zabránit vnikání vzduchu ze sousedních místností (např. operační sály, výroba televizních obrazovek, řídicí kabiny);

$\varepsilon < 1$  – podtlakové větrání, které se navrhuje tam, kde je nutno zabránit pronikání vzduchu s přimíšenými škodlivinami do okolních prostorů (větrání laboratoří, sociálních zařízení apod.).

Dnes se opět začíná používat větrání hybridní, tj. kombinace přirozeného a nuceného větrání, kdy oba systémy pracují samostatně. Je to inteligentní větrací systém, který může automaticky přepnout mezi přirozeným a nuceným větráním. V době příznivých klimatických poměrů je v činnosti větrání přirozené, nepostačuje-li, uvede se do provozu větrání nucené.

### 3.2 VÝPOČET VÝMĚNY VZDUCHU PŘI VĚTRÁNÍ

Průtok venkovního vzduchu při celkovém větrání můžeme určit:

- a) z bilance škodlivin ve větraném prostoru,
- b) z tepelné bilance větraného prostoru,
- c) z bilance vlhkosti ve větraném prostoru,
- d) z dávek vzduchu na osobu,
- e) na základě doporučené intenzity výměny vzduchu.

**a) Stanovení objemového toku venkovního vzduchu z hmotnostní bilance škodlivin ve větraném prostoru,** kterou pro časový interval  $d\tau$  vyjadřuje diferenciální rovnice větrání

$$O dk = \dot{V}_p k_p d\tau + S d\tau - \dot{V}_p k d\tau, \quad (3.2)$$

kde  $O$  je objem místnosti [ $\text{m}^3$ ],

$S$  – množství vznikající škodliviny [ $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ ] (předpokládáme rovnoměrné rozložení škodliviny v místnosti),

$\dot{V}_p$  – objemový tok přiváděného vzduchu [ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ] (předpokládáme, že se stejné množství vzduchu odvádí),

$k_p$  – koncentrace škodliviny v přiváděném vzduchu [ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ],

$k$  – okamžitá koncentrace škodliviny [ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ],

$dk$  – změna koncentrace škodliviny v čase  $d\tau$ .

Řešením této rovnice v časovém intervalu od 0 do  $\tau$  pro změnu koncentrace škodliviny v místnosti z  $k_1$  na  $k_2$  dostaneme množství vyměňovaného vzduchu

$$\dot{V}_p = \frac{S}{k_2 - k_p} - \frac{O}{\tau} \frac{k_2 - k_1}{k_2 - k_p} [\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]. \quad (3.3)$$

Při dlouhodobém větrání a rovnoměrném nepřetržitěm vzniku škodliviny lze použít  $\tau = \infty$ .  
Rovnice (3.3) pak dává

$$\dot{V}_p = \frac{S}{k_2 - k_p} [\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]. \quad (3.4)$$

**b) Stanovení objemového toku venkovního vzduchu z tepelné bilance větraného prostoru.** Při větrání místností se zdroji tepla (od technologických zařízení, lidí, osvětlení, sluneční radiace a prostupu tepla pláštěm budovy) o celkovém tepelném toku  $\dot{Q}$  [W] je objemový tok venkovního větracího vzduchu

$$\dot{V}_p = \frac{\dot{Q}}{\rho c_p (t_o - t_p)} [\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}], \quad (3.5)$$

kde  $\rho$  je hustota vzduchu [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],

$c_p$  – měrná tepelná kapacita vzduchu při konstantním tlaku [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ],

$t_o, t_p$  – teplota odváděného a přiváděného vzduchu [ $^{\circ}\text{C}$ ].

**c) Stanovení objemového toku venkovního vzduchu z bilance vlhkosti větraného prostoru.** Potřebné množství venkovního vzduchu přiváděného do větraného prostoru, které má zajistit požadovanou vlhkost v místnosti je dáno vztahem

$$\dot{V}_p = \frac{\dot{m}_w}{\rho_v (x_o - x_p)} \quad [\text{m}^3 \text{s}^{-1}], \quad (3.6)$$

kde  $\dot{m}_w$  je hmotnostní tok vlhkosti vyvíjené v místnosti  $[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$ ,

$\rho_v$  – hustota suchého vzduchu  $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ ,

$x_o, x_p$  – měrná vlhkost vzduchu odváděného a přiváděného  $[\text{kg}/\text{kg s.v.}]$ .

**d) Stanovení objemového toku venkovního vzduchu z dávek vzduchu na osobu.** Používá se pro prostory, kde se zhoršuje kvalita vzduchu v důsledku přítomnosti lidí.

Pro pracovní prostředí minimální množství přiváděného venkovního vzduchu na zaměstnance stanovuje nařízení vlády č. 93/2012 Sb. [17]. Hodnoty dávek vzduchu na osobu jsou zde uvedeny především s ohledem na vykonávanou práci:

25  $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$  na osobu – pro práci s energetickým výdejem do 105  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ , na pracovišti bez přítomnosti chemických látek, prachů nebo jiných zdrojů znečištění

50  $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$  na osobu – pro práci s energetickým výdejem do 105  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ , na pracovišti s přítomností chemických látek, prachů nebo jiných zdrojů znečištění

70  $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$  na osobu – pro práci s energetickým výdejem od 106 do 200  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

90  $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$  na osobu – pro práci s energetickým výdejem od 201 do 301 a více  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Minimální množství venkovního vzduchu musí být zvýšeno při další zátěži větraného pracoviště např. teplem nebo pachy o 10  $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$  na osobu.

Hodnoty dávek přiváděného venkovního vzduchu na 1 žáka v prostorách zařízení pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých jsou uvedeny ve Vyhlášce č. 343/2009 Sb. [20].

**e) Stanovení objemového toku venkovního vzduchu na základě intenzity výměny venkovního vzduchu.** Pro některé druhy místností bez větších zdrojů škodlivin, jako např. šatny, obytné místnosti apod., se navrhuje větrací zařízení na základě doporučených hodnot intenzity výměny venkovního vzduchu  $n$ , tj. poměru průtoku venkovního vzduchu přiváděného do místnosti k objemu místnosti

$$n = \frac{\dot{V}_p}{O} \quad [\text{h}^{-1}], \quad (3.7)$$

kde  $\dot{V}_p$  je objemový tok venkovního vzduchu  $[\text{m}^3 \text{h}^{-1}]$ ,

$O$  – objem místnosti  $[\text{m}^3]$ .

### 3.3 PROUDĚNÍ VZDUCHU VE VĚTRANÉM PROSTORU

Pohodu osob ve větraných a klimatizovaných prostorech podstatně ovlivňuje proudění vzduchu. Proto ke správnému řešení větrání prostorů patří nejen stanovení množství přiváděného venkovního vzduchu, ale i návrh vhodné distribuce vzduchu ve větraném prostoru. Hlavním úkolem distribuce vzduchu je zajistit požadovaný stav vzduchu především v pracovní či pobytové oblasti.

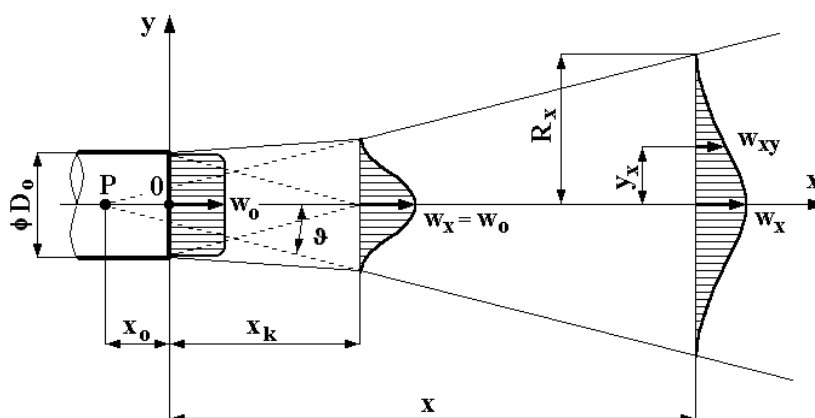
Z obecného hlediska proudění může být laminární nebo turbulentní. Ve větraných prostorech je téměř vždy proudění turbulentní. Proud vzduchu přiváděný do relativně rozměrného prostoru, neomezeného stěnami a předměty v tomto prostoru, se nazývá volný proud. Proud, jejichž šíření je ovlivněno stěnami a předměty v prostoru se nazývají omezené. Proud, který se šíří podél stěn, které se mohou rozšiřovat jen na jedné straně, jsou nazývány poloohraničené. Má-li prostředí stejné fyzikální vlastnosti jako proud a je-li klidné, proud se nazývá zatopený.

Podle charakteru proudění v prostoru se rozlišují dva základní způsoby přívodu vzduchu, a to přívod osamocenými vyústkami, jejichž rozměry jsou malé proti rozměrům místnosti a přívod velkoplošnými vyústkami. Přívod velkoplošný vyústkami je vhodný zejména pro místnosti s intenzivní výměnou vzduchu a při přísnějších nárocích na tzv. bezprůvanové větrání.

### 3.3.1 Volný izotermní proud

Základem pro objasnění vlastností proudů z vyústek je volný izotermní proud (zatopený proud), jehož schéma je na obr. 3.1. Vzduch o teplotě shodné s teplotou v místnosti je zde přiváděn otvorem kruhového průřezu. Turbulentní proud vzduchu se směrem od výstupního otvoru kuželovitě rozšiřuje. Částice proudu, vykonávající příčný fluktuální pohyb, předávají hybnost částicím okolního klidného vzduchu, tyto příčně pronikají do proudu a jsou jím unášeny. S rostoucí vzdáleností od otvoru se množství proudícího vzduchu stále zvětšuje, současně se také zvětšuje průřez proudu a naopak se zmenšuje jeho rychlost. Statický tlak po délce proudu zůstává prakticky konstantní a rovný tlaku okolního klidného prostředí.

Je-li teplota přiváděného vzduchu stejná jako teplota vzduchu okolního, šíří se proud v prostoru přímočaře ve směru daném osou vyústky. Hranice proudu tvoří dvě na sebe navazující části kuželových ploch. V proudu rozlišujeme krajní oblast o délce  $x_k$  a tzv. hlavní oblast podle významu pro větrání. Pro proud z vyústky s volným průřezem je úhel rozšiřování proudu v hlavní oblasti  $2\theta \approx 25^\circ$ . Obrysové přímky proudu v hlavní oblasti se protínají na ose proudu v pólu P.



Obr. 3.1 Schéma volného izotermního proudu z kruhové vyústky

V hlavní oblasti je volný proud z vyústky (kruhové nebo obdélníkové) podobný proudění z bodového zdroje tekutiny v pólu P. Vzdálenost pólu proudu od vyústky  $x_0$  je empirickou veličinou a je nutno ji stanovit pro každý typ vyústky experimentálně.

#### Směrné veličiny izotermních proudů

Pro inženýrské výpočty proudů se používají poloempirické vztahy, tzv. směrné veličiny proudu.

V krajní oblasti zůstává osová rychlost proudu  $w_x$  konstantní a rovná se výtokové rychlosti z vyústky (otvoru)  $w_0$ . Část proudu v krajní oblasti, v níž rychlost je rovna rychlosti z vyústky, je nazývána jádro proudu. Délka krajní oblasti

$$x_k \approx 7 S_o^{0,5},$$

kde  $S_o$  je průřez proudu z vyústky  $S_o = \alpha \kappa S_c$ ,  $S_c$  je jmenovitý (obrysový) průřez vyústky,  $\alpha$  je součinitel zúžení (obvykle se volí 0,9),  $\kappa$  je poměr mezi volným průřezem, tj. celkovou plochou otvorů vyústky, a jmenovitým průřezem.

V hlavní oblasti se osová rychlost  $w_x$  postupně zmenšuje a ve vzdálenosti  $x$  od pólu proudu (ve větší vzdálenosti od vyústky lze vzdálenost vyústky od pólu  $x_o$  zanedbat) je vyjádřena vztahem pro poměrnou osovou rychlost

$$\frac{w_x}{w_o} = K_S \frac{\sqrt{S_o}}{x}, \quad (3.8)$$

kde  $K_S$  je konstanta vyústky vztažená k průřezu proudu z vyústky  $S_o$ . Konstanta vyústky se určuje pro každý typ vyústky experimentálně. Hodnota konstanty  $K_S$  pro vyrovnanou rychlost ve výusti je maximálně dosažitelná a má hodnotu  $K_S = 7$ .

Objemový tok  $\dot{V}_x$ , střední rychlost podle průřezu  $w_{sx}$ , střední rychlost podle hybnosti  $w'_{sx}$  a průměr proudu  $D_x$  v hlavní oblasti proudu lze vypočítat z následujících směrných veličin pro poměrný objemový tok (rozptyl)  $\dot{V}_x/\dot{V}_o$ , pro poměrnou střední rychlost podle průřezu  $w_{sx}/w_o$ , pro poměrnou střední rychlost podle hybnosti  $w'_{sx}/w_o$  a ze vztahu pro průměr proudu  $D_x$

$$\frac{\dot{V}_x}{\dot{V}_o} = 2 \frac{x}{\sqrt{S_o} K_S}, \quad (3.9)$$

$$\frac{w_{sx}}{w_o} = 0,258 \frac{\sqrt{S_o} K_S}{x}, \quad (3.10)$$

$$\frac{w'_{sx}}{w_o} = \frac{K_S \sqrt{S_o}}{2x} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_x}, \quad (3.11)$$

$$D_x = 2x \operatorname{tg} \vartheta. \quad (3.12)$$

Střední rychlost podle průřezu proudu je definována vztahem  $w_{sx} = \dot{V}_x/S_x$ , kde  $S_x$  je průřez proudu ve vzdálenosti  $x$  od pólu.

Střední rychlost podle hybnosti  $w'_{sx}$  je definována následovně. Protože statický tlak po délce proudu zůstává prakticky konstantní a rovný tlaku okolního klidného vzduchu, musí být také hybnostní tok proudu v kterémkoliv průřezu stejný a je dán součtem hybnostního toku vzduchu přiváděného a hybnostního toku vzduchu do proudu strženého. Platí tedy rovnice

$$\dot{V}_o \rho w_o + \dot{V}_2 \rho w_2 = (\dot{V}_o + \dot{V}_2) \rho w'_{sx},$$

kde  $\dot{V}_o$  a  $\dot{V}_2$  je objemový tok vzduchu přiváděného a vzduchu do proudu strženého,  $\rho$  je hustota vzduchu,  $w_o$  a  $w_2$  je rychlost vzduchu přiváděného a vzduchu do proudu strženého.

Příčný rychlostní profil v hlavní oblasti proudu lze vyjádřit podle Schlichtinga vztahem

$$\frac{w_{x,y}}{w_x} = \left[ 1 - \left( \frac{2y_x}{D_x} \right)^{1,5} \right]^2. \quad (3.13)$$

Volný proud z vyústky obecného tvaru (např. obdélníkové) se po krátkém úseku, kde je jeho průřez daný tvarem vyústky, mění postupně na průřez kruhový. Pro výpočet parametrů tohoto proudu lze proto použít uvedené rovnice pro kruhový proud (3.8), (3.9), (3.10), (3.11), (3.12), (3.13).

Proud vytékající ze štěrbinové vyústky (dlouhé štěrbiny) se nazývá ploché proud. Délka krajní oblasti

$$x_k \approx 7,2 b_o,$$

kde  $b_o$  je šířka štěrbiny.

Stejně jako v předešlém případě je i u plochého proudu z vyústky s volným průřezem úhel rozšíření proudu v hlavní oblasti  $2\vartheta \approx 25^\circ$ . Poměrná osová rychlost  $w_x/w_o$ , poměrný objemový tok  $\dot{V}_x/\dot{V}_o$  a šířka proudu v hlavní oblasti  $b_x$  jsou vyjádřeny vztahy

$$\frac{w_x}{w_o} = K_b \sqrt{\frac{b_o}{x}}, \quad (3.14)$$

$$\frac{\dot{V}_x}{\dot{V}_o} = \sqrt{2} \frac{\sqrt{x/b_o}}{K_b}, \quad (3.15)$$

$$b_x = 2 x \operatorname{tg} \vartheta, \quad (3.16)$$

kde  $K_b$  je konstanta štěrbinové vyústky.

Pro příčný rychlostní profil v hlavní oblasti plochého proudu platí vztah (3.13), kde za  $D_x$  dosadíme šířku plochého proudu  $b_x$ .

V literatuře jsou uváděny také poloempirické vztahy pro výpočet dalších parametrů plochých proudů v hlavní oblasti (např. střední rychlosti podle průřezu a střední rychlosti podle hybnosti) a vztahy pro výpočet parametrů kruhových a plochých proudů v krajní oblasti proudu. Někteří autoři ve svých poloempirických výpočtových vztazích namísto konstanty vyústky  $K_s$  nebo  $K_b$  používají součinitele vířivosti při výtoku  $a$ , který se obdobně jako konstanta vyústky určuje pro každý typ vyústky experimentálně.

### 3.3.2 Neizotermní proudy

Při přívodu teplejšího nebo chladnějšího vzduchu do větraného nebo klimatizovaného prostoru se mezi proudem a okolím sdílí nejen hybnost, ale i teplo. Spolu s poklesem rychlosti se vyrovnávají teploty. Bezrozměrné teplotní profily v hlavní oblasti proudu jsou s profily rychlostí vázány vztahem

$$\frac{t_{x,y} - t_i}{t_x - t_i} = \left( \frac{w_{x,y}}{w_x} \right)^{Pr_T}, \quad (3.17)$$

kde  $t_{x,y}$ ,  $w_{x,y}$  je teplota a rychlost v místě  $x$ ,  $y$ ,  $t_x$ ,  $w_x$  je teplota a rychlost v ose proudu ve vzdálenosti  $x$  od vyústky,  $t_i$  je teplota okolního vzduchu a  $Pr_T$  je turbulentní Prandtlovo číslo.

O stupni neizotermičnosti proudu rozhoduje poměr sil vztlačkových k silám setrvačným, působících na částice vzduchu, který je vyjádřen Archimédovým číslem. Pro poměry ve vyústce je Archimédovo číslo definováno vztahem

$$Ar_o = \frac{g l_o |T_o - T_i|}{w_o^2 T_i}, \quad (3.18)$$

v němž  $g$  je tíhové zrychlení,  $l_o$  je charakteristický rozměr vyústky (pro čtyřhrannou vyústku je to ekvivalentní průměr  $D_e = 1,128 \sqrt{S_o}$ ),  $T_o$  je teplota vzduchu ve výusti a  $T_i$  je teplota okolního vzduchu. Proud je mírně neizotermní při  $Ar_o \leq 0,001$  a značně neizotermní při  $Ar_o > 0,01$ .

U mírně neizotermních proudů, tj. proudů s teplotou přiváděného vzduchu jen málo odlišnou od teploty vzduchu v místnosti, lze předpokládat, že obdobně jako proudy izotermní, se v prostoru šíří přímočaře. Parametry mírně neizotermního volného proudu se počítají podle směrných veličin proudu izotermního vynásobených členem  $(T_i/T_o)^{0,5}$ .

U silně neizotermních proudů je nejvýraznějším účinkem vztlakových sil vertikální ohyb proudu. Rovnice osy neizotermního proudu pro výtok z kruhové vyústky o průměru  $D_o$ , skloněné pod úhlem  $\alpha$  k ose  $x$  (obr. 3.2) má tvar

$$y = x \operatorname{tg} \alpha + \frac{0,106}{\beta_o K_s} Ar_o \left( \frac{x}{\cos \alpha} \right)^3, \quad (3.19)$$

kde  $\beta_o$  je opravný součinitel na hybnost ve výtokovém průřezu.  $\beta_o = 1$  pro obdélníkový rychlostní profil v průřezu vyústky. V jiných případech  $\beta_o \approx \xi^{0,5}$ , kde  $\xi$  je součinitel odporu vyústky.

### 3.3.3 Obrazy proudění ve větraném prostoru

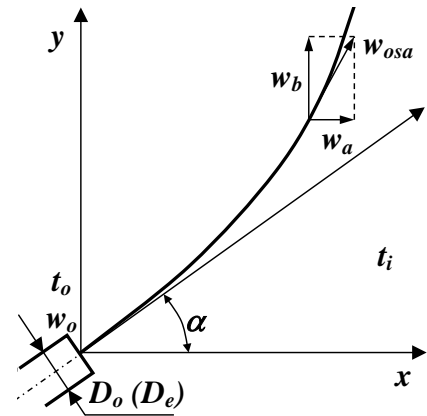
Představa o rychlostním a teplotním poli ve větraném prostoru (místnosti) je tzv. obraz proudění. Proudění ve větrané místnosti dělíme na primární a sekundární. Primární je proudění od větracích otvorů, sekundární je vyvolané primárními proudy. Zatopený proud strhává okolní vzduch, takže objem proudícího vzduchu se zvětšuje. Odváděcím otvorem se při rovnotlakém izotermním větrání odvádí stejný objem vzduchu, jako se přivedl a vzduch stržený do proudu z okolí cirkuluje v místnosti.

Charakter proudění vzduchu ve větrané místnosti určuje především:

- Počet, poloha a velikost přiváděcích otvorů (vyústek), výstupní rychlosti a teploty přiváděného vzduchu.
- Umístění, povrchová teplota a velikost zdrojů tepla a chladu v prostoru. Zdroje tepla podle své velikosti způsobují větší či menší stoupající proudy ohřátého vzduchu, které strhávají vzduch z okolí a v místnosti působí jako komíny. Zdroji chladu jsou např. okna a stěny venkovních zdí, po nichž ochlazený vzduch klesá dolů.

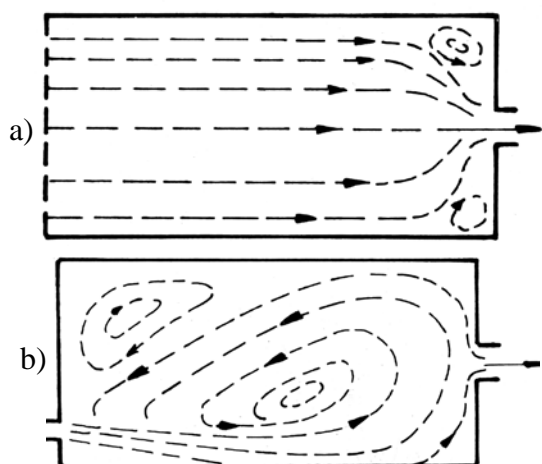
Pozn.: Pohyb strojních součástí, pohyb lidí a poloha odváděcích otvorů vzduchu mají jen malý podřadný vliv na obrazy proudění.

Při izotermním větrání ideální výměna vzduchu (ideální obraz proudění) nastává, přivádíme-li do místnosti vzduch malou rychlostí, celou stěnou a odvádíme otvorem v protilehlé stěně (obr. 3.3a).

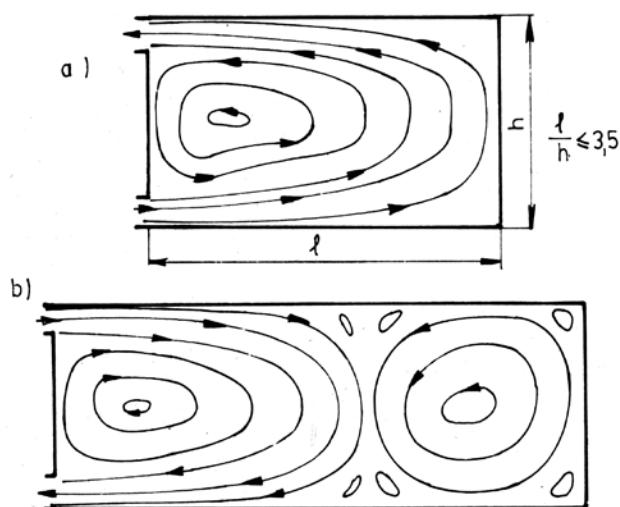


Obr. 3.2 Zakřivení osy neizotermního proudu

Zcela jinak vypadá proudění, přivádíme-li vzduch menší vyústkou (obr. 3.3b). V tomto případě vzniká v prostoru účinkem primárního proudu pohyb druhotný – sekundární. Přiváděným vzduchem se uvede do pohybu mnohem více vzduchu než, je odváděno.



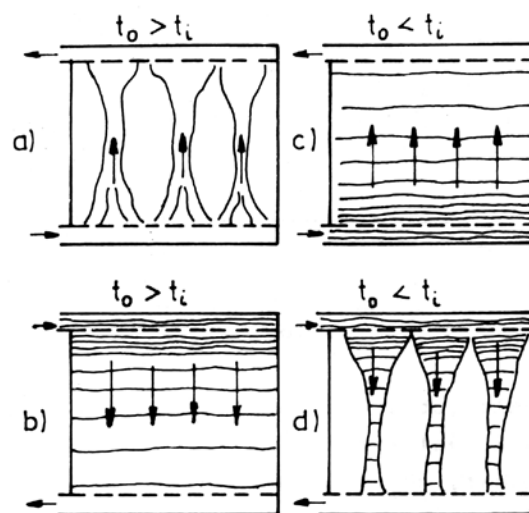
Obr. 3.3 Obrazy izotermického proudění vzduchu  
a) ideální (přívod celou stěnou),  
b) přívod vyústkou



Obr. 3.4 Obrazy proudění a hloubka izotermického větrání haly protáhlého průřezu

Na obr. 3.4 jsou obrazy proudění, pro případ, kdy se vzduch přivádí vyústkou ve spodní části stěny a odvádí vyústkou v horní části téže stěny, nebo naopak. Pro dlouhou halu (obr. 3.4b) je použitá výtoková rychlost přiváděného vzduchu malá, takže zadní část prostoru je nevětraná, nebo větraná jen velmi nedokonale. Je třeba poznamenat, že vzdálenost působení proudu z vyústky je v uzavřeném prostoru omezená. Při daném poměru  $l/h$  se hloubka větrání přiváděným vzduchem zvyšuje jen do určitého maxima ( $l/h \leq 3,5$ ) a nelze ji zvětšit nad tuto mez ani zvýšenou výtokovou rychlostí.

Při neizotermickém větrání jsou obrazy proudění ovlivňovány vztlakovými silami, které proudy zakřivují, zejména je-li vzduch přiváděn malou rychlostí. Je-li teplota přiváděného vzduchu  $t_o$  vyšší než teplota vzduchu v místnosti  $t_i$  ( $t_o > t_i$ ), odchyluje se proud vzduchu směrem nahoru, je-li naopak  $t_o < t_i$ , odchyluje se proud dolů. Je proto důležité přizpůsobit výtokovou rychlost vzduchu z vyústky tak, aby přiváděný vzduch proudil především pobytovou či pracovní oblastí.

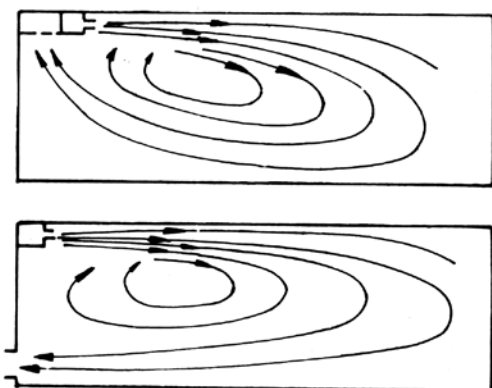


Obr. 3.5 Obrazy neizotermního vertikálního proudění vzduchu

Vede-li se nucený proud vzduchu vertikálně (při použití perforovaného stropu a podlahové mříže), lze mluvit o větrání shora – dolů nebo naopak zdola – nahoru a o tzv. ideálních obrazech proudění viz obr. 3.5c, b. Přivádí – li se teplejší vzduch zdola – nahoru (obr. 3.5a) nebo naopak teplejší vzduch shora – dolů (obr. 3.5d) vytváří se osamocené vzestupné nebo sestupné proudy, takže prostor není větrán rovnoměrně.



Podle těchto obrazů proudění lze učinit závěr, že při neizotermním větrání s malou výtokovou rychlostí z vyústek je nutno vést proud vzduchu proti směru přirozeného proudění.



Obr. 3.6 Obrazy neizotermního proudění při velké výtokové rychlosti

druhořadý, je důležité odváděcím otvorům věnovat pozornost, a to s ohledem na místa maximálních koncentrací škodlivin a odváděcí otvory zřizovat pokud možno v blízkosti zdrojů škodlivin.

### 3.4 VYÚSTKY

Vyústky zakončují potrubní síť větracího vzduchu. Slouží k přívodu vzduchu do větraných místností a také k jeho odvádění. Podle polohy v místnosti rozlišujeme vyústky:

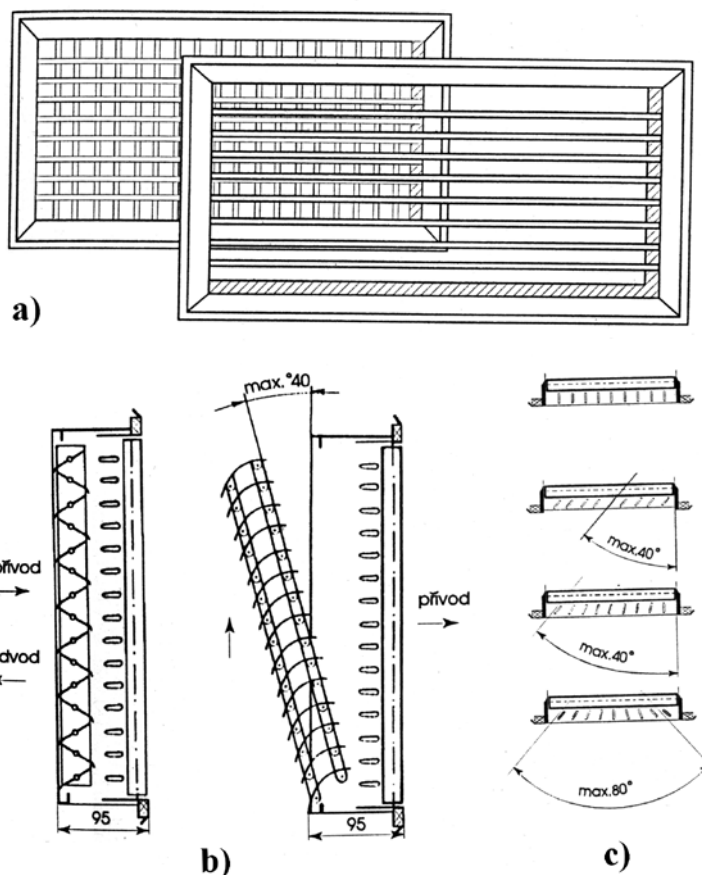
- nástěnné,
- stropní,
- podlahové.

**Vyústky nástěnné.** Jako nástěnné vyústky se nejčastěji používají vyústky obdélníkové, mřížkové štěrby, velkoplošné vyústky a dízy.

Obdélníkové vyústky s tzv. usměrňovacími listy patří k nejrozšířenějším (obr. 3.7). Podle počtu soustav usměrňovacích listů se dělí na jednořadé (umožňují regulaci směru proudu v jedné rovině) a dvouřadé (umožňují prostorovou regulaci). K regulaci požadovaného množství vzduchu se nejčastěji používá regulace protiběžnými klapkami. Druhý možný typ regulace, tj. náběhovými listy, lze

Při neizotermním proudění s velkou výtokovou rychlostí z vyústek se dosáhne nejpříznivějšího větrání místnosti pro uspořádání větracích otvorů podle obr. 3.6.

Nerovnoměrná výměna vzduchu v různých místech větraného prostoru způsobí, že v primárních proudech je koncentrace škodlivin nižší a v sekundárních proudech vyšší než je koncentrace průměrná. Je proto důležité, aby pobytová či pracovní oblast (obvykle do 2 m nad podlahou) byla větrána venkovním vzduchem. Tento požadavek musí být především dodržen při návrhu průmyslového větrání se zdroji škodlivin. I když vliv odváděcích otvorů na obrazy proudění je



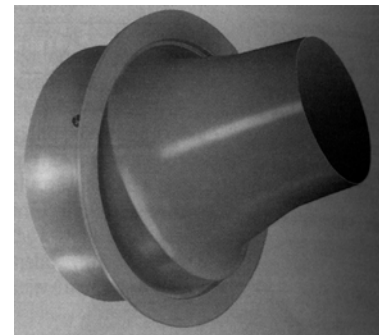
Obr. 3.7 Obdélníková vyústka. a) pohled, b) regulace průtoku klapkami a náběhovými listy, c) příklad možnosti nastavení předních listů

použit pouze u přiváděcích vyústek.

Mřížkové štěrbiny mají tvar protáhlého obdélníku, jejich délka je o mnoho větší než šířka. Mohou být opatřeny podélnou nebo příčnou mříží.

Velkoplošné vyústky se sestavují ze skříní s jednou perforovanou stěnou, do nichž se vhání vzduch, případně jsou provedení válcového, půlválcového nebo čtvrtválcového – tyto jsou vhodné pro umístění volně do prostoru, ke stěně nebo do rohu místnosti.

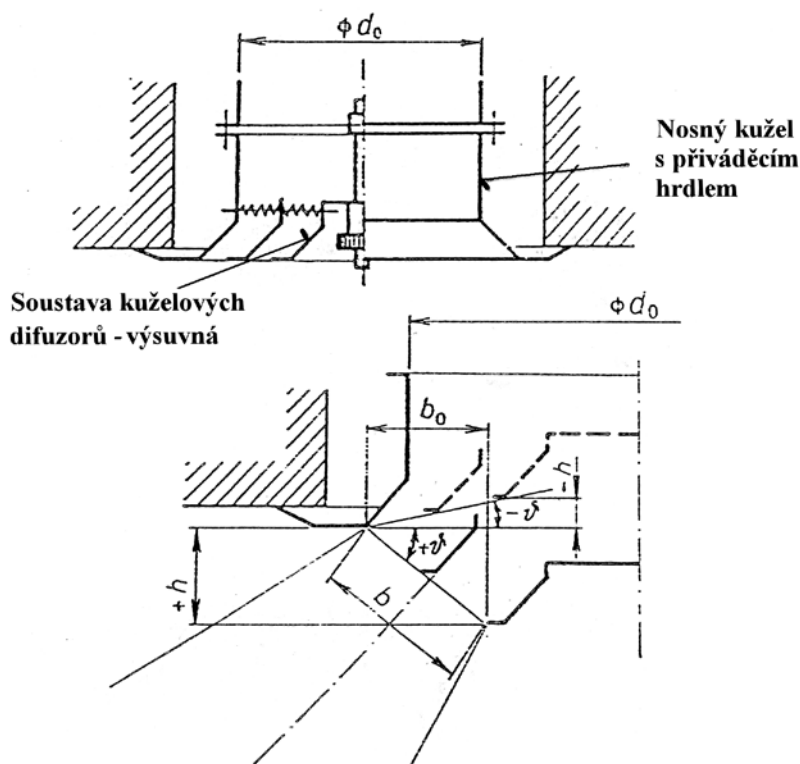
Dýzy (obr. 3.8) jsou vhodné pro přívod vzduchu vysokými rychlostmi do velkých prostorů (např. konferenčních sálů, průmyslových hal, sportovních hal, krytých atrií atd.). Výhodami jsou velký dosah proudu a nízká hluchnost i při vysokých výtokových rychlostech. Používají se dýzy pevné s definovaným směrem výtoku vzduchu, nebo nastavitelné s regulací směru výtoku.



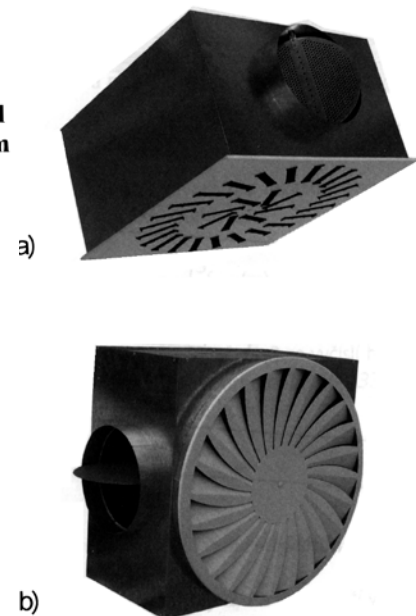
Obr. 3.8 Dýza s možností nastavení směru výtoku

**Vyústky stropní.** Jsou často konstruovány k umístění do sníženého podhledu. Používá se několik typů, z nichž nejpoužívanější jsou anemostaty, vířivé vyústky, velkoplošné vyústky, dýzy a štěrbinové vyústky.

Anemostaty jsou různého provedení kruhového nebo čtyřhranného, oba typy i v difuzorovém provedení. Příklad kruhového anemostatu s kuželovými difuzory je na obr. 3.9. Polohu soustavy kuželových difuzorů lze v axiálním směru měnit a tím regulovat směr výtoku vzduchu.



Obr. 3.9 Difuzorový anemostat kruhový



Obr. 3.10 Vířivé vyústky s horizontálním připojením  
a) s přestavitelnými lamelami,  
b) s pevnými lamelami

Vířivé vyústky (obr. 3.10) nazývané také vířivé anemostaty se vyrábí se čtvercovou nebo kruhovou čelní deskou, se vsazenými pevnými lamelami, nebo nastavitelnými lamelami, u nichž je možné výstupní proud nasměrovat nastavením lamel jako horizontální, šikmý nebo vertikální. Směr výfuku lze měnit ručně nebo motoricky.

Stropní velkoplošné vyústky se sestavují z perforovaných panelů, tj. skříní do nichž se vhání vzduch a jejichž dno je z jemně perforovaného plechu.

Dýzy stropní jsou stejného provedení jako dýzy nástěnné (obr.3.8).

Štěrbínové vyústky (obr. 3.11) se vyrábí s šířkou štěrbin 15 až 50 mm, jejich délka je mnohem větší než šířka. Dodávají se s definovaným nastavením směru výtoky vzduchu, nebo s možností nastavení směru výtoky.



Obr. 3.11 Štěrbínová vyústka

**Podlahové vyústky.** K nejčastěji používaným patří vyústky čtyřhranné, štěrbínové a velkoplošné.

Čtyřhranné podlahové vyústky mají oproti stěnovým zvýšenou nosnost. Mají jednu řadu pevných listů.

Štěrbínové podlahové vyústky jsou stejného provedení jako štěrbinové vyústky stropní (obr. 3.11).

Velkoplošné podlahové vyústky se umísťují v celé podlaze, nebo v její části. Při využití celé podlahy je umožněno rovnoměrné rozložení větracího vzduchu. Toto řešení však vyžadují existenci zdvojené podlahy – nosné a průlinčité podlahy polepené např. kobercem vykazujícím požadované vzduchové vlastnosti.

K odvodu vzduchu mimo většiny uvedených typů vyústek mohou být využity jednoduché otvory překryté sítkou, nebo jednořadou pevnou mřížkou, doplněné v případě potřeby o klapky k regulaci průtoku.

### 3.5 PŘIROZENÉ VĚTRÁNÍ

U větrání s přirozeným oběhem je průtok vzduchu vyvolán rozdílem tlaků uvnitř a vně větraného prostoru, který vzniká

- rozdílem teplot uvnitř a vně větraného prostoru (místnosti, budovy),
- tlakovým (dynamickým) účinkem větru na budovu.

#### Účinek rozdílných teplot

Předpokládejme místnost o výšce  $H$ , obklopenou ze všech stran vnějším ovzduším, do které vniká vzduch pouze netěsnostmi v obvodové konstrukci, nebo otvory – štěrbinami  $O$  uprostřed výšky místnosti. Rozdělení tlaku na boční stěny vlivem rozdílných teplot vzduchu venku a uvnitř je na obr. 3.12. Je-li vnitřní teplota vyšší než venkovní jsou horní část místnosti přetlaková, dolní podtlaková. Mezi oběma oblastmi je místo nulového tlakového rozdílu, kterým prochází neutrální rovina  $n$ .

Tlakový rozdíl  $\Delta p$  v libovolném místě  $h$  od neutrální roviny je

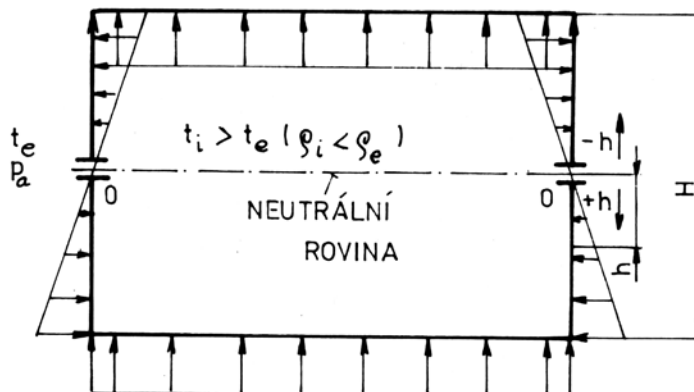
$$\Delta p = h(\rho_e - \rho_i) g, \quad (3.20)$$

kde  $\rho_e$  a  $\rho_i$  značí hustoty vnějšího a vnitřního vzduchu a  $g$  gravitační zrychlení.

Rozdíl tlaků se lineárně zvětšuje se vzrůstající vzdáleností od neutrální roviny, takže největší vnější přetlak je v uvažovaném případě u podlahy ( $h = H/2$ ,  $H$  je výška místnosti) a stejný vnější přetlak působí také na celou podlahu a je roven

$$\Delta p_{max} = \frac{H}{2} g (\rho_e - \rho_i). \quad (3.21)$$

V horní části místnosti (nad neutrální rovinou) působí na dělicí stěnu naopak vnitřní přetlak, který dosahuje maximální hodnoty u stropu a stejný přetlak působí také na celý strop.

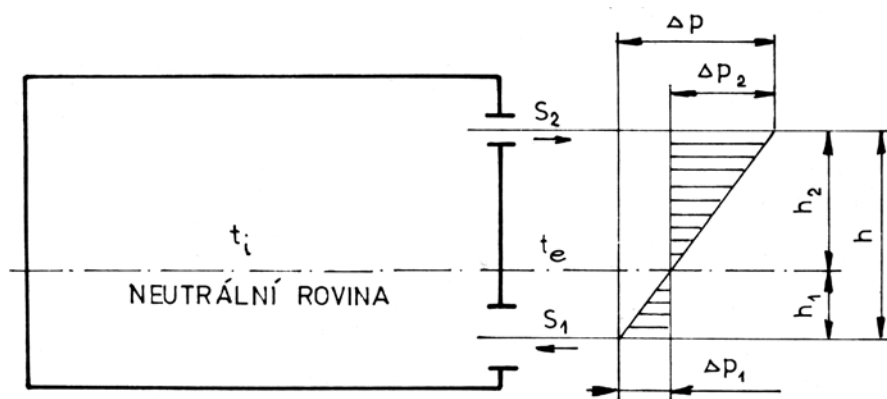


Obr. 3.12 Rozložení tlaku na stěny vlivem rozdílných teplot

V místnostech s otvory pro přívod a odvod vzduchu, umístěnými v jiné poloze než ve středu místnosti, se změní poloha neutrální roviny, a tím i tlakové poměry v místnosti. Poloha neutrální roviny je ovlivněna vzájemným poměrem velikostí přiváděcích a odváděcích otvorů, resp. poměrem tlakových ztrát, které vzniknou při proudění otvory.

Na příklad v prostoru se dvěma větracími otvory podle obr. 3.13 se celkový rozdíl tlaku (účinný vztlak využitelný k větrání)  $\Delta p$  rozdělí na tlaky potřebné k překonání odporu  $\Delta p_1$  v přiváděcím otvoru o průřezu  $S_1$  a odporu  $\Delta p_2$  v odváděcím otvoru o průřezu  $S_2$ , tzn.

$$\Delta p = h g (\rho_e - \rho_i) = \Delta p_1 + \Delta p_2. \quad (3.22)$$



Obr. 3.13 Poloha neutrální roviny v prostoru se dvěma větracími otvory ( $S_1 > S_2$ )

Poloha neutrální roviny se ustaví v takové výši, při níž bude splněna podmínka větrací rovnováhy – hmotnostní tok vzduchu do místnosti  $\dot{m}$  se v ustáleném stavu rovná hmotnostnímu toku vzduchu z místnosti

$$\dot{m} = \mu_1 S_1 w_1 \rho_e = \mu_2 S_2 w_2 \rho_i,$$

kde  $w = \sqrt{2 \Delta p / \rho}$ , takže

$$\mu_1 S_1 \sqrt{2 \Delta p_1 \rho_e} = \mu_2 S_2 \sqrt{2 \Delta p_2 \rho_i} \quad (3.23)$$

( $\mu_1, \mu_2$  jsou výtokové součinitele přiváděcího a odváděcího otvoru).

Dosadíme-li za  $\Delta p_2 = \Delta p - \Delta p_1$  a využijeme-li podobnost  $h_1 / h = \Delta p_1 / \Delta p_2$ , pak po úpravách a za předpokladu, že  $\mu_1 = \mu_2$  dostáváme pro výšku neutrální roviny nad osou spodního otvoru vztah

$$h_1 = \frac{h}{1 + \frac{\rho_e}{\rho_i} \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^2}. \quad (3.24)$$

### Tlakový účinek větru

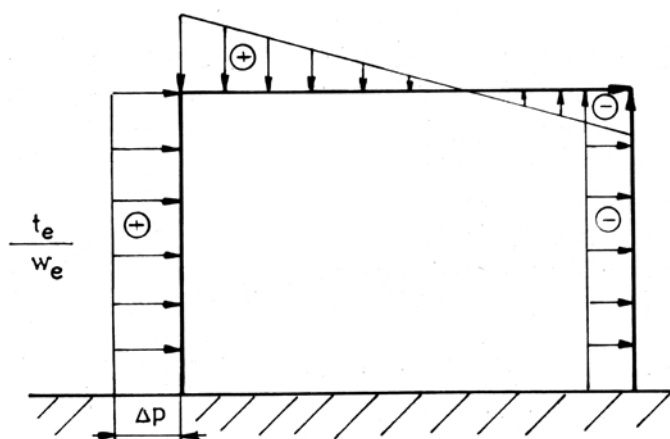
Působením větru vznikne na návětrné straně budovy jistý přetlak a na závětrné straně naopak jistý podtlak (obr. 3.14). Velikost přetlaku, resp. podtlaku se vyjadřuje vztahem

$$\Delta p = A p_d = A \frac{w_e^2}{2} \rho_e, \quad (3.25)$$

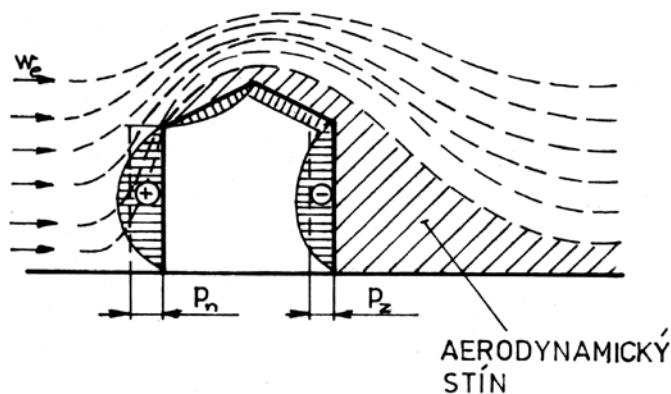
kde  $A$  je aerodynamický součinitel (tlakový součinitel větru) – průměrné hodnoty na straně návětrné jsou 0,9 a na straně závětrné -0,4,  $p_d$  je dynamický tlak větru,  $w_e$  je rychlost větru a  $\rho_e$  je hustota venkovního vzduchu.

Pro jednotlivé stěny lze tlak na povrchu budovy při působení větru počítat ze vztahu

$$p = p_a + \Delta p = p_a + A p_d. \quad (3.26)$$



Obr. 3.14 Rozložení tlaku na stěny budovy vlivem působení větru



Obr. 3.15 Tlakový účinek větru na budovu

Skutečné rozložení tlaku účinkem větru na budovu ukazuje obr. 3.15.

Vzhledem k tomu, že účinek větru je nahodilý jak intenzitou, tak směrem působení nepočítá se při návrhu přirozeného větrání většinou s účinkem větru a kontroluje se jen nepříznivý vliv větru na funkci větrání.

Při současném působení větru a rozdílných teplot vzduchu vně a uvnitř budovy se výsledný tlak působící na

stěnu rovná součtu obou tlaků dílčích, tj. tlaku vyvolaného větrem a rozdílem teplot

Přirozené větrání dělíme na infiltraci, větrání okny, aeraci a šachtové větrání.

### 3.5.1 Infiltrace

Infiltrací (provzdušněním) se rozumí přirozené větrání, které vzniká i při uzavřených větracích otvorech. Při infiltraci proniká vzduch do budovy a z ní netěsnostmi v obvodové konstrukci budovy, především spárami netěsných oken a dveří.

Průtok vzduchu závisí na venkovních klimatických podmínkách a nedá se regulovat. Takové větrání je tedy, co se týče výskytu a intenzity nestálé. Největší je v mrazivých a větrných dnech. Objemový tok vzduchu infiltrací pro vytápěný prostor (i)  $\dot{V}_{inf,i}$  můžeme vypočítat dle ČSN EN 12831 [9] podle

$$\dot{V}_{inf,i} = 2 V_i n_{50} e_i \varepsilon_i \text{ [m}^3\text{h}^{-1}\text{]}, \quad (3.27)$$

kde  $V_i$  je objem vytápěné místnosti (i) [m<sup>3</sup>],  $n_{50}$  je intenzita výměny vzduchu za hodinu při rozdílu tlaků 50 Pa mezi vnitřkem a vnějškem budovy,  $e_i$  je stínící činitel a  $\varepsilon_i$  je výškový korekční činitel, který zohledňuje zvýšení rychlosti proudění vzduchu s výškou prostoru nad povrchem země.

### 3.5.2 Větrání okny

Větrání okny (dříve také nazývané provětrávání) je nejrozšířenějším způsobem přirozeného větrání budov. Je to běžný způsob větrání většiny obytných a administrativních místností i školních učeben a aplikuje se přerušovaně. Energeticky úsporný je tento způsob větrání jen tehdy, větrá-li se krátce, často a velkými průřezy.

Je-li otevřené okno jediným větracím otvorem, stanoví se hmotnostní tok větracího vzduchu z podmínky větrací rovnováhy, tj. hmotnostní tok částí (polovinou) otvoru do místnosti se musí rovnat hmotnostnímu toku z místnosti. Za předpokladu rovinného proudění je střední rychlost proudění vzduchu jedním směrem

$$w_s = \frac{2}{3} w_{max} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2 \Delta p_{max}}{\rho}},$$

kde maximální tlakový rozdíl  $\Delta p_{max} = g \frac{h}{2} (\rho_e - \rho_i)$  ( $h$  je výška okna,  $\rho_e$  a  $\rho_i$  jsou hustoty vzduchu vně a uvnitř místnosti) a tedy

$$w_s = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{g h}{\rho} (\rho_e - \rho_i)}. \quad (3.28)$$

Hmotnostní tok větracího vzduchu je vyjádřen rovnicí (3.23) a pro vzduch přiváděný polovinou okna o šířce  $b$  se rovná

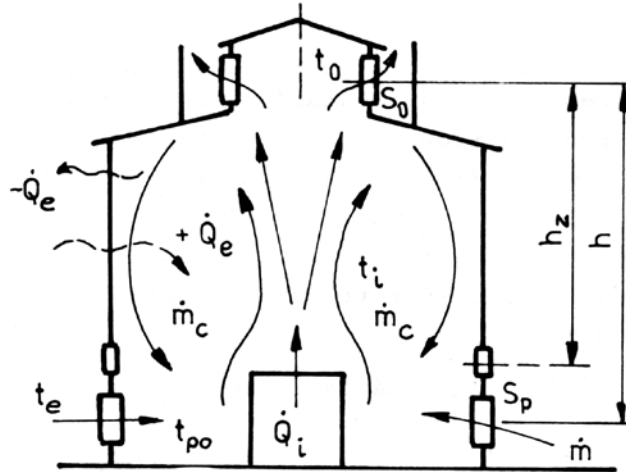
$$\dot{m} = \mu_e S_e w_s \rho_e = \mu_e \frac{b}{3} \sqrt{g h^3 (\rho_e - \rho_i)} \rho_e. \quad (3.29)$$

### 3.5.3 Aerace

Aerace je přirozené větrání regulovatelnými větracími otvory ve stěnách a ve střeše. Aerace je rozšířena zejména v teplých a horkých průmyslových provozech, kde měrná tepelná

zátěž od vnitřních zdrojů je větší než  $25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}$ . Jsou to např. provozy hutních, strojírenských a sklářských závodů. Podmínkou správné funkce aerace je trvalý zdroj vnitřní tepelné zátěže v zimě i v létě.

Schéma aerace a proudění vzduchu v hale je na obr. 3.16. Konvekční proud vzduchu nad zdrojem tepla  $\dot{Q}_i$  se pod střeou dělí na část odcházející světlíkem a část cirkulující v prostoru  $\dot{m}_c$ . Cirkulující část vzduchu se po příchodu do spodního pásma míší s přiváděným vzduchem venkovním a proudí pracovní oblast ke zdroji tepla.



Obr. 3.16 Aerace haly teplého provozu

Základními rovnicemi pro výpočet aerace jsou:

- Rovnice tepelné rovnováhy, kterou lze psát ve tvaru

$$\dot{m}_p c_p t_e + \dot{Q}_i = \dot{m}_o c_p t_o \pm \dot{Q}_e, \quad (3.30)$$

kde  $\dot{m}_p$  a  $\dot{m}_o$  jsou hmotnostní toky vzduchu přiváděného a odváděného  $[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$ ,

$t_e$  a  $t_o$  – teploty přiváděného a odváděného vzduchu  $[\text{°C}]$ ,

$c_p$  – měrná tepelná kapacita vzduchu při konstantním tlaku  $[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ ,

$\dot{Q}_i$  – vnitřní zdroj tepla  $[\text{W}]$ ,

$\dot{Q}_e$  – tepelná ztráta v zimě, vnější tepelná zátěž v létě  $[\text{W}]$ .

- Rovnice větrací rovnováhy – hmotnostní tok vzduchu přiváděného se rovná hmotnostnímu toku vzduchu odváděného

$$\dot{m}_p = \dot{m}_o = \dot{m}. \quad (3.31)$$

Tuto rovnici můžeme psát ve tvaru

$$\mu_p S_p \sqrt{2 \Delta p_p \rho_e} = \mu_o S_o \sqrt{2 \Delta p_o \rho_o}, \quad (3.32)$$

kde  $\mu_p$  a  $\mu_o$  jsou výtokové součinitele přiváděcích a odváděcích otvorů,

$S_p$  a  $S_o$  – plochy přiváděcích a odváděcích otvorů,

$\Delta p_p$ ,  $\Delta p_o$  – tlakové spády na přiváděcích a odváděcích otvorech,

$\rho_e$  a  $\rho_o$  – hustoty vzduchu o teplotě  $t_e$  a  $t_o$ .

Hmotnostní tok větracího vzduchu  $\dot{m}$  se vypočte z rovnice tepelné rovnováhy (3.30), za podmínky větrací rovnováhy – rovnice (3.31). Teplota odváděného vzduchu  $t_o$  se určuje (odhaduje) pomocí teplotního součinitele  $B$ , který udává rozložení teploty ve vertikálním směru a je definován vztahem

$$B = \frac{t_{po} - t_e}{t_o - t_e} \quad \text{pro} \quad t_{po} - t_e = 5 \text{ K}, \quad (3.33)$$

nebo

$$B' = B \sqrt{t_{po} - t_e / 5} \quad \text{pro} \quad t_{po} - t_e \neq 5 \text{ K}. \quad (3.34)$$

kde  $t_{po}$  je teplota v pracovní oblasti určená hygienickými předpisy.

Teplotní součinitel  $B$  se zjišťuje experimentálně a jeho doporučené hodnoty pro různé typy provozů jsou uváděny v literatuře.

Dle rovnice (3.20), tj.

$$\Delta p = h(\rho_e - \rho_i) g,$$

vypočteme účinný tlak  $\Delta p$ . Hustotu vzduchu  $\rho_i$  určíme pro střední teplotu vzduchu v hale  $t_i$ , která je vyjádřena vztahem  $t_i = (t_{po} + t_o)/2$ . Účinný tlak se rozdělí na přiváděcí otvory a odváděcí otvory  $\Delta p = \Delta p_p + \Delta p_o$  v poměru  $\Delta p_o / \Delta p_p = 1$  až 2, přičemž má být  $\Delta p_p \leq 5$  Pa.

Plochy větracích otvorů se vypočtou z rovnice větrací rovnováhy (3.32) a jsou vyjádřeny vztahy

$$S_p = \frac{\dot{m}}{\mu_p \sqrt{2 \Delta p_p} \rho_e}; \quad S_o = \frac{\dot{m}}{\mu_o \sqrt{2 \Delta p_o} \rho_o}. \quad (3.35)$$

Přiváděcí otvory ve stěnách mají být dvoje:

- Pro letní období ve výši pracovní oblasti, tj. 1,2 až 1,8 m nad podlahou.
- Pro zimní období ve výši 4 až 5 m nad podlahou, aby se zvýšila teplota chladného vzduchu před vstupem do pracovní oblasti. Protože účinný tlak je v zimě větší než v létě, větrací otvory pro zimu mohou být menší.

Větrací otvory přiváděcí i odváděcí musí umožňovat regulaci průtoku vzduchu. Opatřují se otočnými okenními křídly, nebo regulačními klapkami.

### 3.5.4 Šachtové větrání

Přirozené šachtové větrání je větrání, při němž větrací otvor v místnosti je zaústěn do svislé šachty, kterou se vzduch z místnosti obvykle odvádí nad střechu budovy. Používá se v obytných budovách při větrání prostorů ve středu bytu (na WC, v koupelnách) a v průmyslu k odvodu škodlivin od stabilního zdroje škodlivin s dostatečnou produkcí konvekčního tepla. Pro průmyslové větrání se používají také plechové trouby, umístěné při vnějších zdech. Šachta bývá zakončena tzv. větrací hlavicí, která zvyšuje tah za větru.

Účinný tah šachty o výšce  $h$  je dán vztahem

$$\Delta p = h(\rho_e - \rho_i) g. \quad (3.36)$$



Tento tlakový spád se spotřebuje na překonání tlakových ztrát třením a místními odpory, na vytvoření dynamického tlaku ve výstupu a k překonání rozdílu tlaků vně a uvnitř budovy.

Platí vztah

$$\Delta p = \left( \lambda h/d + \sum \xi + 1 \right) \rho w^2 / 2 + (p_e - p_i), \quad (3.37)$$

kde  $\lambda$  je součinitel tření,

$d$  – průměr šachty,

$\xi$  – součinitel místního odporu,

$w$  – rychlost proudění vzduchu šachtou,

$\rho_e, \rho_i, \rho$  – hustota vzduchu vně budovy, uvnitř větrané místnosti a v šachtě,

$p_e, p_i$  – tlak vzduchu vně budovy a uvnitř větrané místnosti.

Větrací účinek šachty (odvod vzduchu šachtou) se projeví pouze tehdy, bude-li vnitřní teplota vzduchu vyšší než venkovní. V zimním období je potřebného rozdílu mezi teplotou venkovního a vnitřního vzduchu bezpečně dosaženo, avšak v přechodném období se rozdíl teplot zmenšuje a v létě může být dokonce teplota venkovní vyšší než teplota vnitřní. Při poklesu zmíněného rozdílu teplot se účinnost šachtového větrání zmenšuje, a když je teplota vnitřní nižší než venkovní může nastat proudění vzduchu v opačném směru, tj. šachtou vniká vzduch do místnosti, což může být z hlediska tvorby vnitřního prostředí velmi nepříznivé.

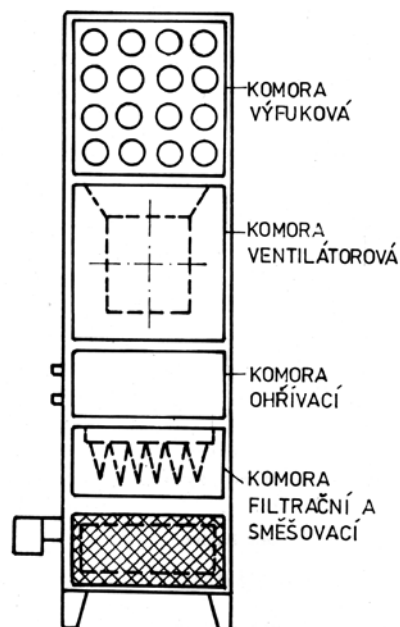
### 3.6 NUCENÉ VĚTRÁNÍ CELKOVÉ

Nucené celkové větrání se navrhuje tam, kde nelze předem určit místa vzniku škodlivin, nebo kde jsou zdroje škodlivin rovnoměrně rozmístěny. Nucené větrání zajišťuje výměnu vzduchu nezávisle na vnějších klimatických podmínkách a proti přirozenému větrání má řadu dalších předností:

- umožňuje regulaci intenzity větrání podle potřeb větraného prostoru,
- umožňuje vzduch filtrovat a také teplotně upravovat,
- umožňuje zpětné využití tepla z odpadního vzduchu,
- umožňuje upravit tlakové poměry v budově a vytvořit vhodné obrazy proudění ve větraném prostoru.

Soustavy nuceného větrání jsou podle tlaku ve větraném prostoru vzhledem k tlaku v okolních prostorách přetlakové, podtlakové, nebo rovnotlaké. Vlastnosti těchto soustav a jejich použití byly uvedeny v úvodu kap. 3.

Větrací zařízení jsou buď jednotková, nebo ústřední. Jednotková zařízení se instalují převážně přímo do větraného prostoru a jsou svým provedením nejčastěji podokenní nebo skříňová. Používají se jednotky pro přívod a odvod vzduchu. Jednotka pro přívod vzduchu uvedená na obr. 3.17 má směšovací komoru, filtr, ohříváč, ventilátor a výfukovou komoru s vyústkou. Větrací jednotku pro odvod vzduchu tvoří ventilátor umístěný ve skříni.



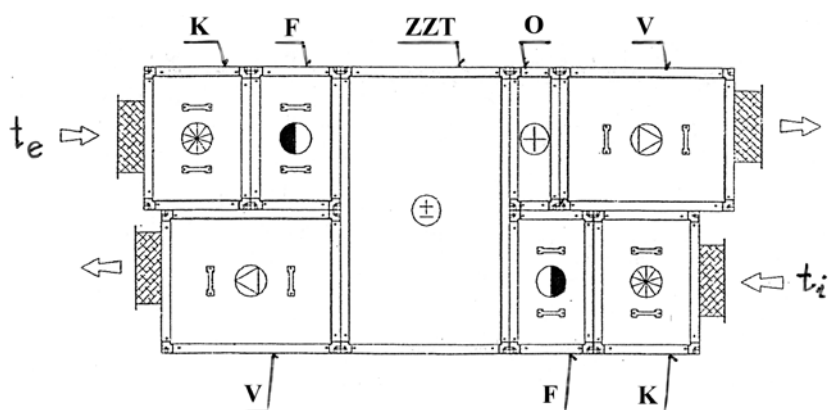
Obr. 3.17 Větrací jednotka skříňová pro přívod vzduchu

Ústřední větrací zařízení se vyrábí většinou jako sestavná, nebo také jako bloková. Tato zařízení se umísťují do strojovny a spojují se s větranými místnostmi vzduchovody. Slouží obvykle k větrání více místností. Příklad větrací jednotky vybavené zařízením pro zpětné

získávání tepla (rotačním regeneračním výměníkem) je na obr. 3.18. Tato jednotka po doplnění o chladicí a zvlhčovací díl se stává klimatizační.

Zařízení pro zpětné získávání tepla (ZZT) slouží k předávání tepla z odváděného odpadního vzduchu přiváděnému větracímu vzduchu. Základní používané systémy ZZT budou probrány v kap. 3.9.1.

Odpadní vzduch při celkovém větrání vyfukovaný do vnějšího ovzduší neobsahuje obvykle škodliviny, které by svými koncentracemi znečišťovaly okolí, a proto se před výfukem nečistí.



Obr. 3.18 Ústřední větrací jednotka. V – ventilátorová komora, F – filtrační komora, O – ohřívací komora, K – klapková komora, ZZT – komora zpětného získávání tepla

Podle účelu větraných prostorů se rozlišují větrací zařízení

- komfortní, určená pro prostory, kde pobývají nebo se shromažďují lidé,
- průmyslová, určená pro výrobní prostory,
- technologická, vyžádaná technologií, bez nichž by výroba nemohla probíhat nebo by neměla žádanou kvalitu.

### 3.7 MÍSTNÍ VĚTRÁNÍ

Místní větrání je místní přívod vzduchu, který zajišťuje výměnu vzduchu v omezeném místě vnitřního prostoru. K místnímu větrání patří vzduchové sprchy, vzduchové oázy a vzduchové clony.

#### 3.7.1 Vzduchové sprchy

Vzduchové sprchy jsou určeny k ochraně pracovníků před účinky sálavého tepla. Vyfukuje se jimi proud vzduchu ve směru působení toku sálavého tepla na člověka. Zvětšením rychlosti proudění vzduchu kolem člověka se zvýší součinitel přestupu tepla konvekcí na povrchu osálaného oděvu, čímž se zvýší tepelný tok přenášený konvekcí do okolí, a sníží se tepelný tok prostupující oděvem k tělu. Vysvětluje to rovnice

$$A \dot{q}_s = \alpha (t_p - t_i) + \frac{t_p - t_k}{R}, \quad (3.38)$$

kde  $A$  je poměrná pohltivost oděvu,

$\dot{q}_s$  - hustota sálavého tepelného toku,

$\alpha$  - součinitel přestupu tepla,

$t_p, t_i, t_k$  – teploty povrchu oděvu, okolního vzduchu a pokožky,  
 $R$  – tepelný odpor oděvu.

Pro ochranu před sálavým teplem musí být teplo přenášeno k pokožce co nejmenší. Z rozboru rovnice (3.38) vyplývá, že toho lze dosáhnout při daném sálavém tepelném toku těmito opatřeními:

- snížením poměrné pohltivosti oděvu,
- zvětšením tepelného odporu oděvu,
- zvýšením součinitele přestupu tepla z povrchu oděvu.

Na poslední opatření jsou zaměřeny vzduchové sprchy.

### Návrh vzduchové sprchy

Vzduchová sprcha se počítá jako volný proud, u něhož se vychází z rychlosti vzduchu a průměru proudu na pracovišti.

Rychlost vzduchu na pracovišti se buď počítá z tepelné bilance (3.38), za podmínky, aby hustota tepelného toku prostupujícího k tělu nepřekročila  $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , nebo se rychlost na pracovišti volí do  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Za účinnou pro ochlazování se bere střední rychlost proudu podle hybnosti.

Průměr proudu na pracovišti se volí podle místní situace; minimálně 1,2 m za předpokladu, že pracovník nemění místo. Vzhledem k nerovnoměrnému rychlostnímu profilu zatopeného proudu (rychlost na okraji proudu je velmi malá) neuvažuje se na pracovišti celý průměr proudu  $D_x$ , ale pouze vnitřní část, jejíž průměr se označuje jako redukovaný  $D_{xr}$

$$D_{xr} = k D_x, \quad (3.39)$$

kde  $k$  je součinitel, který závisí na rychlostním profilu volného proudu; pro rychlostní profil podle Schlichtinga  $k \approx 0,63$ .

K výpočtu teploty proudu vzduchové sprchy na pracovišti se u zařízení s chlazením vzduchu používají vztahy pro neizotermní volný proud (odst. 3.3.2).

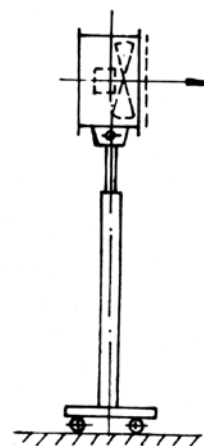
Při návrhu vzduchové sprchy je potřeba respektovat některé zásady:

- Teplota proudu vzduchové sprchy na pracovišti nemá být o mnoho nižší než teplota okolního vzduchu – maximálně o 3 K. Relativní vlhkost přiváděného vzduchu nemá být vyšší než 70 %.
- Proud vzduchové sprchy má směřovat na osálanou stranu člověka. Při návrhu vzduchové sprchy nutno věnovat pozornost i neosálané straně člověka, odvrácené od sprchy, která je rovněž ochlazovaná. Výpočet má proto obsahovat i kontrolu tepelného toku na neosálané straně.
- Vzduchové sprchy se hodí jen na místa stálého pobytu lidí. Nehodí se na pracoviště, kde se často přechází z místa osálaného na místo neosálané a naopak.

### Provedení vzduchových sprch

Vzduchové sprchy se dělí na jednotkové a ústřední.

Jednotkové vzduchové sprchy se konstruují obvykle jako přenosné nebo pojízdné, ale také jako stabilní. Většinou pracují bez úpravy vzduchu. Přenosné a pojízdné vzduchové sprchy se upevňují na



Obr. 3.19  
Pojízdná vzduchová sprcha

stojanu, jsou stavitelné do výše 1,5 až 2 m a naklápěcí v rozmezí  $\pm 30^\circ$ . Na obr. 3.19 je příklad pojízdné vzduchové sprchy, která se skládá z ventilátoru, krátkého vzduchovodu a vyústky. Stabilní vzduchové sprchy se upevňují na konstrukcích, např. sloupech a slouží jako trvalé zařízení pro určité pracoviště.

Ústřední vzduchové sprchy mají centrální strojovnu s úpravou vzduchu (ohřev, ochlazování, vlhčení, filtrace), ze které se vzduch rozvádí potrubím do vyústek. Pracují s venkovním vzduchem.

### 3.7.2 Vzduchové oázy

Vzduchovou oázou se nazývá místní přívod vzduchu buď na pracoviště, nebo na místa odpočinku v provozu, který slouží ke snížení koncentrací škodlivin. K vytvoření vzduchových oáz slouží zástěny o výšce asi 2 m. Vzduch se přivádí velkoplošnými vyústkami umístěnými nad místy pobytu pracovníků ve výšce 2 až 2,5 m nad podlahou, nebo bočně. Rychlosti ve vzduchové oáze bývají nižší než u vzduchových sprch, nepřesahují  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Vzduchové oázy se používají také na pracovištích se zdroji tepla, zejména konvekčního.

### 3.7.3 Vzduchové clony

Ve větraných, klimatizovaných nebo vytápěných místnostech se často stává, že spojovací otvory s venkovním prostorem (dveře nebo vrata) zůstávají po delší dobu otevřeny. Takový jev je nežádoucí jak v zimě, tak v létě. V zimě je zdrojem velkých tepelných ztrát a proudění studeného vzduchu u podlahy a v pobytové oblasti, v létě pak je zdrojem tepelných zisků a narušuje požadovaný obraz proudění.

Ke snížení volného průtoku otvorem (otevřenými dveřmi nebo vraty), který spojuje dva prostory, mezi nimiž je tlakový rozdíl slouží vzduchové clony. Vzduchovou clonu vytváří plochý proud vzduchu ze štěrbiny umístěné podél jedné strany otvoru, nebo dvou protilehlých stran otvoru, namířený šikmo do prostoru s vyšším tlakem. Hybnost tohoto proudu je zdrojem síly, která působí proti přetlaku v otvoru a tím snižuje průtok vzduchu otvorem.

Podle umístění štěrbiny jsou clony spodní, boční jedno nebo dvoustranné a clony horní, které jsou dnes nejpoužívanější. Horní clony mohou mít v podlaze otvor cirkulačního vzduchu.

## 3.8 MÍSTNÍ ODSÁVÁNÍ

Místní odsávání slouží k zachycení škodlivin v místě vzniku a jejich odvedení z místnosti přímo u zdroje. Místní odsávání je vždy hospodárnější než celkové větrání pro stejný zdroj škodlivin, neboť koncentrace škodlivin v odváděném vzduchu mohou být podstatně vyšší než u větrání celkového, kde nesmí překročit nejvyšší přípustné koncentrace. Vyšší hodnoty koncentrací škodlivin ve vzduchu místně odsávaného jsou přípustné proto, že odváděný vzduch neprochází dýchacím pásmem osob.

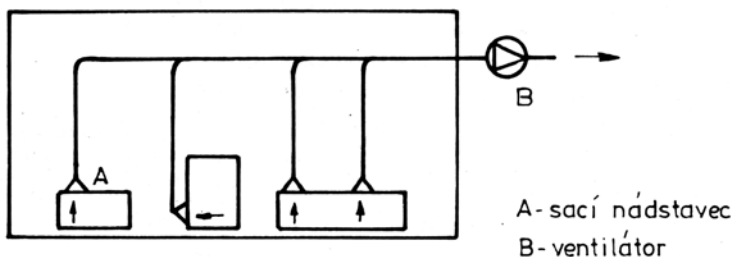
Odsávací zařízení se podle uspořádání sacích nástavců, sací potrubní sítě a ventilátorů rozdělují na systémy ústřední, skupinové, dělené a jednotkové (obr. 3.20).

*Ústředním systémem* se odsává několik zdrojů škodlivin pomocí potrubní sítě zapojené na společný ventilátor, umístěný mimo pracovní prostory a odsávaný vzduch je odváděn do vnějšího ovzduší. Odlučovací zařízení je obvykle rovněž ústřední pro celé zařízení.

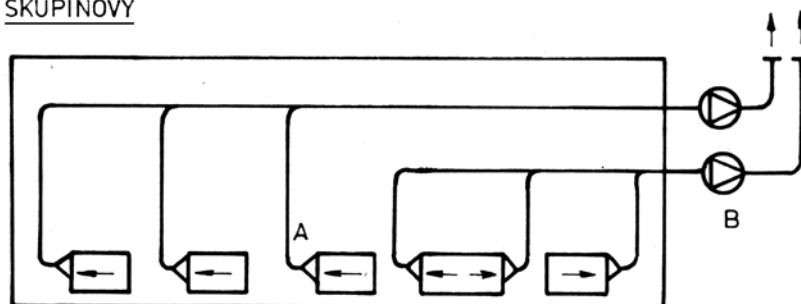
*Skupinový systém* se používá při odsávání od technologických procesů, při nichž vznikají u skupin strojů chemicky různé látky, které by mohly být po smíšení hořlavé případně výbušné. Je zde použito více ventilátorů a na každý z nich je zapojeno odsávací potrubí od určité skupiny zdrojů škodlivin, které lze mísit.

*Dělený systém* má několik samostatných ventilátorů se sacími nástavci napojenými na jeden technologický proces. Používají se u rozměrných linek nebo u takových technologiích, kde na několika místech se vyvíjí chemicky totožné škodliviny, avšak o různé intenzitě.

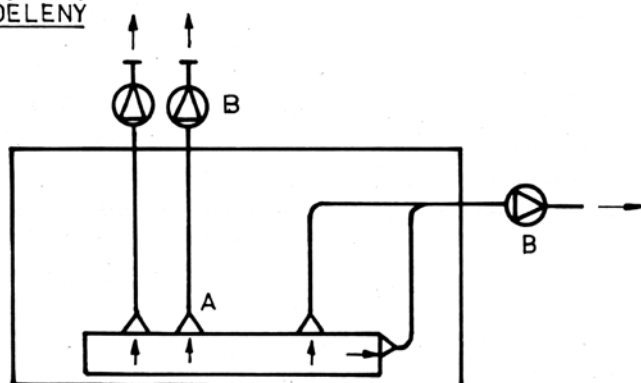
a) ÚSTŘEDNÍ



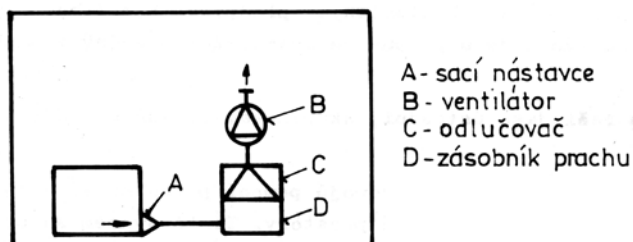
b) SKUPINOVÝ



c) DĚLENÝ



d) JEDNOTKOVÝ



Obr. 3.20 Odsávací systémy

Pokud koncentrace škodlivin v odsátém vzduchu splňují hygienické požadavky, lze vzduch z těchto odsávacích zařízení vyfukovat přímo do venkovního ovzduší. Vzduch s vyššími koncentracemi se odvádí k odlučovacím zařízením.

*Jednotková odsávací zařízení* se používají zejména pro odsávání od prašných zdrojů. Tvoří je ventilátor, odlučovač a zásobník prachu. Umisťují se do bezprostřední blízkosti zdroje škodlivin a vzduch po vyčištění se vrací do provozovny. Výhodou je, že u nich odpadá odsávací potrubí a tepelné ztráty odsáváním vzduchu. Dovolují libovolné přemísťování zařízení, aniž by se muselo rekonstruovat odsávací potrubí. Nevýhodou je, že vracející se vzduch přináší s sebou část prachu – nejjemnějšího.

### 3.8.1 Sací nástavce

Důležitou součástí odsávacích zařízení je sací nástavec, který slouží k zachycení škodlivin u zdrojů. Hlavními typy sacích nástavců jsou:

- odsávací skříně – chemické digestoře, kabiny pro stříkání nátěrových hmot, tryskání odlitků apod.,
- odsávací zákryty – střeovitě (nad zdroji tepla), nebo tvarově přizpůsobené strojům (u kovoobráběcích a dřevoobráběcích strojů, např. brusek, fréz, transportních zařízení na dopravu sypkých materiálů aj.),
- boční odsávací štěrbin, nejčastěji používané v technologii povrchových úprav, u průmyslových van pro čištění, moření a galvanické pokovování strojírenských výrobků,
- odsávací podlahové rošty, používané např. při stříkání nátěrových hmot, při čištění odlitků apod.,
- jednoduché sací nástavce – vyústění kruhových, obdélníkových nebo štěrbinových sacích vzduchovodů, používané ve spojení s pružnými hadicemi k odsávání škodlivin vznikajících na proměnných místech.

Výpočet sacích nástavců vychází z teorie potenciálního proudění, a to z případu, který se nazývá propadem. Vytváříme ho myšleným bodovým sacím otvorem, kterým procházejí přímkové proudnice. Ekvipotenciální plochy (plochy stejných rychlostí) kolmé na proudnice jsou kulové. Rychlost  $w_r$  na kulové ploše ve vzdálenosti  $r$  od propadu je

$$w_r = \frac{\dot{V}}{4 \pi r^2}, \quad (3.40)$$

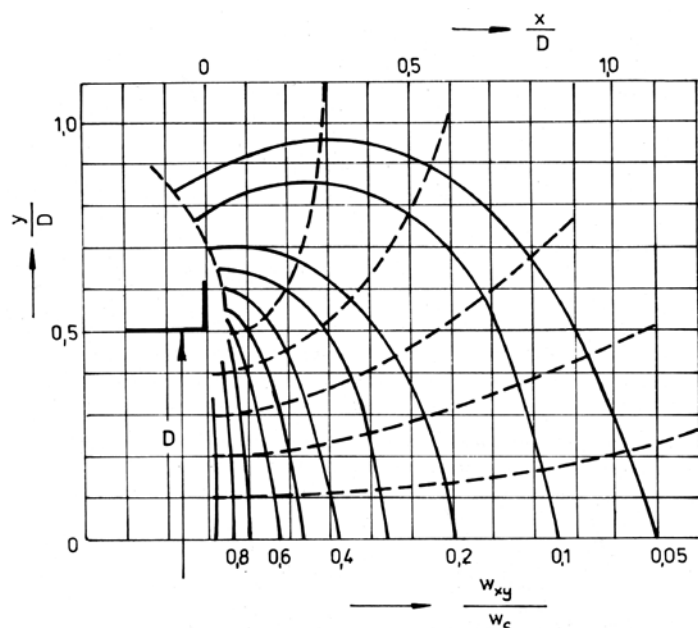
kde  $\dot{V}$  je objemový tok vzduchu odsávaný propadem.

Při odsávání štěrbinou jde o rovinné proudění, nazývané rovinný propad. Zde jsou ekvipotenciální plochy válcové. Radiální rychlost  $w_r$  ve vzdálenosti  $r$  od rovinného propadu je

$$w_r = \frac{\dot{V}}{2 \pi r}, \quad (3.41)$$

kde  $\dot{V}$  je objemový tok vzduchu odsávaný štěrbinou délky 1 m.

Rychlostní pole skutečných sacích nástavců se od uvedených teoretických případů liší, zejména



Obr. 3.21 Rychlostní pole u kruhového sacího otvoru

v oblasti blízké odsávacímu otvoru. Proto se v praxi pro blízkou oblast používá experimentálně stanovených průběhů rychlostí, vyjádřených v bezrozměrných parametrech.

Na obr. 3.21 jsou znázorněny proudnice a izotachy (křivky spojující místa stejných rychlostí) u kruhového sacího otvoru, zobrazené v bezrozměrných parametrech  $w_{xy}/w_s$  ( $w_s$  – střední rychlost v otvoru)  $x/D$  a  $y/D$  ( $D$  je průměr kruhového otvoru).

Vztah (3.40) lze použít pro  $x/D > 1$  a vztah (3.41) pro  $x/b > 2$  ( $D$  je průměr odsávacího otvoru,  $b$  je šířka odsávací štěrbině a  $x$  je vzdálenost od odsávacího otvoru či štěrbině ve směru jejich osy).

Pro návrh sacích nástavců platí tyto hlavní zásady:

- sací nástavec má být co nejbližší u zdroje, popř. zdroj úplně uzavírat,
- sací nástavec musí být nastaven tak, aby škodliviny směřovaly do odsávacího otvoru,
- musí být navržen tak, aby pracovník při obsluze nepřicházel mezi zdroj škodlivin a sací nástavec,
- musí zaručovat bezpečnost při práci.

### **3.9 HOSPODÁRNOST NÁVRHU VZDUCHOTECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ**

Vzduchotechnická zařízení, tj. zařízení pro větrání a klimatizaci jsou energeticky náročná. Při návrhu těchto zařízení je proto nutné dbát na jejich hospodárnost, kterou ovlivňují především tyto faktory:

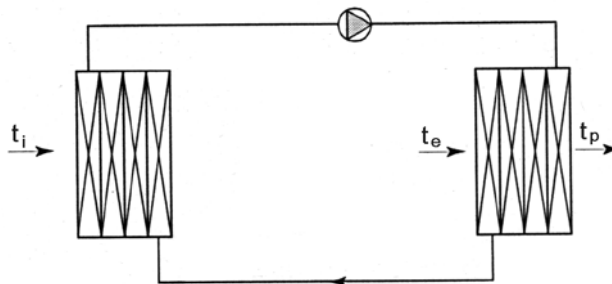
- Optimální dimenzování vzduchotechnického zařízení a jeho ovládání.
- Přesná specifikace úrovně čistoty, zejména v případě čistých prostor.
- Úprava výrobních postupů pro snížení provozních nákladů (např. čisté operace soustředit do laminárních boxů).
- Odstranění škodlivin v místech jejich vzniku zakrytím zdrojů a místním odsáváním.
- Větrání méně čistých prostor (např. chodeb, garáží) vzduchem z čistějších prostorů (např. kanceláří).
- Využívání různých systémů zpětného získávání tepla z odpadního vzduchu vyfukovaného do venkovního ovzduší.
- Použití vzduchotechnických zařízení s cirkulací vzduchu.

#### **3.9.1 Zpětné získávání tepla z odváděného vzduchu**

Zařízení pro zpětné získávání tepla (ZZT) se používají k předávání tepla z odváděného odpadního vzduchu, vyfukovaného do venkovního ovzduší, přiváděnému venkovnímu vzduchu a tak z hospodárňují provoz klimatizačních a větracích zařízení. K základním způsobům ZZT patří:

- přenos tepla pomocí dvojice lamelových výměníků,
- přenos tepla v deskových výměnících,
- přenos tepla pomocí tepelných trubic,
- přenos tepla, případně i vlhkosti v regeneračních výměnících (převážně rotačních),
- přenos tepla pomocí tepelných čerpadel.

**Systém dvojice lamelových výměníků s pomocnou tekutinou** (obr. 3.22) se skládá ze dvou sekcí (dvou samostatných výměníků z lamelových trubek) propojených potrubím, jímž nuceně proudí nemrznoucí kapalina. Jednou sekcí (jedním z lamelových výměníků) protéká teplý odváděný odpadní vzduch, druhou sekcí (druhým lamelovým výměníkem) protéká venkovní přiváděný vzduch. Oba proudy jsou od sebe odděleny a mohou být i značně vzdáleny.



Obr. 3.22 Systém dvojice lamelových výměníků

Účinnost přenosu se obvykle vyjadřuje vztahem

$$\eta = \frac{t_p - t_e}{t_i - t_e} \quad (3.42)$$

kde

$t_e, t_p$  jsou teploty přiváděného venkovního vzduchu na vstupu a výstupu z jednoho z výměníků,

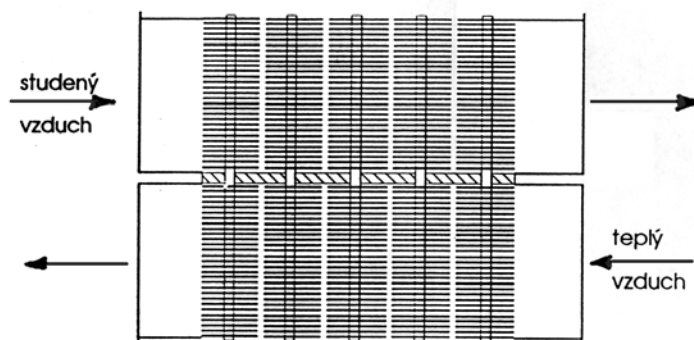
$t_i$  je teplota odváděného teplého vzduchu na vstupu do druhého z výměníků.

Vztah (3.42) platí za podmínky, že oběma výměníky proudí stejný hmotnostní tok vzduchu.

U tohoto systému ZZT se účinnost přenosu tepla pohybuje od 40 do 50 %.

**Deskové výměníky** jsou tvořeny soustavou desek s mezerami 3 až 6 mm. Plochémi kanály (štěrbínami) mezi deskami, jejichž povrch je hladký, tvarovaný, nebo žebrovaný, protéká střídavě teplý a chladný vzduch. Desky jsou z hliníku, z plastických hmot (s různě tvarovaným povrchem), případně ze skla (pro chemické provozy). Dosažitelná účinnost přenosu tepla je 50 až 70 %.

**Tepelné trubice** jsou jednotlivé žebrované trubky, naplněné z části chladivem, uchycené do rámu. Nejčastěji se používají trubice gravitační, jejichž uspořádání je na obr. 3.23. Teplý odpadní vzduch proudí kanálem, v němž je umístěna spodní část trubic. Teplý vzduch zde předává teplo kapalnému chladivu, toto chladivo se vypařuje a syté páry chladiva stoupají vzhůru. V horní části předávají teplo přiváděnému studenému vzduchu, proudícímu horním kanálem, kondenzují a zkapalněné chladivo stéká dolů. Účinnost se pohybuje od 50 do 60 %.



Obr. 3.23 Schéma gravitačních tepelných trubic

**Regenerační výměníky** jsou výměníky, u nichž teplosměnný povrch přichází střídavě do styku s proudem teplého a chladného vzduchu. Konstrukčně jsou řešeny jako rotační, nebo přepínací. Nejpoužívanější jsou rotační (obr. 3.24), u nichž je hlavním článkem rotující buben

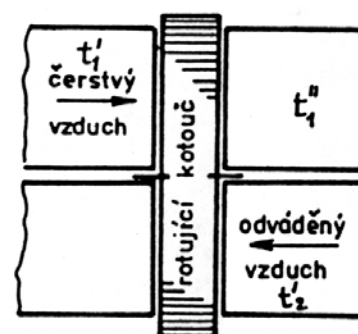


s teplosměnnou plochou vytvořenou z úzkých kanálků o průměru asi 3 mm. V uvedeném obrázku je spodní částí bubnu veden proud odváděného teplého vzduchu, horní částí proud přiváděného studeného vzduchu.

Regenerační výměníky mohou sloužit k přenosu tepla (teplosměnný povrch bývá hliníkový), nebo k přenosu tepla a vlhkosti (povrch musí být hygroskopický). Ze všech systémů ZZT mají nejvyšší účinnost, 70 až 90 %.

**Tepelná čerpadla** jsou kompresorová chladicí zařízení, u nichž činným článkem je kondenzátor. Výparníkem zařízení proudí odváděný teplý vzduch a předává teplo chladivu, které se odpařuje. Po zvýšení tlaku a teploty chladiva v kompresoru předává chladivo v kondenzátoru teplo přiváděnému venkovnímu vzduchu. Investičně i provozně jsou ze všech systémů ZZT nejdražší.

K nejpoužívanějším systémům ZZT dnes patří deskové výměníky a regenerační rotační výměníky.



Obr. 3.24 Schéma rotačního regeneračního výměníku

### 3.9.2 Použití zařízení s cirkulací vzduchu

Použitím vzduchotechnických zařízení s cirkulací vzduchu lze dosáhnout snížení investičních nákladů i úsporu provozních nákladů, a to především v přechodném a zimním období.

Cirkulační (oběhový) vzduch musí být vyčištěn tak, aby zpětný vzduch přiváděný do místnosti neobsahoval chemické látky, nebo aerosoly včetně prachu v koncentracích vyšších než 5 % jejich přípustného expozičního limitu (PEL) stanoveného Nařízením vlády č. 361/2007 Sb. [15].

Objemový tok cirkulačního vzduchu  $\dot{V}_c$  lze určit z hmotnostní bilance škodlivin při směšování venkovního a cirkulačního vzduchu, která má za předpokladu stejné hustoty venkovního a cirkulačního vzduchu tvar

$$\dot{V}_e k_e + \dot{V}_c k_c = \dot{V}_p k_p, \quad (3.43)$$

kde

$\dot{V}_p = \dot{V}_e + \dot{V}_c$  je objemový tok vzduchu přiváděného do místnosti,

$\dot{V}_e$  – objemový tok venkovního vzduchu,

$k_e, k_c, k_p$  – koncentrace škodlivin ve vzduchu venkovním, cirkulačním a přiváděném do místnosti.

Při použití teplovzdušného větrání nebo klimatizace nesmí podíl venkovního vzduchu poklesnout pod 15 % celkového množství přiváděného vzduchu [15].

Z rovnice (3.43) je objemový tok cirkulačního vzduchu vyjádřen vztahem

$$\dot{V}_c = \dot{V}_p \frac{k_p - k_e}{k_c - k_e}. \quad (3.44)$$

## 4. ZAŘÍZENÍ PRO ODLUČOVÁNÍ ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK

Odlučování částečkových a plynných znečišťujících látek (škodlivin) ze vzduchu je nedílnou součástí vzduchotechnických zařízení, tj. zařízení větracích a klimatizačních. Tato odlučovací zařízení můžeme rozdělit do dvou oblastí:

- Zařízení pro odlučování znečišťujících látek u odsávacích zařízení.
- Filtrační zařízení k odlučování znečišťujících látek z atmosférického a oběhového vzduchu pro účely větrání a klimatizace, tzv. atmosférické filtry.

### 4.1 ZAŘÍZENÍ PRO ODLUČOVÁNÍ ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK U ODSÁVACÍCH ZAŘÍZENÍ

Zařízení používaná v průmyslových provozech k odlučování částečkových a plynných škodlivin ze vzduchu lokálně odsávaného slouží k ochraně pracovního prostředí a k omezení emisí před jejich vypouštěním do atmosféry.

#### 4.1.1 Odlučování částečkových znečišťujících látek

Základem každého odlučovacího procesu částečkových škodlivin je separace částic z proudu čistěného plynu, v našem případě vzduchu, na odlučovací plochy. Podle druhu odlučovače může být odlučovací plocha přímo stěna odlučovače nebo ji tvoří vestavba odlučovače, povrch vláken, nebo vrstva již odloučených částic. Odlučovací plochu mohou tvořit i kapalně částice v proudu plynu či vodní pěna.

Charakter síly nebo přenosový děj, který se podílí na separaci částic z proudu plynu, určuje odlučovací princip. **V odlučovačích částečkových škodlivin se uplatňují** především následující **fyzikální principy**:

- gravitační,
- setrvačný,
- difúzní,
- elektrostatický.

Gravitační princip. V mezní vrstvě plynu obtékajícího povrch odlučovacích ploch se rychlost plynu blíží k nulové hodnotě a pohyb částic může být vyvolán gravitací. Pádová rychlost částic vyplývá z rovnováhy sil gravitačních a aerodynamických.

Setrvačný princip využívá setrvačnosti částic při obtékání překážek. Při obtékání překážek plynem s příměsí částic dochází k zakřivení proudnic. Hmotné částice vlivem své setrvačnosti nesledují přesně změny ve směru proudu, který je unáší a dráhy částic se odchyľují od proudnic. Částice narážející na překážku jsou jí zachyceny.

Difúzní princip je hlavní odlučovací princip při odlučování jemných částic ve vláknité vrstvě. Submikronové částice podléhají více molekulárním silám než účinku setrvačnosti a vnějších sil. Vykonnávají náhodný pohyb způsobený nárazy molekul plynu, a proto jsou odlučovány na obtékaných překážkách převážně vlivem molekulární difúze.

Elektrostatický princip. Hmotné částice obsažené v proudu plynu mohou získat elektrický náboj jednak přirozeným způsobem např. drcením, třením o stěny potrubí, vzájemnými nárazy apod., jednak umělým způsobem např. v elektrickém poli se zdroji iontů. Umělý náboj bývá řádově vyšší než náboj přirozený.

Praktickým příkladem elektrostatického principu odlučování je kanál kruhového průřezu, v jehož ose je umístěna drátová elektroda. Připojíme-li drátovou elektrodu na záporný pól zdroje vysokého usměrněného napětí a povrch kanálu na kladný pól zdroje, vznikne elektrické

pole. Průběh intenzity pole v závislosti na vzdálenosti  $r$  od drátové elektrody je vyjádřen vztahem

$$E = \frac{U}{r (\ln r_e - \ln r_i)}, \quad (4.1)$$

kde  $U$  je napětí mezi elektrodami,

$r_e, r_i$  – poloměr kanálu (sběrací elektrody) a poloměr drátové elektrody,

$r$  – vzdálenost od drátové elektrody.

Ze vztahu (4.1) vyplývá, že v blízkosti drátové elektrody dosahuje elektrické pole maximální hodnoty (elektrické namáhání plynu je největší), což je příčinou vzniku místního výboje – korony. V koruně je plyn ionizován a ionty záporné polaroty se pohybují ke sběrací (kladné) elektrodě. Částice unášené plynem, který protéká kanálem, získávají tzv. bombardováním ionty plynu záporný náboj a jsou dopravovány účinkem pole na sběrací elektrodu, kde jsou zachycovány.

### Účinnost odlučovacích zařízení.

Účinnost odlučovacích zařízení se vyjadřuje nejčastěji odlučivostí celkovou, odlučivostí frakční a mezí odlučivosti.

Celková odlučivost  $O_c$  je definována jako poměr hmotnostního toku částic v odlučovači zachycených  $\dot{m}_z$  k hmotnostnímu toku částic do odlučovače přivedených  $\dot{m}_p$

$$O_c = \frac{\dot{m}_z}{\dot{m}_p} 100 \%. \quad (4.2)$$

Celková odlučivost nerozlišuje, s jakou účinností jsou odlučovány částice určitých velikostí. Proto je účelné používat frakční odlučivost  $O_f$ , která vyjadřuje schopnost odlučovat částice v úzkém intervalu velikostí  $(a, a + \Delta a)$ . Frakční odlučivost je definována vztahem

$$O_f = \frac{\Delta \dot{m}_z}{\Delta \dot{m}_p} 100 \%, \quad (4.3)$$

kde  $\Delta \dot{m}_z$  a  $\Delta \dot{m}_p$  je hmotnostní tok částic zachycených v odlučovači a do odlučovače přivedených v intervalu velikostí  $(a, a + \Delta a)$ .

Mez odlučivosti  $a_m$  je definována jako velikost částic, pro niž má odlučovač frakční odlučivost 50 %.

**Odlučovače se dělí do čtyř základních skupin:**

- mechanické odlučovače suché,
- mechanické odlučovače mokré,
- filtry,
- elektrické odlučovače.

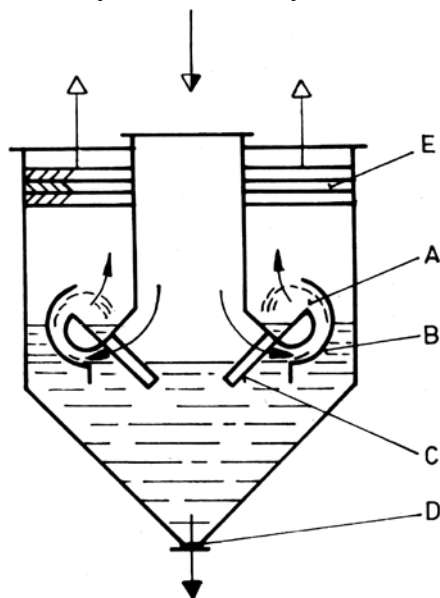
Mechanické odlučovače využívají převážně principu setrvačného a v menší míře gravitačního.

Suché mechanické odlučovače se vyznačují jednoduchou konstrukcí, spolehlivostí, malými pořizovacími náklady a malou spotřebou energie. Nevýhodou je jejich nízká odlučivost pro jemné frakce. Hlavními typy suchých mechanických odlučovačů jsou odlučovače lamelové, žaluziové a odlučovače vírové, nazývané také cyklóny.

K odlučování prachu u odsávacích zařízení je nejpoužívanější *vírový odlučovač*, který je vhodný zejména pro odlučování hrubšího dřevního odpadu, nebo k odlučování částic nelepivých nátěrových hmot. Příklad vírového odlučovače s tečným vstupem je na obr. 4.1. Komora odlučovače je složena z válcové a kuželové části. Čištěný vzduch vstupuje tangenciálně do válcové části a je uváděn do šroubovicového pohybu. Na unášené částice působí odstředivá síla, která dopravuje částice k vnějším stěnám komory a částice pak vlivem proudění vzduchu v mezní vrstvě se shromažďují ve výsypce B. Vzduch ve vírovém odlučovači se pohybuje sestupně ve vnější spirále a vzestupně ve vnitřní spirále (vlivem nízkého tlaku v jádře proudu) k výstupní trubce C.

Mokrý mechanický odlučovač mají v porovnání se suchými vyšší odlučivost. Téměř výhradně se pro odvod zachycených částic používá vody. Nevýhodou je spotřeba vody, nutnost kalového hospodářství, náročnější obsluha a údržba. K hlavním typům mokrých odlučovačů patří mokrý vírový odlučovač, hladinový odlučovač, pěnový odlučovač a proudový odlučovač.

K odlučování částecových nečistot u odsávacích zařízení je z mokrých mechanických odlučovačů nejpoužívanější *hladinový odlučovač*, který je znázorněn na obr. 4.2.

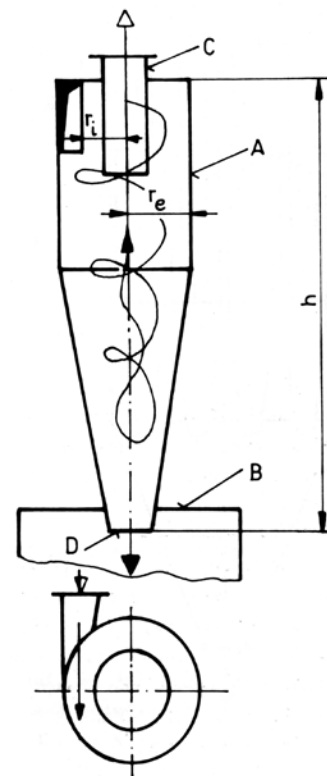


Obr. 4.2 Hladinový odlučovač  
A – odlučovací štěrbinu,  
B – vodící list, C – kanál,  
D – odvod kalu,  
E – odlučovač kapek

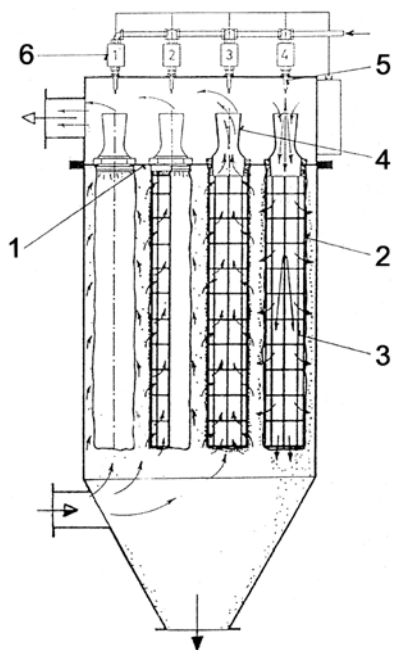
Proud čištěného vzduchu přiváděný ve střední části strhává z hladiny vodu a prochází tvarovanou štěrbinou A. K odlučování částic na vodících listech B dochází vlivem odstředivé síly působící na částice během jejich průchodu štěrbinou. Stěny štěrbin jsou omývány vodou strženou z hladiny. Voda stržená vzduchem se vrací kanály C do spodní části vodní nádrže, z jejíhož dna je odpouštěn kal hrdlem D. Na výstupu vyčištěného vzduchu z odlučovače je umístěn odlučovač kapek E.

Vzhledem k vysoké odlučivosti i pro jemné částice je tento odlučovač značně rozšířen, zejména u odsávacích zařízení ve slévárnách, hutích, keramických provozech, při nanášení nátěrových hmot, pro odlučování uhlého prachu a v dalších případech, pro které nejsou vhodné látkové filtry, nebo když se jedná o odlučování výbušných prachů.

Filtry. Při průtoku znečištěného plynu filtračním materiálem jsou částice odlučovány především setrvačným, difúzním, gravitačním a někdy i elektrostatickým účinkem. U částic, jejichž rozměry jsou větší, než průměry pórů ve filtru se uplatňuje i tzv. síťový účinek. Při zaplnění filtru prachem vzniká na povrchu filtru další filtrační vrstva z odloučených částic a postupně dochází k zvyšování tlakové ztráty. Při překročení určité tlakové ztráty je nutno vrstvu částic odstranit – filtr regenerovat. Regenerace se zajišťuje pulzním profukem



Obr. 4.1 Vírový odlučovač s tečným vstupem  
A – komora odlučovače,  
B – výsypka prachu,  
C – výstupní trubka,  
D – výstup prachu z odlučovače



Obr. 4.3 Hadicový filtr s regenerací pulzním profukem

- 1 – dělicí rovina mezi znečištěnou a čistou částí,
- 2 – hadice,
- 3 – drátěná vestavba,
- 4 – dýzové nástavce,
- 5 – dýzy,
- 6 – solenoidové ventily

tlakovým vzduchem, nebo zpětným proplachem okolním vzduchem, který protéká filtračním materiálem v opačném směru než čistěný vzduch při vlastní filtraci, nebo mechanickým způsobem – oklepáváním filtračního materiálu.

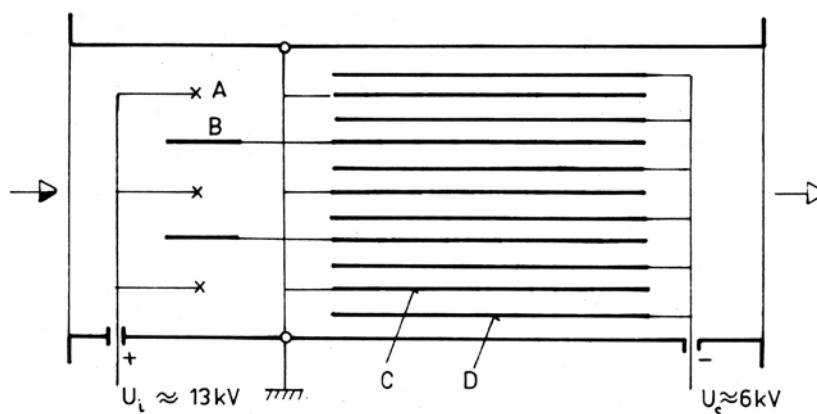
Filtračním materiálem bývají především filtrační textilie vyráběné tkaním nebo vpichovací technologií s následnou povrchovou úpravou. Odlučivost filtrů závisí na druhu filtrační textilie a na filtračních podmínkách. Zvýšení odlučivosti lze dosáhnout zmenšováním pórovitosti nebo zvětšováním tloušťky filtrační vrstvy. Filtrační materiál je ve tvaru hadic, nebo hlubokých kapes, podle toho se filtry dělí na hadicové a kapsové.

*Hadicový filtr s regenerací pulzním profukem* je na obr. 4.3. Každá hadice má svoji dýzu pro pulzní profuk vzduchem o tlaku 0,5 MPa, po dobu asi 0,1 sekundy. Vzduch pro pulzní profuk se přivádí přes membránový ventil, jehož dobu otevření řídí ovládací solenoidový ventil.

Filtry se používají k zachycení suchých a nemastných nečistot ze vzduchu odsávaného např. od dřevoobráběcích strojů, ale také ze vzduchu odsávaného v textilních, keramických aj. provozech.

Elektrické odlučovače. Pro zachycení částicových nečistot ze vzduchu lokálně odsávaného se elektrické odlučovače používají např. u jednotkových odsávacích zařízení při svařování elektrickým obloukem. *Dvouzónový elektrický odlučovač* je schematicky znázorněný na obr. 4.4.

V první zóně jsou elektrody ionizační, tvořené drátovými elektrodami A napnutými mezi



Obr. 4.4 Dvouzónový elektrický odlučovač  
A, B – elektrody ionizační, C, D – elektrody sběrací

uzemněnými plochými elektrodami B. V této zóně získávají částice elektrický náboj (asi 13 kV). K odlučování částic dochází v druhé zóně na soustavě sběracích elektrod C a D střídavě uzemněných a napojených na napětí asi 6,5 kV. Sběrací elektrody se čistí vodou, a to ručně,

nebo automaticky. V těchto odlučovačích se používá převážně kladná korona, která způsobuje malý vývin ozónu.

#### 4.1.2 Odlučování plynných znečišťujících látek

K odlučování plynných znečišťujících látek se používají především sorpční procesy – absorpce a adsorpce.

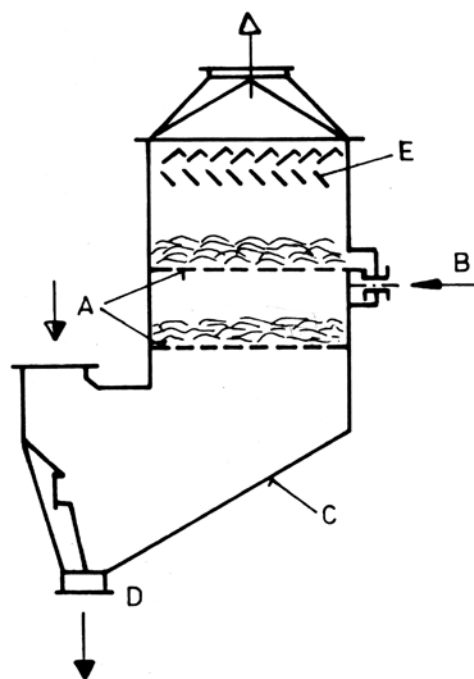
**Absorpce** je difúzní pochod, při němž dochází k pohlcování plynu ve vhodné kapalině – absorbentu. Absorbent musí být dostatečně selektivní, aby pohlcoval pokud možno pouze složku, kterou je třeba odstranit. Opačným pochodem je exsorpce, při níž např. snížením tlaku, nebo zvýšením teploty absorpčního roztoku se pohlcovaný plyn z kapaliny uvolňuje. Absorpce se provádí v různých zařízeních, jako jsou bezvýplňové sprchové absorbéry, výplňové absorpční věže a pěnové absorbéry.

Bezvýplňové absorbéry jsou nádoby, v nichž je absorbuje látka rozstříkovaná soustavou trysek proti proudu čistěného vzduchu. Styčná plocha mezi čistěným vzduchem a kapalinou je dána celkovým povrchem kapiček absorpční kapaliny.

Výplňové absorpční věže jsou v praxi nejčastěji používané. Výplň absorbérů tvoří soustava mříží, nebo sypaná náplň, po níž stéká shora dolů absorpční kapalina a proti ní proudí vzhůru čistěný vzduch. Jejich výhodou je velká absorpční účinnost.

Pěnové absorbéry jsou zařízení shodná s pěnovými odlučovacími částicemi. Pěnový absorbér (obr. 4.5) je nádoba, kterou protéká čistěný vzduch přes děrované rošty. Na rošty je přiváděna absorpční kapalina a vytváří se tak na roštích pěnové vrstvy. V těchto vrstvách je pohlcován plyn, který chceme ze vzduchu odstranit. Současně zde mohou být setrvačnými silami odlučovány i částicové škodliviny. Vznik pěny je podmíněn režimem daným přiváděným množstvím absorpční kapaliny, čistěného vzduchu a perforací roštu. Nevýhodou tohoto absorbérů je citlivost na změny objemového toku čistěného vzduchu, který nesmí kolísat o více než 20%.

**Adsorpce** je druhá sorpční metoda. Je to difúzní pochod, při němž dochází k vázání plynné škodliviny na povrchu vhodné tuhé látky – adsorbentu. Adsorpce může probíhat tak, že molekuly adsorbované látky se zachycují na povrchu adsorbentu, působením van der Waalsových sil. Takový pochod se nazývá fyzikální adsorpce a vázaná plynná příměs může být z povrchu adsorbentu uvolněna desorpce. Tuto lze uskutečnit např. zvýšením teploty, nebo snížením tlaku. Druhým případem adsorpce je chemisorpce, při níž dochází k chemické reakci mezi adsorbovanou a adsorbující látkou a ke vzniku nové povrchové sloučeniny. Vazba chemisorbované látky na povrchu adsorbentu bývá tak pevná, že většinou jde o nevratný pochod. Jako adsorbent se používají pórovité materiály, např. aktivní uhlí, aktivní koks, silikagel aj. Při chemisorpci je povrch adsorbentu opatřen tenkou vrstvou vhodné chemické látky.



Obr. 4.5 Pěnový absorbér  
A – rošty,  
B – přívod absorpční kapaliny,  
C – kalová nádrž, D – odvod kalu,  
E – odlučovač kapek

Adsorbce se provádí v adsorbérech. Adsorbér je obvykle válcová nádoba, která má u dna rošt, na němž je nasypána vrstva adsorpčního materiálu. Touto vrstvou prochází čištěný vzduch tak dlouho, dokud se adsorbent nenasytí a nedochází k průniku škodliviny. Pak je třeba adsorbent regenerovat, nebo nahradit novým.

## 4.2 FILTRY ATMOSFÉRICKÉHO VZDUCHU

Filtry atmosférického vzduchu jsou určeny k zachycování příměsí (škodlivin) ze vzduchu venkovního nebo oběhového u větracích a klimatizačních zařízení. Slouží k zachycení jak částecových škodlivin (tuhých i kapalných) tak i škodlivin plyných a odérů.

### 4.2.1 Filtrace částic

Základem filtrace částic atmosférického vzduchu je odlučování částic ve vláknité vrstvě, složené z filtračních vláken. Při filtraci dochází k odlučování částic ve vláknité vrstvě a poté i na již odloučených částicích. Oblast velikosti odlučovaných částic bývá od 0,01 do 100  $\mu\text{m}$ .

Kvalitu filtrů atmosférického vzduchu určuje především:

- *tlaková ztráta*, která je udávána v podkladech výrobců vždy v čistém stavu,
- *jímavost*, což je hmotnost prachu, kterou může filtr zachytit, aniž by se jeho filtrační schopnost snížila – udává se maximální přípustnou změnou tlakové ztráty filtru,
- *odlučivost (účinnost)*, což je poměr hmotnostního toku prachu nebo aerosolu odloučeného k hmotnostnímu toku prachu nebo aerosolu přivedeného do filtru,
- *průnik*, což je poměr koncentrace aerosolu za filtrem ke koncentraci aerosolu před filtrem.

Koncentrace příměsí se uvádějí nejčastěji jako hmotnostní v  $[\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}]$  nebo  $[\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ .

### Třídění a použití filtrů

Filtry se dělí na filtry pro odlučování částic u běžného větrání a na filtry vysoce účinné.

Filtry pro běžné větrání. Třídí se a zkouší dle převzaté evropské normy ČSN EN 779 [13]. Dělí se na filtry pro hrubou, střední a jemnou filtraci. *Filtry pro hrubou filtraci*, označené G1 – G4 se používají jako předfiltry nebo v jednom stupni, kde nejsou vysoké nároky na vyčištění. *Filtry pro střední filtraci* se označují M5, M6. *Filtry pro jemnou filtraci* označované F7 – F9 se používají nejčastěji jako druhý stupeň filtrace pro vysoce účinnou filtraci.

Vysoce účinné filtry. Třídí se a zkouší podle normy ČSN EN 1822 [14]. Filtry se dělí na HEPA označené H10 – H14 a ULPA označené U 15 – U17. Tyto filtry se používají jako druhý nebo třetí stupeň filtrace a je nutné předřadit filtry třídy G – F.

### Provedení filtrů

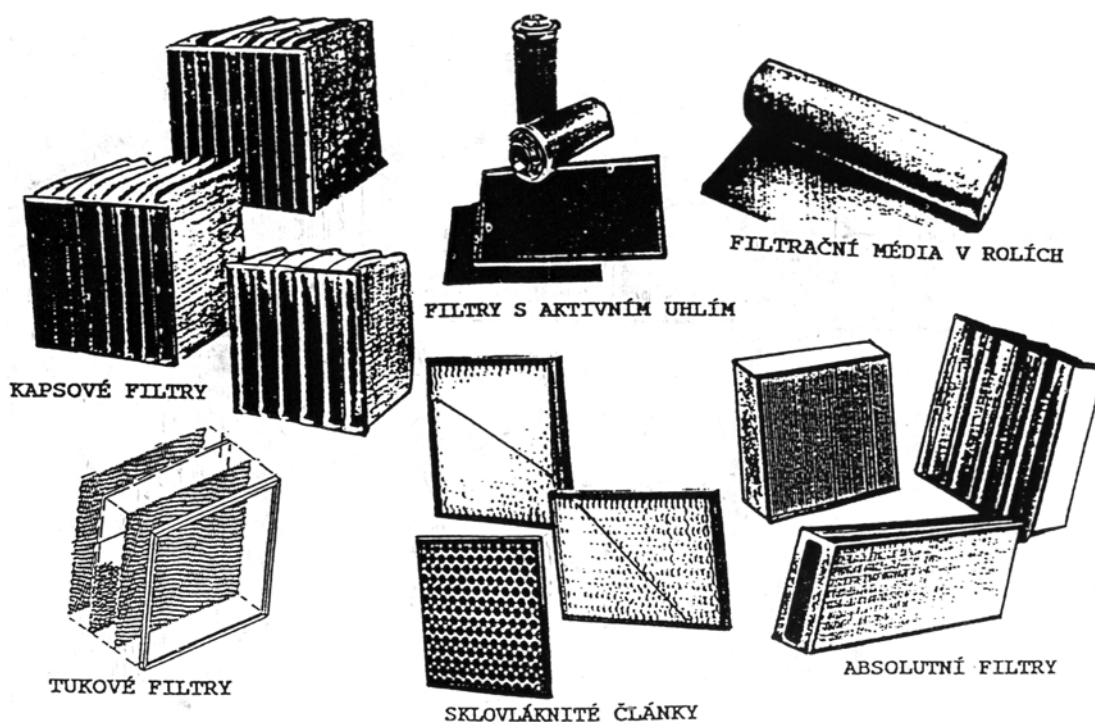
Podle provedení lze filtry pro běžné větrání v zásadě rozdělit na filtry vložkové a pásové, zatímco filtry vysoce účinné jsou vesměs vložkové.

Vláknité filtrační materiály, které tvoří převážnou část filtračních materiálů, se dělí na:

- rohože ze syntetických nebo skleněných vláken, která jsou spojena pojivem nebo tepelným zpracováním,
- rouna z jemnějších skleněných, syntetických nebo organických vláken, která jsou nanášena na nosný spojený podkladový materiál,
- vpichované textilie – zpravidla syntetická vlákna vzájemně propojená vpichovací technologií,
- filtrační papíry z jemných skleněných nebo organických vláken, vyráběné papírenskou technologií.

Pro nižší třídy filtrů se používají i porézní syntetické materiály, nebo hustší síta.

**Vložkové filtry.** Filtr tvoří skříň, do níž se zasouvají vložky (obr. 4.6) ve tvaru desek (článků), kapes či ve tvaru krabic se skládaným filtračním materiálem, které se používají u vysoce účinných filtrů.



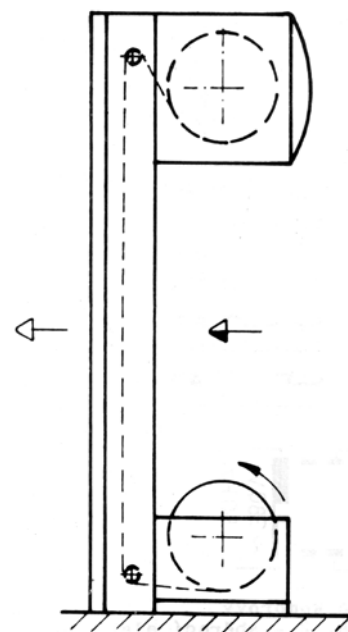
Obr. 4.6 Filtrační vložky

**Pásové filtry.** Používají se pro větší objemové toky čištěného vzduchu. Jsou dvojího druhu, a to s pevným pásem a pohyblivým pásem (tzv. odvinovací). U odvinovacích filtrů (obr. 4.7) je filtrační vrstva ve tvaru pásu navinuta na horní cívce, ze které se převíjí na cívku spodní. Převíjení se provádí při překročení maximální přípustné tlakové ztráty (jímavosti), a to buď ručně, nebo automaticky. U filtrů s pevným pásem je filtrační pás vlnovitě napnutý ve filtrační komoře.

#### 4.2.2 Sorpční filtry

Pro zachycení plynných znečišťujících látek a pachů se používají sorpční filtry **na principu adsorpce**. Adsorpce je difúzní pochod, při němž dochází k vázání plynu na povrchu vhodné tuhé látky – adsorbentu. Základní akční látka (adsorbent) je aktivní uhlí, aktivní koks, silikagel aj. Nejpoužívanější je aktivní uhlí. Rozlišuje se **adsorpce fyzikální a chemická**.

Při fyzikální adsorpci dochází k zachycování molekul adsorbované látky na povrchu adsorbentu, působením van der



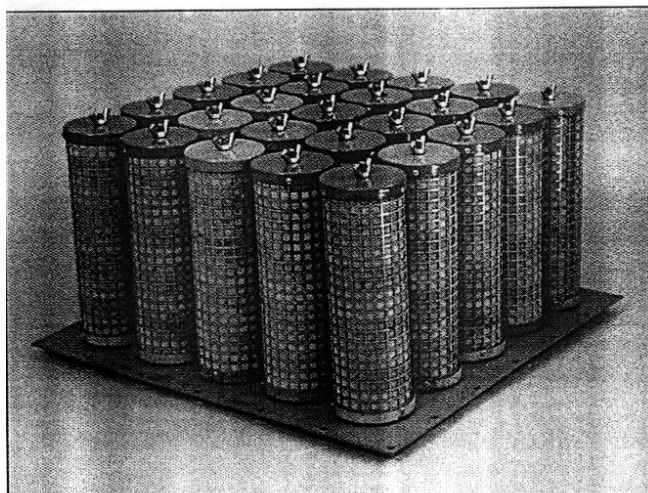
Obr. 4.7 Odvinovací filtr



Waalsových sil. Látky s bodem varu nad  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  jsou většinou dobře zachytitelné fyzikální adsorpcí.

Při chemické adsorpci dochází k chemické reakci mezi adsorbovanou látkou a adsorbentem a ke vzniku nové povrchové sloučeniny. Jako adsorbent se používá opět nejčastěji aktivní uhlí, ale na povrchu impregnované, např. bromem nebo jinými látkami, čímž se rozšiřuje možnost zachycení některých plynů a pachů neadsorbovatelných fyzikální adsorpcí.

Konstrukce sorpčních filtrů jsou různé, ale nejčastěji se skládají z dutých válcových vložek (patron) naplněných aktivním uhlím, které jsou uchyceny na nosné desce (obr. 4.8), nebo z vrstvy aktivního uhlí nanesené na povrchu filtračního materiálu (viz filtrační vložka s aktivním uhlím na obr. 4.6).



Záchyt organických látek z plyných směsí, kromě uhlovodíků do  $\text{C}_5$  v klimatizačních a větracích zařízeních, velmi dobrý záchyt látek s bodem varu nad  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Obr. 4.8 Sorpční vložka

## LITERATURA

- [1] Janotková, E.: *Technika prostředí*. Ediční středisko VUT Brno, 1991
- [2] Chyský, J. – Hemzal, K. a kol.: *Větrání a klimatizace. Technický průvodce č. 31*. Bolit – B press Brno 1993
- [3] Nový, R. a kol.: *Technika prostředí*. Vydavatelství ČVUT, Praha 2000
- [4] Székyová, M. – Ferstl, K. – Nový, R.: *Větrání a klimatizace*. JAGA GROUP, s.r.o., Bratislava 2006
- [5] Fanger, P. O.: *Thermal Comfort*. McGraw-Hill. New York 1972
- [6] McQuiston, F. C. – Parker, J. D. – Spitler, J. D.: *Heating, ventilating, and air conditioning: analysis and design*. John Wiley & Sons, 2005
- [7] Goodfellow, H. Tähti, E.: *Industrial Ventilation. Design Guidebook*. Academic Press. San Diego 2001

## Normy a legislativní dokumenty

- [8] ČSN EN ISO 7730 Ergonomie tepelného prostředí – Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního komfortu: říjen 2006
- [9] ČSN EN 12831 Tepelné soustavy v budovách – Výpočet tepelného výkonu: 2005
- [10] ČSN ISO 7243 Horká prostředí. Stanovení tepelné zátěže pracovníka podle ukazatele WBGT (teploty mokrého a kulového teploměru): 1993
- [11] ČSN EN ISO 14505-2 Ergonomie tepelného prostředí – Hodnocení tepelného prostředí ve vozidlech – Část 2: Stanovení ekvivalentní teploty: 2007
- [12] ČSN EN ISO 7726 Ergonomie tepelného prostředí. Přístroje pro měření fyzikálních veličin: květen 2002
- [13] ČSN EN 779 Filtry atmosférického vzduchu pro odlučování částic pro všeobecné větrání – Stanovení filtračních parametrů: 2012
- [14] ČSN EN 1822-1 Vysoce účinné filtry (HEPA a ULPA) – Část 1: Klasifikace, ověřování vlastností, označování: květen 2010
- [15] Nařízení vlády 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci
- [16] Nařízení vlády 68/2010 Sb., kterým se mění nařízení vlády č. 361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci
- [17] Nařízení vlády č. 93/2012 Sb., kterým se mění nařízení vlády č.361/2007 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci, ve znění nařízení vlády č. 68/2010 Sb.
- [18] Vyhláška č.6/2003 Sb., kterou se stanoví hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí pobytových místností některých staveb
- [19] Vyhláška č.410/2005 Sb. o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých
- [20] Vyhláška č.343/2009 Sb., kterou se mění vyhláška č.410/2005 Sb., o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých