

VLHKÝ VZDUCH – STAVOVÉ VELIČINY

Vlhký vzduch

- vlhký vzduch je směsí suchého vzduchu a vodní páry okupující společný objem
- homogenní směs – nastává pokud je voda ve směsi v plynném stavu
- heterogenní směs – ve vzduchu jsou obsaženy různé fáze vody
 - částečně ve stavu páry a částečně ve stavu kapalném (kapky, déšť, mrholení, atd.),
 - částečně ve stavu páry a částečně ve stavu tuhém (ledové krystalky, sníh, atd.),
 - částečně ve stavu páry, částečně ve stavu kapalném a částečně ve stavu tuhém.
- pro naše účely se budeme ve výpočtech zabývat pouze stavy homogenních směsí

Základní termodynamické hodnoty suchého vzduchu

měrná plynová konstanta	$R_{sv} = 287,062 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
střední molární hmotnost	$M_{sv} = 28,964 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$
měrná tepelná kapacita za stálého tlaku	$c_{p,sv} = 1005,968 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
kritická teplota	$T_{K,sv} = 132,45 \text{ K}$
kritický tlak	$p_{K,sv} = 3,77 \text{ MPa}$
kritická měrná hmotnost	$\rho_{K,sv} = 349 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Poissonova konstanta	$\kappa = 1,39$

V širším okolí atmosférických podmínek ($p = 100 \text{ kPa}$, $t = 20^\circ\text{C}$) se vztah mezi základními stavovými veličinami suchého vzduchu velmi málo liší od stavové rovnice ideálního plynu.

Daltonův zákon

Celkový tlak směsi plynů p je dán součtem dílčích (parciálních) tlaků jednotlivých složek p_i . Pokud rovnici vyjádříme ve vztahu k vlhkému vzduchu vypadá následovně:

$$p = \sum p_i = p_{sv} + p_{vp} \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

p_{sv} – parciální tlak suchého vzduchu [Pa]

p_{vp} – parciální tlak vodní páry [Pa]

Parciální tlak nasycené vodní páry p_p''

Množství vodní páry obsažené ve směsi vlhkého vzduchu se může měnit. Stav při kterém vzduch pojme maximální množství vodní páry se nazývá nasycení.

Parciální tlak nasycené vodní páry je tedy tlakem vodní páry při nasycení. Tento tlak je funkcí pouze teploty a je zároveň maximálním tlakem pro zadanou teplotu.

Pára se se vzduchem může mísit v libovolném poměru, má-li pára i vzduch při tlaku 100 kPa teplotu vyšší než 100°C .

$p_p < p_p''$ - je vlhký vzduch nenasycený parou,

$p_p = p_p''$ - je vlhký vzduch nasycený,

$p_p > p_p''$ - je vlhký vzduch přesycený a směs je heterogenní.

Pro stanovení parciálního tlaku nasycené vodní páry se používají takzvané tabulky vodní páry, kde lze pro teplotu t definující stav vzduchu nalézt hodnotu parciálního tlaku. Pokud potřebujeme zjistit parciální tlak suchého vzduchu je nejjednodušší jej stanovit rozdílem z celkového tlaku podle Daltonova zákona.

Vztah mezi parciálním tlakem nasycené vodní páry a teplotou rosného bodu:

Teplota rosného bodu t_r [°C]

Teplota rosného bodu je teplota zjistitelná pro daný stav vlhkého vzduchu při nasycení pro stejnou měrnou vlhkost a tlak jaké má uvažovaný stav vzduchu.

$$p_{vp} = p_{vp}''(t_r)$$

Parciální tlak vodní páry posuzovaného stavu vzduchu $p_{vp}(t, \dots)$ je roven parciálnímu tlaku nasycené vodní páry p_{vp}'' pro teplotu rosného bodu t_r odpovídající uvažovanému stavu.

Tento vztah je výhodné použít, pokud známe teplotu rosného bodu pro uvažovaný stav vzduchu, potom pomocí tabulek určíme parciální tlak vodní páry.

Stavová rovnice

Základní rovnici pro uvedení základních veličin do souvislosti je tzv. stavová rovnice plynu. Protože je vlhký vzduch směsí je nutné vyjádřit ji ve dvou částech.

- suchý vzduch

$$p_{sv}V = m_{sv}R_{sv}T \quad (3)$$

- vodní pára

$$p_{vp}V = m_{vp}R_{vp}T \quad (4)$$

V – objem směsi [m^3]

T – termodynamická teplota směsi vlhkého vzduchu (shodná s teplotami jednotlivých složek) [K]

m_{sv} – hmotnost suchého vzduchu [kg]

m_{vp} – hmotnost vodní páry [kg]

R_{sv} – měrná plynová konstanta suchého vzduchu = 287,11 [J/kgK]

R_{vp} – měrná plynová konstanta vodní páry = 461,5 [J/kgK]

- pro celou směs platí:

$$pV = mR_{vv}T \quad (5)$$

$m = m_d + m_w$ – celková hmotnost směsi vlhkého vzduchu [kg]

$R_{vv} = \frac{m_{sv}}{m} R_{sv} + \frac{m_{vp}}{m} R_{vp}$ – měrná plynová konstanta směsi vlhkého vzduchu [J/kgK]

Vyjádření vlhkosti vzduchu

Absolutní vlhkost vzduchu a

Absolutní vlhkost vzduchu a je hmotnost vodní páry obsažené v $1m^3$ vlhkého vzduchu. Protože objem vlhkého vzduchu je podle Oswaldova* zákona:

$$V_{vv} = V_{sv} = V_{vp} \quad (6)$$

je absolutní vlhkost $a = \rho_{vp} = \frac{m_{vp}}{V_{vp}}$ při tlaku vodních par p_{vp} o teplotě T . Pro homogenní směs se její hodnota pohybuje v rozsahu $(0; \rho_p'')$. – měrná hmotnost syté vodní páry

Měrná vlhkost x

- definována jako poměr hmotnosti vodní páry a suchého vzduchu
- veličina využívaná pro přesnou kvantifikaci množství vodní páry
- využití při výpočtech spojených s úpravou vlhkosti vzduchu (vlhčení, odvlhčování)

$$x = \frac{m_{vp}}{m_{sv}} = \frac{R_{sv}}{R_{vp}} \cdot \frac{p_{vp}}{p - p_{vp}} = 0,622 \cdot \frac{p_{vp}}{p - p_{vp}} \quad [\text{kg/kg s.v.}, \text{g/kg s.v.}] \quad (7)$$

- $R_{sv} = 287,062 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $R_{vp} = 461,518 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- jednotka kg/kg s.v. se čte přesně podle toho co vyjadřuje – počet kilogramů vodní páry na kilogram suchého vzduchu

Relativní vlhkost φ , rh

- Relativní vlhkost vzduchu φ je odvozenou experimentálně měřitelnou veličinou.
- definována poměrem parciálního tlaku vodní páry a parciálního tlaku nasycené vodní páry při konstantní teplotě
- alternativně definovatelná poměrem absolutní vlhkosti daného vzduchu k absolutní vlhkosti nasyceného vzduchu při stejné teplotě.
- v podstatě vyjadřuje míru nasycení vzduchu vodní parou, tj. jak je vzdálený k nasycení

$$rh = \frac{p_{vp}}{p_{vp}''} \quad [-, \%] \quad (8)$$

Další termodynamické veličiny popisující stav vlhkého vzduchu

Měrná hmotnost ρ

$$\rho = \rho_{sv} + \rho_{vp} = \frac{p_{sv}}{R_{sv} \cdot T} + \frac{p_{vp}}{R_{vp} \cdot T} = \frac{1,316 \cdot 10^{-3}}{T} \cdot (2,65 \cdot p + \varphi \cdot p_{vp}'') \quad [\text{kg/m}^3] \quad (9)$$

Měrná entalpie h

- definována jako součet entalpií jednotlivých částí směsi vlhkého vzduchu
- není měrnou veličinou, tj entalpií 1 kg vlhkého vzduchu – stanovuje se na 1 kg suchého vzduchu
- umožňuje popsat tepelnou hladinu vlhkého vzduchu, při její změně potom vyjadřuje množství sděleného tepla

$$h = h_{sv} + h_{vp} = c_{sv} \cdot t + x \cdot (c_{vp} \cdot t + l) \quad [\text{J/kg d.a.}] \quad (10)$$

c_{sv} – měrná tepelná kapacita suchého vzduchu = 1010 [J/kg.K]

c_{vp} – měrná tepelná kapacita vodní páry = 1840 [J/kg.K]

x – měrná vlhkost vlhkého vzduchu [kg/kg s.v.]

t – teplota stavu vzduchu [°C]

l – skupenské teplo vypařování vody = 2500 [kJ]

Pro nasycený vlhký vzduch $\varphi = 1$:

$$x = x'' = 0,622 \frac{p''_{vp}}{p_{vv} - p''_{vp}} \quad (11)$$

Je-li měrná vlhkost vzduchu $x > x''$ je vzduch parami přesycen (heterogenní směs).

Když teplota přesyceného vzduchu je $t > 0 \text{ } ^\circ\text{C}$,

- skládá se vzduch z 1 kg suchého vzduchu, x'' kg vodní páry a $\Delta x = x - x''$ kg zkondenzované vody o entalpii $i_k = c_{p,k} \cdot t$. Pak entalpie přesyceného vzduchu je:

$$h = c_{sv} \cdot t + x'' \cdot (l_{2,3} + c_{vp} \cdot t) + \Delta x \cdot c_k \cdot t \quad [J \cdot kg_{sv}^{-1}] \quad (12)$$

Při teplotě přesyceného vlhkého vzduchu $t < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$,

- obsahuje vzduch ledové krystalky v měrném množství $\Delta x_l = x - x''$. Jeho entalpie bude menší o skupenské teplo tuhnutí vody $l_{1,2}$ a teplo potřebné k ochlazení ledu z $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ na $(-t) \text{ } ^\circ\text{C}$. Pak:

$$h = c_{sv} \cdot t + x'' \cdot (l_{2,3} + c_{vp} \cdot t) - \Delta x_l (l_{1,2} - c_l \cdot t) \quad [J \cdot kg_{sv}^{-1}] \quad (13)$$

Teplota vlhkého teploměru t_{wb}

- teplota, kterou vzduch dosáhne při nasycení vypařováním vody
- nejnižší teplota adiabatického procesu vlhkého vzduchu

MOLLIÉROV DIAGRAM A ZMĚNY STAVU VLHKÉHO VZDUCHU

Popis Molliérova diagramu

- grafický nástroj pro zpracování izobarických změn stavů vlhkého vzduchu
- vhodný pro definici ustálených stavů
- samotné průběhy procesů jsou zjednodušovány
- Diagram je konstruován vždy pro daný tlak vlhkého vzduchu p_{vv} - nejčastěji 100 kPa
- Suchý vzduch má nulovou vlhkost, jeho stavové hodnoty lze proto odečítat na svislé ose, kde $x = 0$, $\varphi = 0$.
- Mez nasycení vlhkého vzduchu $\varphi = 1$ dělí diagram na dvě oblasti.
 - oblast nad křivkou nasycení je oblastí stavů *nenasyceného vlhkého vzduchu*
 - oblast pod křivkou nasycení je oblastí *přesyceného vlhkého vzduchu*.
- V oblasti nenasyceného vlhkého vzduchu jsou zakresleny křivky konstantní relativní vlhkosti $\varphi = \text{konst.}$ v intervalu od $\varphi = 0$ (suchý vzduch) do $\varphi = 1$ (nasycený vlhký vzduch). Křivka nasycení a křivky stálých relativních vlhkostí se v $i - x$ diagramu vynášejí bod po bodu při zvoleném tlaku p_{vv} vyčíslením φ z rovnice (7).
- Křivky konstantní relativní vlhkosti se na izotermě $t = 0\text{ °C}$ nepatrně lámou, protože tlak p_p'' pro teploty nad 0 °C odečítáme na křivce vypařování ve fázovém diagramu $p - T$ a pro teploty pod 0 °C na křivce sublimační. Tyto křivky nemají ve trojném bodě společnou tečnu.
- Izoterm $t = \text{konst.}$ se vynášejí do diagramu řešením rovnic pro entalpii vzduchu (10, 12, 13)
- směr je určen derivací $\delta = \frac{di}{dx}$
- izoterm nejsou úplně rovnoběžné, ale mírně se rozbíhají.
- Na křivce nasycení se izoterm lámou a mají *přibližně* směr $i = \text{konst.}$
- Nulová izoterma $t = 0\text{ °C}$ v oblasti přesyceného vlhkého vzduchu je plochou ohraničenou čarami pro heterogenní směs s tuhou fází (ledová mlha) a pro heterogenní směs s kapalnou fází (mokrý mlha). Mezi oběma nulovými izotermami se ve směsi vyskytují všechny tři fáze (smíšená mlha).
- Pro daný tlak vlhkého vzduchu p_{vv} je parciálním tlakem par p_{vp} jednoznačně určena měrná vlhkost vzduchu x , resp. obráceně. Vedle osy x je tedy v Molliérově diagramu vynesena i parciální tlak vodní páry p_{vp} .
- Každý stav vzduchu je v diagramu určen jedním bodem jako průsečíkem čar libovolných dvou veličin v diagramu vynesených (t , φ , x , h , ρ).

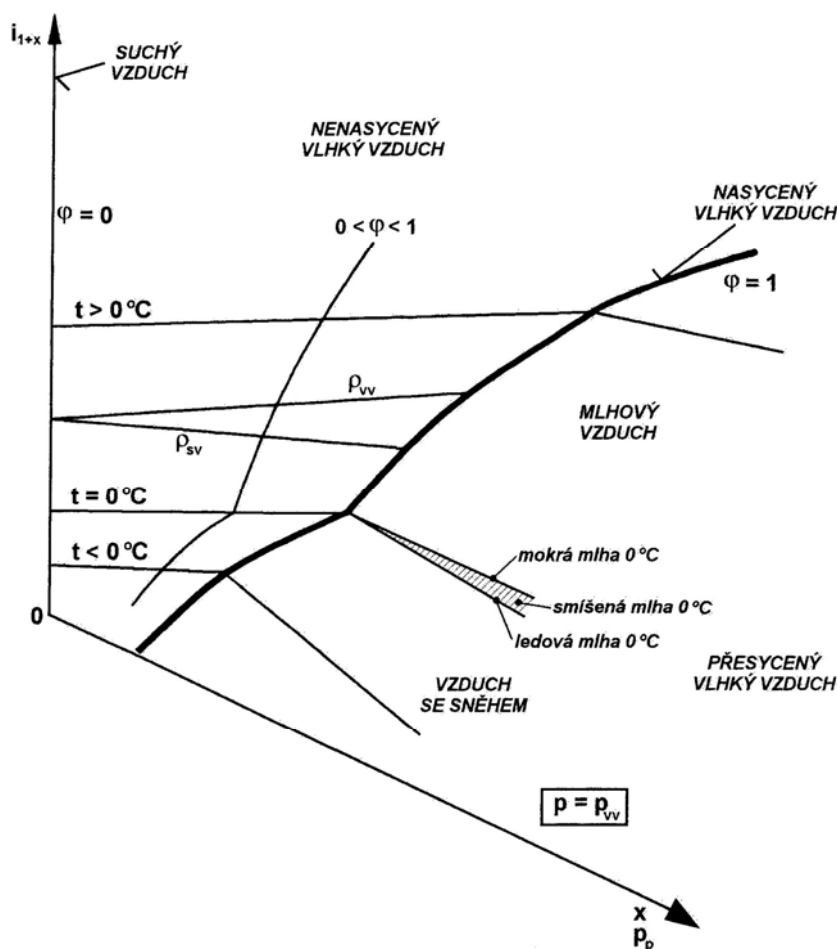
Základní orientace v Molliérově diagramu

- graf, který používáme při popisu změn stavů vzduchu ve vzduchotechnice je výsekem obecného Molliérova diagramu a nazývá se $i - x$ diagram
- graf přímo obsahuje tyto důležité veličiny a parametry:

teplota vzduchu (vertikální osa)	relativní vlhkost (křivky)	křivku meze sytosti ($\varphi = 1$)
měrná vlhkost a parciální tlak vodní páry (společně na vodorovné ose)	měrná entalpie (šikmé čáry)	směrové měřítko (obchází diagram ze tří stran)
faktor citelného tepla (měřítko nejvýše nahoře)	střed diagramu ($t = 20\text{ °C}$, $x = 5\text{ g/kg s.v.}$)	

Střed diagramu ($t = 20\text{ °C}$, $x = 5\text{ g/kg s.v.}$)

- dohodnutý bod, ke kterému je orientováno měřítko faktoru citelného tepla a směrové měřítko
- používá se pro definici vedení čar některých procesů (změna stavu vzduchu v interiéru, odvození pro vlhčení, sušení, odpařování apod.)



Obr.1 Obecné schéma Mollierova diagramu

Jak nalézt teplotu rosného bodu a teplotu vlhkého teploměru

Teplota rosného bodu

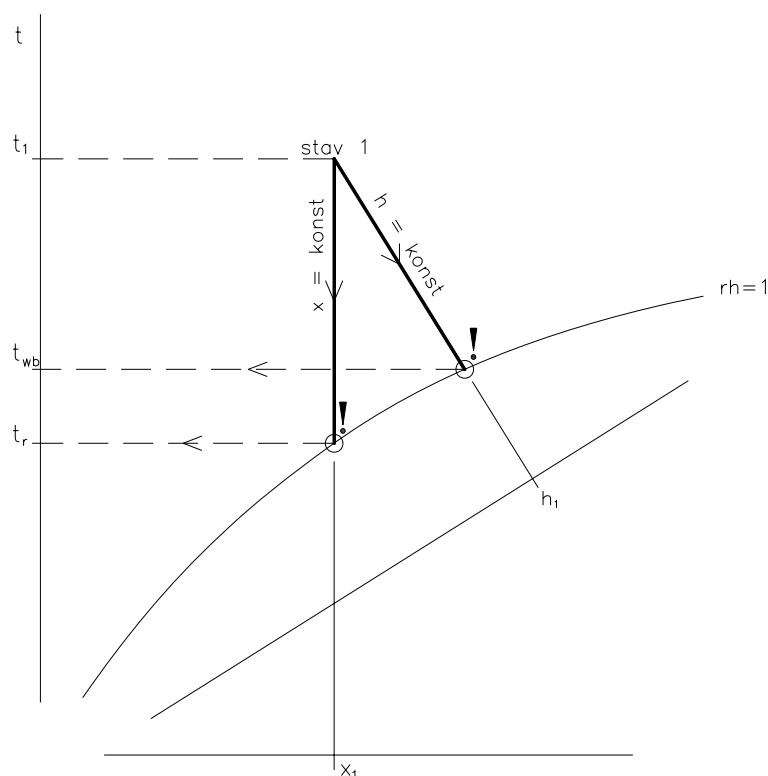
Definice: Teplota rosného bodu je teplota zjistitelná pro daný stav vlhkého vzduchu při nasycení pro stejnou měrnou vlhkost a tlak jaké má uvažovaný stav vzduchu.

- ze zadaného stavu vedeme svislou čáru po konstantní měrné vlhkosti ($x = \text{konst.}$) na křivku sytosti ($\varphi = 1$) a v tomto bodě nám izoterma na průsečíku udává teplotu rosného bodu

Teplota vlhkého teploměru

Definice: Teplota vlhkého teploměru je teplota, kterou vzduch dosáhne při nasycení vypařováním vody. Je to nejnížší teplota adiabatického procesu změny stavu vlhkého vzduchu.

- ze zadaného stavu vedeme čáru po konstantní entalpii ($h = \text{konst.}$) na křivku sytosti ($\varphi = 1$) a v tomto bodě nám izoterma na průsečíku udává teplotu vlhkého teploměru



Obr.2 Hledání teploty rosného bodu a vlhkého teploměru

Pozn.: při hledání stavových veličin v grafu není třeba „interpolovat“ hodnoty s co největší přesností. Teploty stačí definovat na cca 0,5 °C, měrnou vlhkost na cca 0,1 g/kg s.v., měrnou entalpii na 0,5 kJ/kg s.v. a parciální tlak vodní páry na max. 25 Pa. Samotná stavba grafu je zatížena vlastní chybou, uvážíme-li přesnost grafické práce tak nemá cenu to přehánět :-).

Základní procesy změn stavů vzduchu

Úvodní vysvětlení pojmů sděleného tepla při procesech

Pro změnu při konstantním tlaku platí podle I. zákona termodynamiky, že sdělené teplo Q_{12} je rovno rozdílu celkových entalpií. Platí:

$$Q_{1,2} = I_2 - I_1 = [(i_{1+x})_2 - (i_{1+x})_1] \cdot m_{sv} \quad [\text{J}] \quad (1)$$

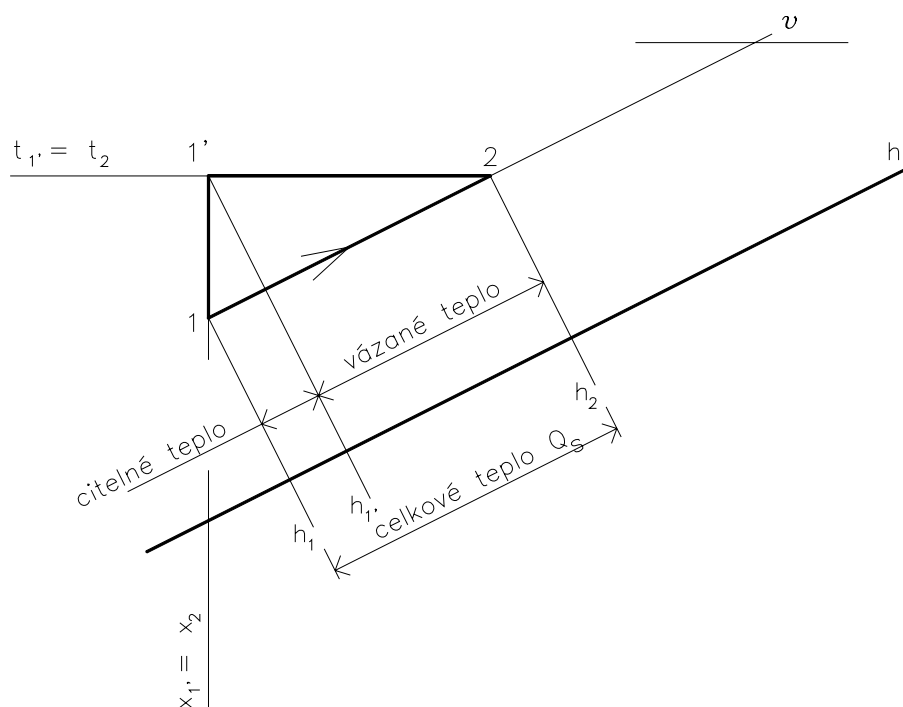
- teplo sdělené při jakémkoliv procesu se skládá ze dvou částí – tepla citelného a vázaného

$$Q_s = Q_c + Q_v \quad [\text{J, W}] \quad (2)$$

Q_s – celkové sdělené teplo při procesu

Q_c – citelné teplo, citelné teplo je funkcí změny teploty a lze jej vyjádřit známou rovnicí $Q = m \cdot c \cdot \Delta t$ v Molliérově diagramu má průběh kolmý na izoterm, po čáře konstantní měrné vlhkosti

Q_v – vázané teplo, vázané teplo je funkcí změny měrné vlhkosti a neplatí pro něj rovnice $Q = m \cdot c \cdot \Delta t$. Vázané teplo je zároveň spojeno s fázovými změnami vodní páry ve vzduchu (kondenzace, vypařování apod.). V Molliérově diagramu má průběh ve směru izoterm, rovnoběžně s měřítkem měrné vlhkosti.



Obr.3 Rozdělení sděleného tepla na složky

V obecném procesu mezi stavy 1 a 2 lze citelné teplo podle obr.3 nejlépe vyjádřit jako:

$$Q_c = m_a \cdot (h_{1'} - h_1) \quad [\text{W}] \quad (3)$$

a vázané teplo jako:

$$Q_v = m_a \cdot (h_2 - h_{1'}) \quad [\text{W}] \quad (4)$$

m_a – hmotnostní průtok vzduchu [kg/s]

h – měrná entalpie [J/kg]

V Molliérově diagramu existuje měřítko, které udává poměr zastoupení citelného tepla v celkovém teple – faktor citelného tepla ϑ :

$$\vartheta = \frac{Q_c}{Q_s} = \frac{c_p \cdot \Delta t}{\Delta h} \quad [-] \quad (5)$$

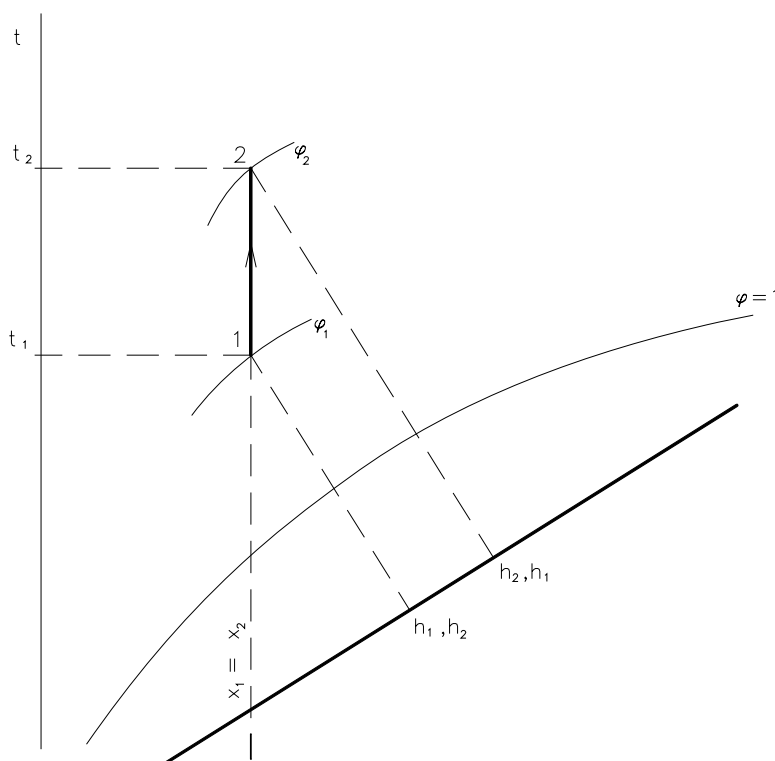
c_p – měrná tepelná kapacita vzduchu za konstantního tlaku = 1,2 [J/kg.K]

Ohřev vzduchu

- proces probíhající na teplosměnné ploše ohříváčů vzduchu
- cílem procesu je zvýšení teploty proudu vzduchu – to je možné pouze sdělením tepla do jeho proudu
- proces probíhá bez změny vlhkosti – v Molliérově diagramu jej značíme po konstantní měrné vlhkosti
- při průběhu ohřevu dochází pouze ke sdílení citelného tepla, vázané teplo $Q_v = 0$

Změna stavových veličin:

$$x_1 = x_2, t_2 > t_1, \varphi_2 < \varphi_1, h_2 > h_1$$



Obr.4 Proces ohřevu vzduchu

Rovnice:

Tepelný výkon potřebný pro ohřátí proudu vzduchu z teploty t_1 na teplotu t_2 .

$$Q = m_a \cdot (h_2 - h_1) = m_a \cdot c_a \cdot (t_2 - t_1) \quad [\text{W}] \quad (6)$$

Chlazení vzduchu

- cílem je snížení teploty proudu vzduchu
- proces probíhá na teplosměnné ploše chladiče
- rozděluje se na dva typy
 - chlazení bez kondenzace vodní páry – „suché chlazení“
 - chlazení s kondenzací vodní páry na chladiči – „mokré chlazení“
- rozdělení je podle vztahu teploty rosného bodu t_r proudu vzduchu a povrchové teploty chladiče t_{ch}
 - suché chlazení – povrchová teplota chladiče je **vyšší** než teplota rosného bodu $t_{ch} > t_r$
 - mokré chlazení – povrchová teplota chladiče je **nižší** než teplota rosného bodu $t_{ch} < t_r$
- v průběhu procesu chlazení dochází ke snížení obsahu vodní páry ve vzduchu v důsledku kondenzace
- v Molliérově diagramu se kreslí:
 - suché chlazení po konstantní měrné vlhkosti
 - mokré chlazení po spojnici mezi počátečním stavem 1 a průsečíkem povrchové teploty chladiče a křivky sytosti. Průsečík je mezní stav do kterého lze vzduch při dané kombinaci ochladit. Ovšem chladičový výkon je obvykle výrazně menší a tudíž cílová teplota leží někde na spojnici.

Pozn.:

Kondenzace par ve vzduchu probíhá od začátku ochlazování. Tím se vzduch odvlhčuje (suší) i když ještě nedosáhl pro dané x teploty rosného bodu. Změna probíhá po spojnici počátečního stavu vzduchu 1 s průsečíkem izoterm, která odpovídá střední teplotě povrchu chladiče t_{ch} s křivkou $\phi = 1$. Chlazení může probíhat obecně do libovolného bodu. Ke kondenzaci vody dochází i v tom případě, když teplota na kterou vzduch ochlazujeme (bod 3) je vyšší než t_r . Teoreticky nejnižší dosažitelný bod je průsečík na $\phi = 1$, kterému odpovídá největší vysušení vzduchu Δx_{max} .

Změna stavových veličin:

suché chlazení	mokrý chlazení
$x_1 = x_2, t_2 < t_1, \varphi_2 > \varphi_1, h_2 < h_1$	$x_1 > x_2, t_2 < t_1, \varphi_2 > \varphi_1, h_2 < h_1$

Rovnice:

Tepelný výkon potřebný pro ochlazení proudu vzduchu z teploty t_1 na teplotu t_2 .

$$Q = m_a(h_1 - h_2) \quad [\text{W}] \quad (7)$$

pouze pro suché chlazení lze použít rovnici (5):

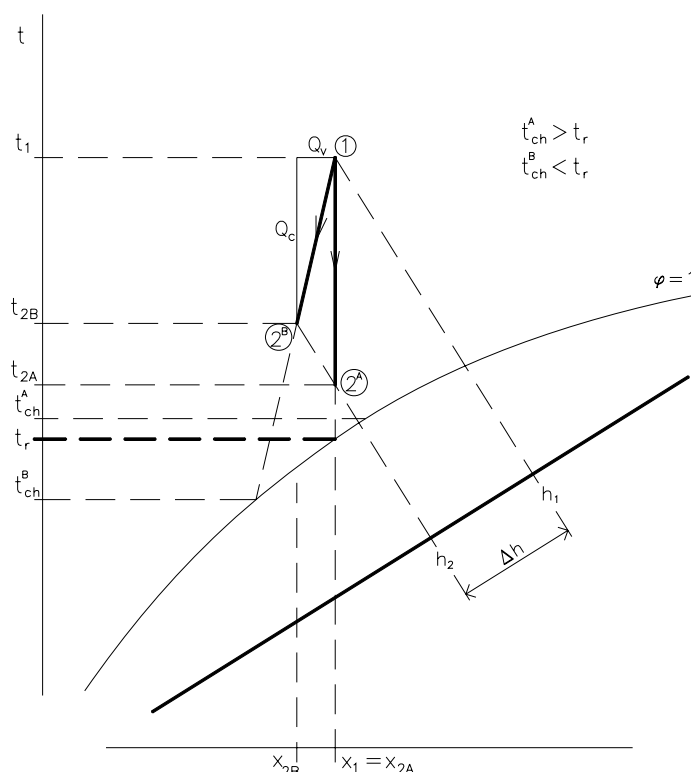
$$Q = m_a(h_1 - h_2) = m_a c_a(t_1 - t_2) \quad [\text{W}] \quad (8)$$

Při procesu mokrého chlazení je nutné vypočítat i množství zkondenzované vodní páry. Při běžném provozu vzduchotechnické jednotky dochází ke kondenzaci velmi často, nejčastěji v letním provozu při chlazení přiváděného vzduchu, dále v zimě na teplosměnných plochách výměníků pro zpětné získávání tepla.

Všechny části vzduchotechniky, kde lze i okrajově předpokládat kondenzaci vodní páry z přiváděného nebo odváděného vzduchu je nutné napojit na kanalizaci!

Množství zkondenzované vodní páry:

$$m_w = m_a(x_1 - x_2) \quad [\text{kg/s}] \quad (9)$$



Obr.5 Procesy chlazení vzduchu

Na obr.5 je patrný rozdíl mezi suchým a mokrým chlazením. Uvažujeme-li stejný výkon chladiče vyjádřený změnou měrné entalpie $\Delta h = h_1 - h_2$ je u mokrého chlazení jeho část spotřebována na změnu skupenství vodní páry a tudíž dosáhne koncový stav 2^B vyšší teploty než u suchého chlazení 2^A .

Mokrý chlazení by se tudíž dalo nazvat jako méně efektivní z hlediska snižování teploty. U suchého chlazení jsme ale omezeni vysokou teplotou povrchu chladiče a tudíž nemůžeme dosáhnout na jediném chladiči teplot nižších. Další omezení spočívá v blízkosti mezní teploty – teploty nasycení.

$$Q = m \cdot \Delta h; \Delta h = h_1 - h_2$$

$$A) \quad Q_s = Q_c + Q_v; \quad Q_v = 0 \quad (10)$$

$$B) \quad Q_s = Q_c + Q_v; \quad Q_v \neq 0 \Rightarrow Q_c^B < Q_c^A \rightarrow t_{2B} > t_{2A}$$

Mokrého chlazení lze použít i pro účely odvlhčování vzduchu, tedy cíleného snižování jeho měrné vlhkosti.

Vlhčení vzduchu

- cílem změny je zvyšování obsahu vodní páry ve vzduchu
- požadavek na vlhčení je v našich klimatických podmínkách zejména v zimním období – nízká měrná vlhkost venkovního vzduchu
- proces se odehrává ve zvlhčovačích vzduchu
- vlhčení vzduchu se charakterizuje výhradně změnou měrné vlhkosti, nikoliv relativní vlhkosti

Základní principy vlhčení probíhají dvěma způsoby:

- vlhčení vodou – přímé vlhčení rozprašováním vody do proudu vzduchu
- vlhčení parou – přímé vlhčení vstřikováním páry do proudu vzduchu

- v Molliérově diagramu se kreslí:

- vlhčení vodou po čáře konstantní entalpie – adiabatický proces
- vlhčení parou po čáře konstantní teploty – izotermický proces

Pro tepelnou a vlhkostní rovnováhu platí:

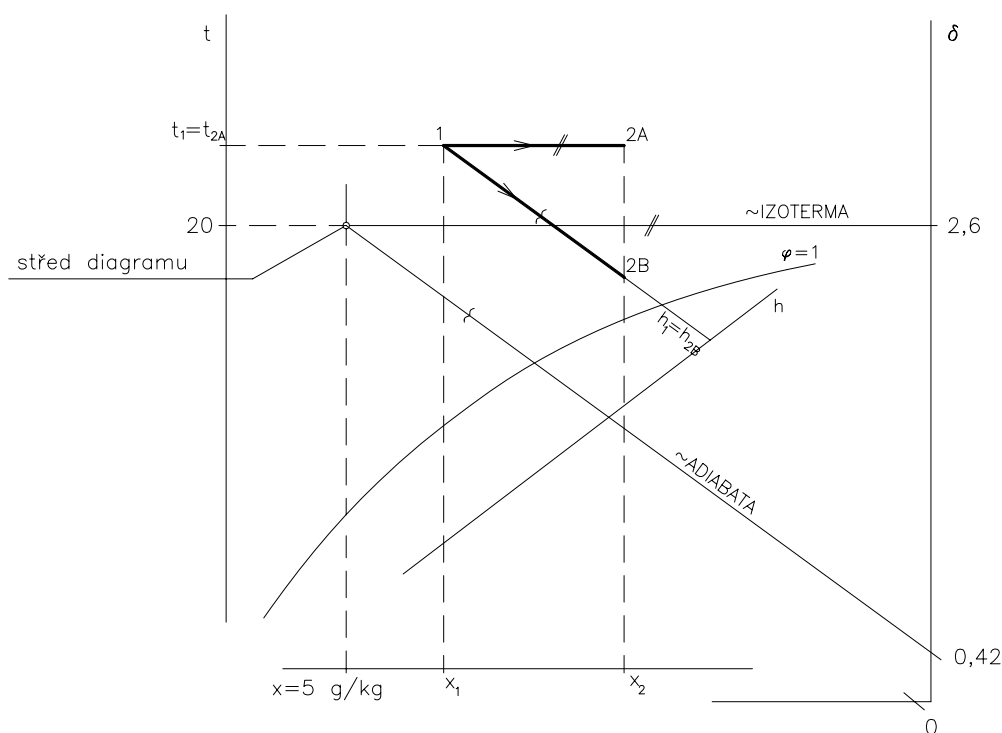
$$m_{sv} [h_2 - h_1] = Q_{w(p)} = h_{w(p)} \cdot m_{w(p)} \quad [\text{J}, (\text{W})] \quad (11)$$

$$m_{sv} (x_2 - x_1) = m_{w(p)} \quad [\text{kg}_{w(p)}] \quad (12)$$

Vydělením těchto rovnic dostaneme hodnotu směrového měřítka:

$$\delta = \frac{h_2 - h_1}{x_2 - x_1} = h_{w(p)} \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}_{w(p)}] \quad (13)$$

Indexy w a p platí alternativně pro vodu nebo páru. Změna je přímková a pro oba případy se liší pouze sklonem, který je dán entalpií přiváděné vody h_w nebo páry h_p .



Obr.6 Vlhčení vzduchu

u vlhčení parou: h_v se pohybuje kolem $2,6 \text{ kJ/kg}$ – směr přibližně odpovídá izotermě
 u vlhčení vodou: h_v se pohybuje v rozmezí 0 až $0,42 \text{ kJ/kg}$ – směr přibližně odpovídá adiabatě

Přibližnost směrů spojnic s izotermou a adiabatou je pro účely technické praxe více než dostačující.

Změna stavových veličin:

vlhčení vodou	vlhčení parou
$x_1 < x_2, t_2 < t_1, \varphi_2 > \varphi_1, h_2 = h_1$	$x_1 < x_2, t_2 = t_1, \varphi_2 > \varphi_1, h_2 > h_1$

Rovnice:

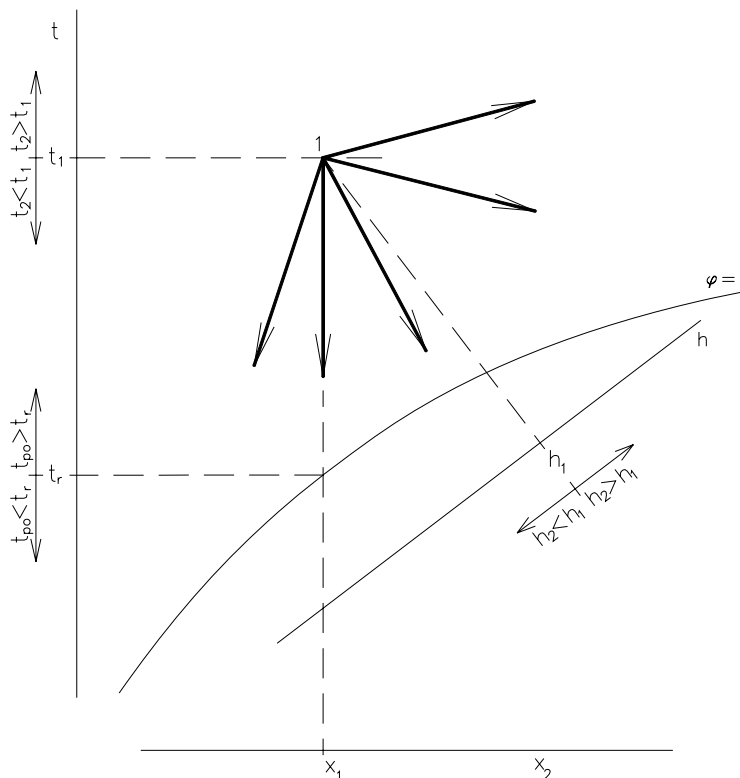
Množství vody, které musí vzduch absorbovat, aby se počáteční měrná vlhkost x_1 změnila na cílovou hodnotu x_2 . Jedná se o stejnou rovnici definující množství zkondenzované vodní páry.

$$m_w = m_a (x_2 - x_1) \quad [\text{kg/s}] \quad (14)$$

Vlhčení vodou se někdy používá i jako přímé adiabatické chlazení. Na konci procesu je teplota t_2 výrazně nižší než teplota t_1 . Ovšem, aby vše fungovalo je nutná nízká počáteční vlhkost vzduchu x_1 . Jinak nemá tento způsob chlazení význam – rychle dosáhneme meze sytosti – dále vzduch žádnou vlhkost nepojme a neochladí se.

Odpařování z volného vodního povrchu

- dochází při styku vzduchu s volným vodním povrchem, bez ohledu na jejich vzájemný poměr teplot
- používá se pro vodu skrápěné výměníky
- platí i pro proudění vzduchu kolem vodní hladiny
- směr změny v Molliérově diagramu probíhá po spojnici počátečního stavu a bodu na křivce sytosti pro průměrnou teplotu mokrého povrchu



Obr.7 Průběh odpařování z volného vodního povrchu

- podle poměru teploty rosného bodu t_r stavu 1 a teploty povrchu vodní hladiny t_{po} dochází k vylučování vody ze vzduchu, nebo naopak vlhčení
- $t_{po} > t_r$ – dochází k vlhčení vzduchu vodou odpařováním z vodní hladiny
- $t_{po} < t_r$ – dochází k vysoušení vzduchu a vylučování vody

Směšování dvou proudů vzduchu

- cílem je smísit dva proudy vzduchu o různých parametrech
- tím lze dosáhnout proudů o součtovém objemovém průtoku a středních vlhlostních a teplotních parametrech.
- proces se odehrává ve směšovacích komorách
- v Molliérově diagramu se zjišťuje stav vzduchu po smíšení, který leží na spojnici stavů proudů vzduchu 1 a 2 před směšováním. Poloha bodu na spojnici je dána poměrem objemových (hmotnostních) průtoků vzduchu.
- v zásadě spojnice nevyjadřuje žádnou faktickou změnu

Rovnice:

Pro stanovení vzájemné vazby mezi počátečními proudy vzduchu 1 a 2 a koncovým stavem po smíšení 3 vychází ze soustavy rovnic energetické a hmotnostní bilance.

Bilance energií:

$$m_{a1} \cdot h_1 + m_{a2} \cdot h_2 = m_{a3} \cdot h_3 \quad [\text{W}] \quad (15)$$

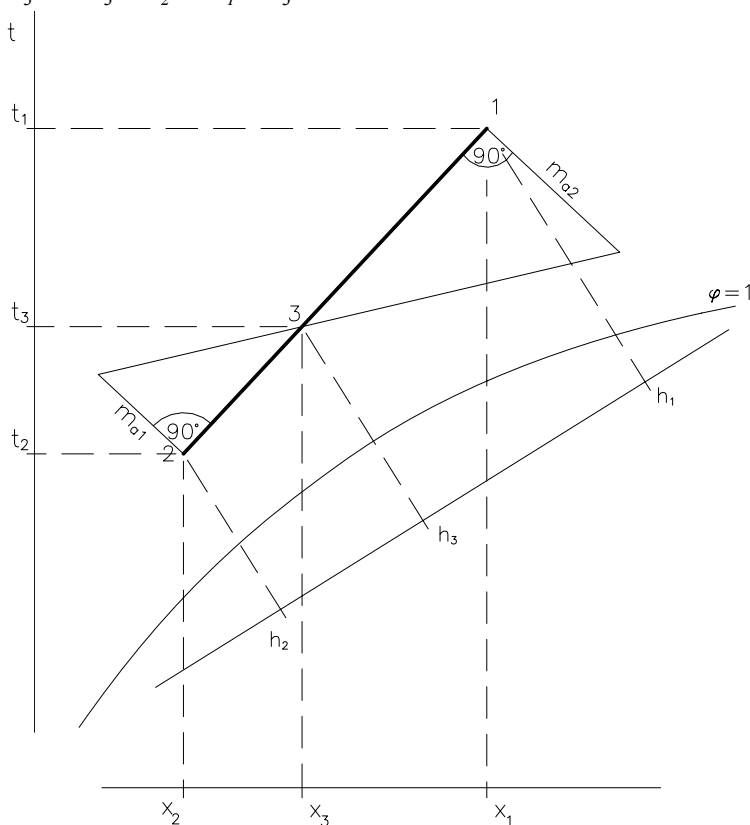
Bilance hmotností

$$m_{a1} + m_{a2} = m_{a3} \quad \text{pro suchý vzduch} \quad [\text{kg/s}] \quad (16)$$

$$m_{a1} \cdot x_1 + m_{va2} \cdot x_2 = m_{a3} \cdot x_3 \quad \text{pro vodní páru} \quad [\text{g}] \quad (17)$$

spojíme-li rovnice (15), (16) a (17) dohromady dostaneme:

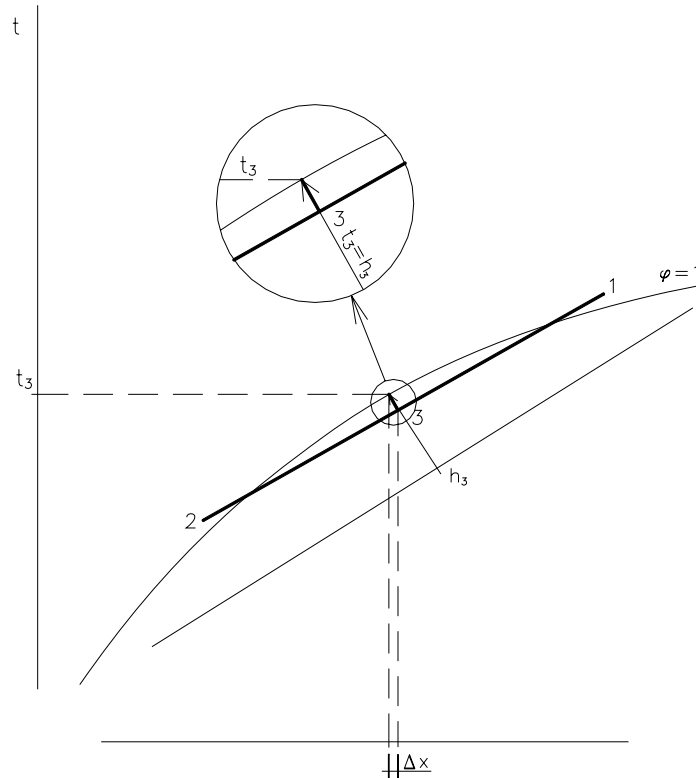
$$\frac{m_{a1}}{m_{a2}} = \frac{h_3 - h_2}{h_1 - h_3} = \frac{x_3 - x_2}{x_1 - x_3} \Rightarrow \frac{h_3 - h_2}{x_3 - x_2} = \frac{h_1 - h_3}{x_1 - x_3} = \delta_{13} = \delta_{23} \quad (18)$$



Obr.8 Směšování dvou proudů vzduchu

Na obrázku 8 je znázorněná grafická metoda, pomocí které lze vynést stav po smíšení bez nutnosti výpočtů. Metoda spočívá v podobnosti trojúhelníků. Na spojnici počátečních stavů proudů vzduchu si do koncových bodů vyneseme v poměru hmotnostní průtoky vzduchu. Do stavu 1 si vyneseme hmotnostní průtok vzduchu 2 a obráceně. Na průsečíku spojnice kolmic a počátečních bodů leží stav po smíšení 3. Jednoduchá kontrola: Výsledný stav 3 bude po spojnici blíže tomu stavu vzduchu, který má větší hmotnostní průtok.

V případě, že stav po smíšení vyjde pod křivkou sytosti – přesycený vzduch – vzduch se vrací na křivku sytosti po izotermě a rozdíl Δx je zkondenzovaná vodní pára.



Obr.9 Změna stavu vzduchu pokud se po smíšení dostane pod křivku sytosti