

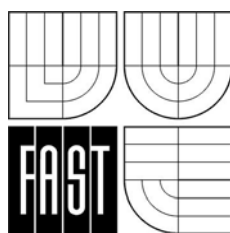
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

LENKA NEVŘIVOVÁ

TECHNICKÁ TERMODYNAMIKA

MODUL BJ11 M05

TERMODYNAMIKA VLHKÉHO VZDUCHU



STUDIJNÍ OPORY
PRO STUDIJNÍ PROGRAMY S KOMBINOVANOU FORMOU STUDIA



OBSAH

1 Úvod.....	5
1.1 Cíle.....	5
1.2 Požadované znalosti.....	5
1.3 Doba potřebná ke studiu.....	5
1.4 Klíčová slova.....	5
2 Definice vlhkého vzduchu.....	7
2.1 Suchý vzduch.....	7
2.2 Voda a vodní pára.....	8
2.3 Vlhký vzduch.....	8
2.3.1 Charakteristiky vlhkého vzduchu.....	9
2.3.1.1 Vlhkost vzduchu.....	10
2.3.1.2 Teplota rosného bodu.....	12
2.3.1.3 Teplota mokrého teploměru.....	12
2.3.1.4 Entalpie vlhkého vzduchu.....	13
2.4 Autotest.....	16
3 Molliérův i-x diagram vlhkého vzduchu.....	17
3.1 Vliv změny tlaku na i-x diagram vlhkého vzduchu.....	18
3.2 Změny stavu vlhkého vzduchu.....	19
3.2.1 Změny stavu při konstantní měrné vlhkosti.....	20
3.2.1.1 Ohřívání vzduchu.....	20
3.2.1.2 Ochlazování vzduchu.....	22
3.2.2 Změny stavu při konstantní entalpii.....	24
3.2.3 Změny stavu při adiabatickém směšování.....	26
3.2.4 Odpařování vody do vzduchu.....	30
3.3 Autotest.....	32
4 Závěr.....	33
4.1 Shrnutí.....	33
4.2 Studijní prameny.....	33
4.2.1 Seznam použité literatury.....	33
4.2.2 Odkazy na další studijní zdroje a prameny.....	34
4.3 Klíč.....	34

1 Úvod

1.1 Cíle

Cílem předkládaného učebního textu je především pochopení Molliérova i - x diagramu vlhkého vzduchu a s tím souvisejících přeměn stavu vlhkého vzduchu. Naučíme se s diagramem pracovat a využívat ho v oblasti výroby stavebních hmot. Jedná se především o využití daných znalostí při technologickém sušení. Sušení je jeden z nejdůležitějších technologických kroků při výrobě keramických surovin při výrobě stavební a žárovzdorné keramiky.



1.2 Požadované znalosti

Předložený text je úzce specializovaný studijní materiál, který předpokládá znalost termodynamiky uvedenou v učebním (Modul 01) a základní znalost fyziky a matematiky odpovídající rozsahu absolvovaného bakalářského studia. Pokud se v textu vyskytnou skutečnosti, výrazy či matematické vztahy, které studentovi nejsou zcela známé, doporučuji danou problematiku dohledat v doporučené literatuře.



1.3 Doba potřebná ke studiu

Text tohoto modulu je doprovázen celou řadou názorných grafů, uvedené symboly jsou vždy vysvětleny, sledované procesy jsou v grafech zakresleny a písemně popsány. Vzhledem k tomu pevně věřím, že text bude nejen čitelný, ale i čtivý a snadno pochopitelný a předpokládám, že pro studium postačí maximálně půl dne.



1.4 Klíčová slova

Vlhký vzduch, suchý vzduch, i - x Molliérov diagram, sušení, sušárny



2 Definice vlhkého vzduchu

Znalost problematiky vlhkého vzduchu je nezbytná nejen pro meteorologické účely, pro výpočty sušení a větrání, ale i pro navrhování klimatizačních zařízení a pro různé energetické výpočty.



Definice

Vlhký vzduch je směs suchého vzduchu a přehřáté či syté vodní páry. Suchý vzduch, který je složkou vlhkého vzduchu je směsí plynů.



2.1 Suchý vzduch

Suchý vzduch, který je složkou vlhkého vzduchu je směsí plynů, mezinárodní úmluvou bylo přijato složení suchého vzduchu dle tab. 2.1 jako standardní. Chemické složení suchého vzduchu se s výjimkou oxidu uhličitého CO_2 a ozonu O_3 v zemské atmosféře prakticky nemění až do výšky 100 km.

Tab. 2.1: Chemické složení suchého vzduchu

Složka suchého vzduchu	značka	objemová koncentrace [%]	molární hmotnost [kg.kmol^{-1}]
Dusík	N_2	78,09	28,01
Kyslík	O_2	20,29	31,99
Argon	Ar	0,93	39,94
Oxid uhličitý	CO_2	0,03	44,01
Neon	Ne	0,0018	20,18
Helium	He	0,00052	4,00
Krypton	Kr	0,0001	83,8
Xenon	Xe	$8 \cdot 10^{-6}$	131,3
Vodík	H_2	$5 \cdot 10^{-6}$	2,016
Ozon	O_3	$1 \cdot 10^{-6}$	47,99
VZDUCH			28,964

Základní termodynamické vlastnosti suchého vzduchu:

Střední molární hmotnost: $M_{sv}=28,964 \text{ kg.kmol}^{-1}$

Měrná plynová konstanta: $r_{sv}=287,062 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Izobarická měrná tepelná kapacita: $c_{p,sv}=1005,968 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Izochorická měrná tepelná kapacita: $c_{v,sv}=0,717 \text{ kJ.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Poissonova konstanta: $\kappa_{sv}=1,339$

Kritická teplota: $t_{kr,sv}= -140,7^\circ\text{C}$

Kritický tlak: $p_{kr,sv}=3,77 \text{ MPa}$

Kritická hustota: $\rho_{kr,sv}=349 \text{ kg.m}^{-3}$

Poznámka

Nejedná se o kritický stav, ale pouze o pseudokritický stav. Každý z plynů obsažených ve vzduchu, má jiné kritické parametry, uvedené kritické hodnoty jsou určeny podle Kaylova pravidla proporcionální molární úměrnosti.

2.2 Voda a vodní pára

Voda je z termodynamického hlediska látkou složitých vlastností. Je nejvíce používaným a nejlépe dostupným médiem pro přenos energie. Ze všech látek je jí věnováno nejvíce pozornosti. Pro práci s vodou a vodní párou byly v roce 1995 a 1997 schváleny Mezinárodní asociací pro vlastnosti vody a vodní páry dva významné dokumenty:

- 1995-Formulace termodynamických vlastností obyčejné vodní substance pro obecné a vědecké použití (IAPWS – 95)
- 1997-Nová mezinárodní formulace termodynamických vlastností vody a vodní páry pro průmyslové účely (IF – 97)

Základní termodynamické vlastnosti páry:

Střední molární hmotnost: $M_p=18,01534 \text{ kg.kmol}^{-1}$

Měrná plynová konstanta: $r_p=461,51805 \text{ J.kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Izobarická měrná tepelná kapacita: $c_{p,p}=1884 \text{ J.kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Poissonova konstanta: $\kappa_p=1,328$

Kritická teplota: $T_{kr,p}= 647,096 \text{ K}$

Kritický tlak: $p_{kr,p}=22,064 \text{ MPa}$

Kritická hustota: $\rho_{kr,p}=322 \text{ kg.m}^{-3}$

Při tlaku $p=101,325 \text{ kPa}$:

Teplota varu: $T_{vp}=373,16 \text{ K}$

Teplota tuhnutí: $T_{tp}=273,16 \text{ K}$

Výparné teplo $l_{l,g,p}=2256,65 \text{ kJ.kg}^{-1}$

2.3 Vlhký vzduch

Hlavní rozdíl proti směsi ideálních plynů, jejichž vlastnostmi jsme se již zabývali (viz Modul 01) je v tom, že se obě složky (suchý vzduch a přehřátá vodní pára) nemohou v celém oboru tlaků a teplot směřovat v libovolném poměru. Pokud je totiž teplota vzduchu při daném tlaku nižší než je odpovídající teplota t'' syté vodní páry, může se voda srážet ve formě mlhy. Pokud je nižší než teplota sublimační t''' , pak i ve formě sněhu či ledu. Je-li vodní pára obsažená ve vzduchu párou sytou, mluvíme o nasyceném vzduchu.

Zkušenosti potvrzují, že můžeme s dostatečnou přesností počítat s vlhkým vzduchem i jeho složkami, včetně vodní páry ve vlhkém vzduchu, jako s ideálními plyny. Používat stavové rovnice i pro vodní páru jako složku vlh-

kého vzduchu si můžeme dovolit vzhledem k tomu, že vodní pára ve vlhkém vzduchu je většinou ve stavu přehřátém a její parciální tlaky jsou velmi malé (řádově stovky Pascalů).

Pro vlhký vzduch předpokládáme platnost Daltonova zákona, podle něhož celkový tlak vlhkého vzduchu p se rovná součtu parciálních tlaků suchého vzduchu p_{sv} a vodní páry p_p , jako složek vlhkého vzduchu. Poměr měrných plynových konstant obou složek je důležitou konstantou v termodynamice vlhkého vzduchu.

$$\frac{r_{sv}}{r_p} = \frac{M_p}{M_{sv}} = \frac{0,2871}{0,4615} = 0,622 \quad [-] \quad (2.1)$$

Problematiku indexování provázejí spory a v různých literaturách se liší. V tomto textu se vychází z klasického označování, které je používáno na Ústavu technologie stavebních hmot a dílců. Nejaktuálnější je potom značení podle platných norem ČSN EN 12792, ČSN EN ISO 7730 a ČSN EN ISO 7726.

Značení: nenasyčený vzduch – bez horního indexu

nasyčený vzduch – se dvěma čarami

přesycený vzduch - při teplotě $t < 0^\circ\text{C}$ je označován se třemi čarami

sv – suchý vzduch

p – přehřátá vodní pára

bez dolního indexu – vlhký vzduch

2.3.1 Charakteristiky vlhkého vzduchu

Teplota vlhkého vzduchu je rovna teplotám jeho složek:

$$t = t_{sv} = t_p \quad [^\circ\text{C}] \quad (2.2)$$

Tlak vlhkého vzduchu je podle Daltonova zákona roven součtu parciálních tlaků suchého vzduchu a páry

$$p = p_{sv} + p_p \quad [\text{Pa}] \quad (2.3)$$

Objem vlhkého vzduchu je dle Oswaldova zákona:

$$V = V_{sv} = V_p \quad [\text{m}^3] \quad (2.4)$$

Hmotnost vlhkého vzduchu je aditivní veličina

$$m = m_{sv} + m_p \quad [\text{kg}] \quad (2.5)$$

Hustota vlhkého vzduchu je poměr hmotnosti k objemu vlhkého vzduchu, z rovnic (2.4) a (2.5) odvozujeme:

$$\rho(p, T) = \rho_{sv}(p_{sv}, T) + \rho(p_p, T) \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (2.6)$$

Tlak syté vodní páry p_p'' je pro vlhký vzduch významná veličina, která určuje mez homogenity vlhkého vzduchu

pro $p_p < p_p''$ je vlhký vzduch **nenasyčený**, směs je homogenní

pro $p_p = p_p''$ je vlhký vzduch **nasyčený**, směs je homogenní

pro $p_p > p_p''$ je vlhký vzduch **přesycený** a směs bude heterogenní, přesycený vzduch při teplotě $t < 0^\circ\text{C}$ je označován se třemi čarami

2.3.1.1 Vlhkost vzduchu

Množství vody obsažené ve vzduchu vyjadřujeme několika různě definovanými veličinami, z nichž některé lze přímo měřit a lze je i vzájemně přepočítávat. Některé z nich jsou vztaheny k objemu V [m^3] vlhkého vzduchu, jiné na hmotnost m [kg] suchého, nebo vlhkého vzduchu.

- Absolutní (objemová) vlhkost vzduchu ρ_p [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

$$\rho_p = \frac{m_p}{V} \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (2.7)$$

Je definována jako poměr hmotnosti páry m_p [kg] v objemu V [m^3] vlhkého vzduchu. Je to vlastně hustota vodní páry při jejím parciálním tlaku p_p . Závisí na teplotě a může nabýt své maximální hodnoty v nasyčeném vzduchu tedy při $p_p = p_p''$.

$$\rho_{p\max} = \rho_p'' \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (2.8)$$

Absolutní vlhkost vzduchu ρ_p se měří absorpcí vodních par v daném objemu a vážením. Vzduch daného objemu V necháme projít hygroskopickou látkou (látka, která je schopná pohltit, zadržet vlhkost např. CaCl_2 nebo H_2SO_4) o hmotnosti m_1 , tato látka pohltí vlhkost obsaženou v daném množství vzduchu a tím se její hmotnost zvětší na m_2 . Absolutní vlhkost vzduchu se pak vypočítá podle vztahu:

$$\rho_p = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (2.9)$$

Z hlediska účinku vlhkého vzduchu na okolí nás mnohem častěji zajímá, jak blízko je vzduch svému nasycení. To nám absolutní vlhkost neřekne, protože určitá absolutní vlhkost se může při jedné teplotě vztahovat ke vzduchu nenasycenému a při jiné teplotě se už bude jednat o vzduch nasyčený. Proto byl zaveden pojem relativní vlhkosti.

- Relativní vlhkost vzduchu φ [-]

Je primárně definovaná jako poměr absolutní vlhkosti ρ_p k její maximální hodnotě ρ_p'' při téže teplotě. Úpravami pomocí rovnice stavu ideálního plynu pak vyplynou další vyjádření.

$$\varphi = \left(\frac{\rho_p}{\rho_p''} \right)_t = \left(\frac{m_p}{m_{p\max}} \right)_t = \left(\frac{p_p}{p_p''} \right)_t \quad [-] \quad (2.10)$$

Relativní vlhkost nabývá hodnot φ od 0 do 1, nebo je-li vyjádřená v procentech, jak tomu často bývá od 0 do 100%. Pohoda prostředí pro člověka vyžaduje hodnot od $\varphi = 40 - 50\%$. Nejznámějšími přístroji k měření relativní vlhkosti vzduchu jsou vlasové vlhkoměry (vlasové hygrometry). Klasická konstrukce vlhkoměru je založena na hygroskopických vlastnostech lidských vlasů. Ty mění svou délku v závislosti na vlhkosti. Základem přístroje je několik odmaštěných vlasů, které jsou v přístroji napnuty tak, aby k nim měl přístup vzduch, jehož vlhkost měříme. Změna délky vlasů je přes pákový převod zobrazována ručičkou přístroje.



Obr. 2.1: Vlasový hygrometr (Zdroj: www.anemo.cz, www.novi.cz)

- Měrná vlhkost vzduchu (vodní obsah) x [$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$]

Tento další pojem byl zaveden proto, že při tepelných výpočtech vlhkého vzduchu (např. počítání s entalpií) je výhodnější vztahovat výpočty na 1 kg suchého vzduchu.

Měrná vlhkost x udává kolik vody (vodní páry) je obsaženo v $1+x$ kilogramech vlhkého vzduchu. Neboli kolik kilogramů vody (vodní páry) připadá na 1 kg suchého vzduchu.

Měrná vlhkost vlhkého vzduchu je definována jako poměr hmotností m_p [kg] vodní páry a jednotkové hmotnosti m_{sv} [kg] suchého vzduchu přičemž platí, že celková hmotnost vlhkého vzduchu $m = m_p + m_{sv}$. Také platí, že hmotnost vlhkého vzduchu, který obsahuje 1 kg suchého vzduchu je $(1+x)$ kg.

$$x = \frac{m_p}{m_{sv}} = \frac{r_{sv}}{r_p} \cdot \frac{p_p}{p_{sv}} = 0,622 \cdot \frac{p_p}{p_{sv}} = 0,622 \cdot \frac{\varphi p_p''}{p - \varphi p_p''} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (2.11)$$

Vztah 2.11 je vhodný k určení měrné vlhkosti x tehdy, je-li známa relativní vlhkost φ (zjištěná např. vlhkoměrem), celkový tlak p , zjišťovaný tlakoměrem (nejčastěji barometrem) a parciální tlak nasycených par p_p'' , který najdeme v tabulce sytých par pro danou teplotu vlhkého vzduchu. Vodní obsah nabývá maximální hodnoty při $\varphi = 1$:

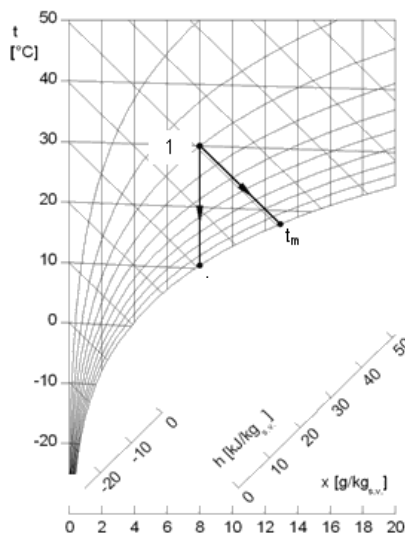
$$x_{\max} = x'' = 0,622 \cdot \frac{p_p''}{p - p_p''} \quad [-] \quad (2.12)$$

2.3.1.2 Teplota rosného bodu

Rosný bod je teplota t_r [°C], při které je vzduch maximálně nasycen vodními parami (relativní vlhkost vzduchu dosáhne 100%). Pokud teplota klesne pod tento bod, nastává kondenzace. Vzduch za určité teploty může obsahovat jen určité množství vodních par. Čím je teplota vzduchu vyšší, tím více vlhkosti pojme. Pokud se vzduch začne ochlazovat, vodní páry začnou kondenzovat. Podmínkou je ale přítomnost kondenzačních jader. Teplota rosného bodu je tedy teplota, na níž je nutno vlhký vzduch izobaricky ochladit, aby se stal nasyceným.

Teplota rosného bodu je hojně používanou a přímo měřitelnou charakteristikou vlhkého vzduchu. Rosný bod lze považovat za jiné vyjádření absolutní vlhkosti vzduchu.

V i - x diagramu se teplota rosného bodu pro daný stav vzduchu odečte na průsečíku křivky nasycení a čáry měrné vlhkosti, odpovídající danému stavu vzduchu. Měrná vlhkost x se nemění, relativní vlhkost φ roste až na $\varphi=1$. Grafické znázornění v i - x diagramu je na obrázku 2.2.



Obr. 2.2: Mollierův i - x diagram se zakreslením rosného bodu t_r a teploty mokrého teploměru t_m pro daný stav vzduchu 1

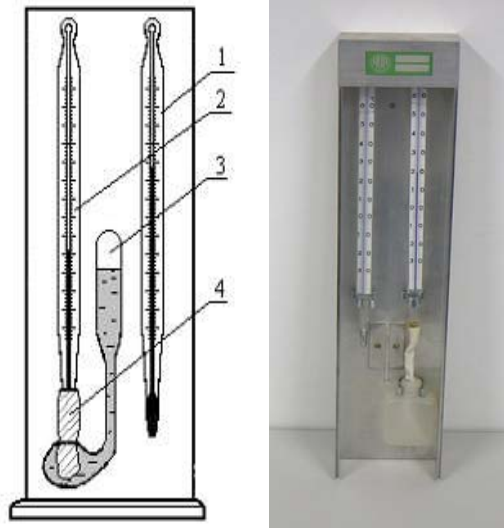
Teplota rosného bodu se měří rosným vlhkoměrem. V původním jednoduchém provedení je to nádobka z dobrého tepelného vodiče s lesklým povrchem naplněná lehce odpařitelnou látkou (éterem), do níž je vložen teploměr. Jakmile vlivem intenzivního odpařování klesne teplota nádobky na teplotu nasycení okolního vzduchu, začne se lesklý povrch nádobky orosovat. V tom okamžiku se na teploměru přečte teplota t_r .

2.3.1.3 Teplota mokrého teploměru

Je to teplota t_m [°C], již ukazuje teploměr obalený mokrou „punčoškou“ při vynuceném obtékání vlhkým vzduchem a při odstínění proti tepelnému záření. Na měření této teploty je založen přístroj k měření vlhkosti vzduchu - psychrometr.

Psychrometr je přístroj na měření relativní vlhkosti φ plynů (obvykle vzduchu), založený na zjišťování rozdílu teplot suchého a vlhkého teploměru. Pokles tep-

loty z t_1 na t_2 , k němuž na vlhkém teploměru dochází při vypařování vody, je závislý na obsahu vodní páry ve vzduchu. Čím je měřený vzduch sušší, tím intenzivnější je vypařování vody a tím větší je i pokles teploty. Podle teploty suchého teploměru a podle rozdílu obou teplot můžeme pomocí tabulek odečíst relativní vlhkost vzduchu φ .



Obr. 2.3: Psychrometr, (Zdroj: www.label.com.pl)

Nejznámějším přístrojem je Assmannův psychrometr. Skládá se ze dvou teploměrů, 1 a 2, uložených ve společném pouzdru tak, aby kolem nich mohl být prosáván vzduch, např. pomocí turbínky. Vlhký teploměr 2 je obalen tkaninou 4, která se občas ovlhčuje nebo přímo zasahuje do nádobky s vodou 3 (Obr.2.3).

2.3.1.4 Entalpie vlhkého vzduchu

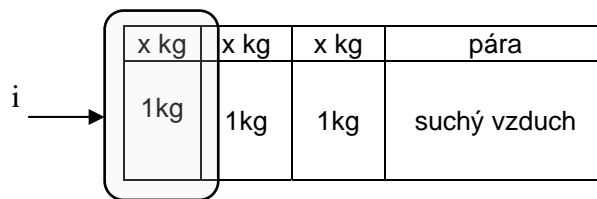
Entalpie, latentní teplo, je fyzikální veličina označovaná písmenem I , měřená v Joulech [J], která vyjadřuje tepelnou energii uloženou v jednotkovém množství látky, vlhkého vzduchu.

Entalpie je definována vztahem $I = U + pV$, kde U je vnitřní energie soustavy, p je její tlak a V objem.

Entalpie je extenzivní stavová veličina – závisí na velikosti systému. Její absolutní hodnotu nelze změřit, stanovuje se jen změna entalpie ΔI vztažená na dohodnutý (standardní) stav 0°C , kdy je entalpie rovná nule.

Výpočty stavů vlhkého vzduchu se s výhodou provádějí pro 1 kg suchého vzduchu, který obsahuje x kg vodní páry. Hmotnost suchého vzduchu je tedy při úpravách vlhkého vzduchu konstantní, mění se pouze hmotnost vodní páry (proto se měrná vlhkost vztahuje na 1 kg suchého vzduchu x [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$]).

Představme si, že by veškerý suchý vzduch, obsažený v námi zkoumaném množství vlhkého vzduchu, byl soustředěn v dolní části objemu a veškerá pára v horní části objemu. Objem rozdělíme do stejně velkých oblastí tak, aby v každé z nich byl právě jeden kilogram suchého vzduchu. V každé takové oblasti bude právě x kilogramů páry (Obr.2.4).



Obr. 2.4: Schéma entalpie vlhkého vzduchu

Entalpii i směsi 1 kg suchého vzduchu a x kg vodní páry vypočítáme podle vztahu:

$$i = i_{sv} + x \cdot i_p \quad [\text{J.kg}^{-1}] \quad (2.13)$$

Entalpie vlhkého vzduchu je fyzikální veličina, která vyjadřuje tepelnou energii uloženou v jednotkovém množství suchého vzduchu a příslušném množství vodní páry.

Entalpie suchého vzduchu je násobkem měrné tepelné kapacity (při konstantní teplotě) a teploty ($c_{sv} = 1\,010 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$; platí od -30 do $100 \text{ }^\circ\text{C}$). Při nulové teplotě je i entalpie suchého vzduchu také nulová:

$$i_{sv} = c_{psv} \cdot t \quad [\text{J.kg}^{-1}] \quad (2.14)$$

Entalpie vodní páry je funkcí teploty a tlaku. Měrná tepelná kapacita vodní páry $c_p = 1\,840 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Pro běžné výpočty lze do teploty $100 \text{ }^\circ\text{C}$ a tlaku par 10 kPa použít empirický vztah:

$$i_p = l_{l,g} + c_p \cdot t = 2500 \cdot 10^3 + c_p \cdot t \quad [\text{J.kg}^{-1}] \quad (2.15)$$

kde l [J.kg^{-1}] je výparné teplo vody.

Po rozepsání dostáváme pro entalpii vztah:

$$i = i_{sv} + x \cdot i_p = c_{sv} \cdot t + x(2500 \cdot 10^3 + c_p \cdot t) \quad [\text{J.kg}^{-1}] \quad (2.16)$$

Pokud vzduch obsahuje vodní mlhu (vodní kapky), přičte se k entalpii vlhkého vzduchu (nasyceného) entalpie mlhy (vodních kapek):

$$i = i + (x - x'')i_w = i'' + (x - x'')c_w \cdot t \quad [\text{J.kg}^{-1}] \quad (2.17)$$

A při podnulových teplotách, kdy se ve vzduchu vyskytuje jinovatka či zmrzlá mlha, bude entalpie:

$$i = i'' + (x - x'')(l_{s,l} + c_E \cdot t) \quad [\text{J.kg}^{-1}] \quad (2.18)$$

Kde

c_w [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$] - měrná tepelná kapacita vody $c_w = 4\,187 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

c_E [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$] - měrná tepelná kapacita ledu $c_E = 2\,090 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

$l_{s,l}$ [J.kg^{-1}] - skupenské teplo tání ledu $l_E = -333,103 \text{ J.kg}^{-1}$

Příklad 2.1

V místnosti je vzduch o teplotě $t_1=10^\circ\text{C}$. Vlhkoměr ukazuje 86,3 % vlhkosti. Vypočítejte hmotnost vodní páry obsažené ve vzduchu.

Příklad 2.2

Určete měrnou vlhkost vzduchu při atmosférickém tlaku $p = 0,1 \text{ MPa}$, teplotě 20°C a relativní vlhkosti $\varphi = 50\%$.

Příklad 2.3

Měrná vlhkost vzduchu je $x=0,01 \text{ kg.kg}^{-1}$. Určete rosný bod při atmosférickém tlaku $p = 0,1 \text{ MPa}$.

Příklad 2.4

Prostor o objemu 50 m^3 je vyplněn vlhkým vzduchem o tlaku $0,1 \text{ MPa}$ a teplotě 60°C . Rosný bod t_r je 35°C . Jaká je relativní vlhkost a jaké je množství vody obsažené v daném prostoru?

Příklad 2.5

Vypočítejte entalpii vlhkého vzduchu za atmosférického tlaku $0,1 \text{ MPa}$, jehož teplota je $t=30^\circ\text{C}$ a relativní vlhkost $\varphi = 70\%$

Příklad 2.6

Z Molliérova diagramu určete relativní a absolutní vlhkost vzduchu při teplotě mokrého teploměru 25°C a suchého 50°C .

Řešení

Příklad 2.1: $\rho_v=8,11 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^{-3}$; Příklad 2.2: $x=7,33 \cdot 10^{-3} \text{ kg.kg}^{-1}$; Příklad 2.3: $t_r=13,8^\circ\text{C}$, Příklad 2.4: $\varphi=0,288$, $m=1,876 \text{ kg}$; Příklad 2.5: $i=78,91 \text{ kJ.kg}^{-1}$, Příklad 2.4: $x=0,1$, $\varphi = 13\%$

2.4 Autotest

1. Čím se odlišuje vlhký vzduch od směsi ideálních plynů?
2. Jaké znáte stavy vlhkého vzduchu?
3. Uved'te základní charakteristiky vlhkého vzduchu.
4. Jaký je rozdíl mezi relativní a měrnou vlhkostí vzduchu?
5. Charakterizujte rosný bod.
6. Co je to entalpie vlhkého vzduchu, označení, jednotka.

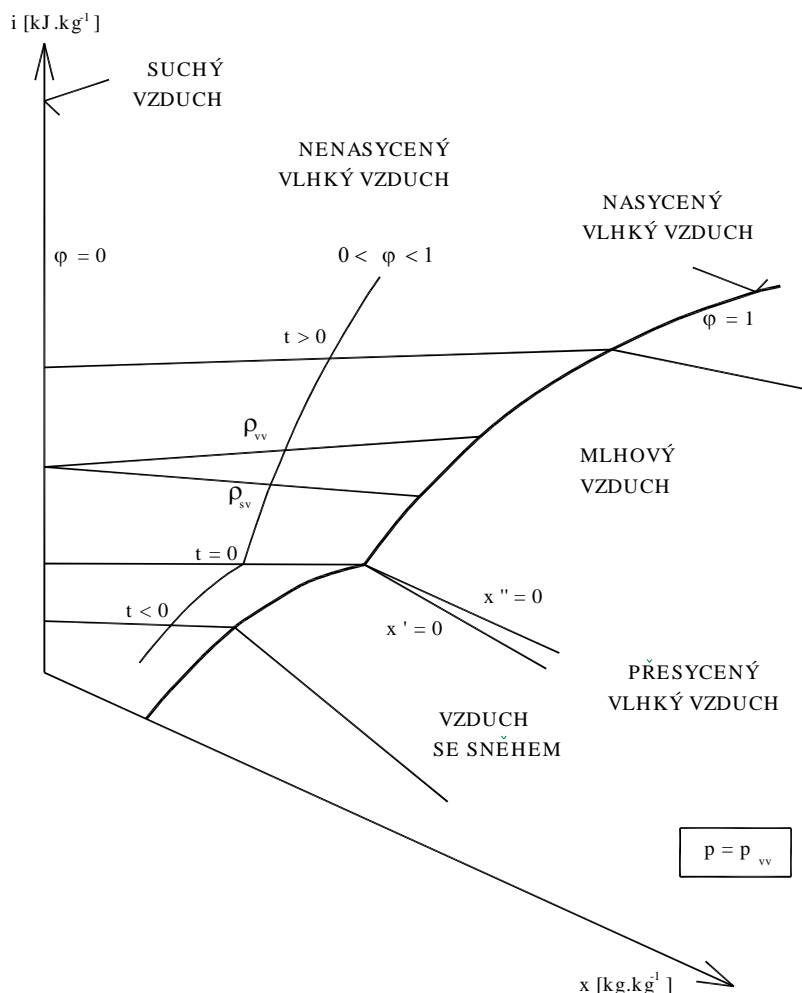
3 Molliérův i-x diagram vlhkého vzduchu

Stav plynu nebo páry se všeobecně určuje stavovými veličinami p , v , T . Na dokonalé určení však stačí znát jen dvě z těchto veličin a třetí můžeme buď vypočítat ze stavové rovnice, nebo určit z tepelného diagramu.



Stav vlhkého vzduchu se určuje teplotou t , tlakem p a relativní vlhkostí φ nebo měrnou vlhkostí x . U vlhkého vzduchu můžeme třetí veličinu určit jako funkci dvou známých veličin jak je to možné také u plynů, případně v parách.

Analytické vyjádření změn stavu vlhkého vzduchu je pracné a ne dost názorné pro sledování průběhu těchto změn. V technické praxi se proto používá vhodnější, grafické znázornění. V literatuře se uvádí několik typů diagramů vlhkého vzduchu a to podle toho, které ze základních parametrů vlhkého vzduchu nanášíme na souřadné osy. Relativní vlhkost φ se jako parametr udává vždy. Nejčastěji používaným diagramem je Molliérův i-x diagram vlhkého vzduchu.



Obr. 3.1: Molliérův i-x diagram vlhkého vzduchu

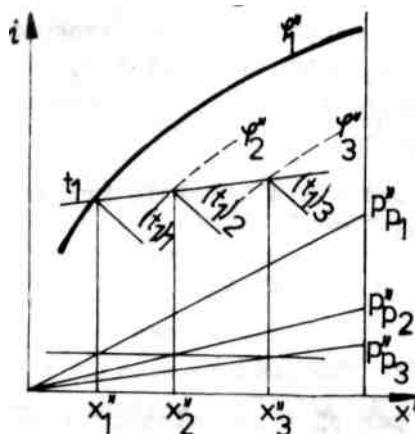
Změny stavu vlhkého vzduchu v technických zařízeních probíhají nejčastěji při stálém tlaku. Přidávané nebo odvedené teplo u těchto změn určujeme jen z rozdílu entalpií. Entalpie vlhkého vzduchu i se volí jako jedna ze souřadnic Molliérova diagramu, druhou souřadnicí je měrná vlhlost x . Z diagramu i - x přímo odečítáme teploty, relativní vlhkost a tlak syté páry.

Stanovíme-li entalpii vlhkého vzduchu pro hmotnost $(1+x)$ kg, platí i - x diagram pro množství 1 kg suchého vzduchu. Nesmíme zapomenout, že měrná vlhlost x závisí na celkovém tlaku, takže každý diagram je kreslen vždy jen pro určitý celkový tlak. Průběh ostatních veličin v i - x souřadném systému vypočteme. Jde zejména o izotermy a křivky konstantních relativních vlhkostí. Z křivek relativních vlhkostí je nejdůležitější křivka o $\varphi=1$, která tvoří v diagramu rozhraní mezi nenasyčeným a přesyceným vzduchem.

V případě, že souřadnice i , x tvoří pravoúhlý souřadnicový systém, je křivka $\varphi=1$ velmi strmá, diagram je protažený a velmi zúžený. V takovém diagramu se hodnoty odečítají velmi nepohodlně. Tento nedostatek lze odstranit použitím kosoúhlého souřadnicového systému, ve kterém základní osy mezi sebou svírají úhel 135° . Tento nedostatek lze odstranit také tím, že nulová izoterma $t=0^\circ\text{C}$ je kolmá na osu i . Měrnou vlhlost x vynášíme ve zvoleném měřítku na skloněnou osu x . V diagramu se však hodnota x promítá na kolmici k ose i , na kterou se někdy nanáší přímo měrná vlhlost x ve zvoleném měřítku.

3.1 Vliv změny tlaku na i - x diagram vlhkého vzduchu

Jak již bylo řečeno diagram i - x vlhkého vzduchu je konstruovaný vždy pro určitý celkový tlak vlhkého vzduchu. Dále bude uvedeno jak se bude měnit průběh různých veličin se změnou tlaku směsi.



Obr. 3.2: Vliv tlaku na i - x diagram vlhkého vzduchu

Na změně celkového tlaku nezávisí základní síť diagramu $i=\text{konst.}$, $x=\text{konst.}$, a také na změně tlaku nezávisí poloha izoterem v oblasti nenasyčeného vzduchu (Obr.3.2), což vyplývá z rovnice entalpie, podle které teplota nezávisí na tlaku směsi.

Celkový tlak směsi má však vliv na polohu izoterm pod čarou sytosti $\varphi=1$, tedy v oblasti přesyceného, zamlženého, vzduchu. S rostoucím tlakem směsi se izotermy přesouvají vlevo od své původní hodnoty. Příčinou tohoto posunu je právě změna polohy meze sytosti. Zajímavá je závislost relativní vlhkosti na celkovém tlaku směsi. Zjistí se takto:

$$i = 0,622 \cdot \frac{\varphi_1 \cdot p_p''}{p_1 - \varphi_1 \cdot p_p''} = 0,622 \cdot \frac{\varphi_2 \cdot p_p''}{p_2 - \varphi_2 \cdot p_p''} \quad [\text{J.kg}^{-1}] \quad (3.1)$$

$$\frac{\varphi_1 \cdot p_p''}{p_1 - \varphi_1 \cdot p_p''} = \frac{\varphi_2 \cdot p_p''}{p_2 - \varphi_2 \cdot p_p''} \quad (3.2)$$

$$\varphi_1 \cdot p_2 = \varphi_2 \cdot p_1 \rightarrow \frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{p_1}{p_2}$$

Jak vyplývá z (3.2), při konstantní teplotě a konstantní měrné vlhkosti se relativní vlhkost mění ve stejném poměru jako celkový tlak vlhkého vzduchu. Se stoupajícím tlakem se relativní vlhkost zvětšuje a s klesajícím tlakem se zmenšuje. Při přechodu na jiný celkový tlak se mění průběh křivek relativní vlhkosti jen co se týče číselných hodnot, které jednotlivým křivkám přísluší podle uvedeného vztahu. Svoji polohu mění křivka sytosti. Blíží se k ose x tím víc, čím je nižší celkový tlak.

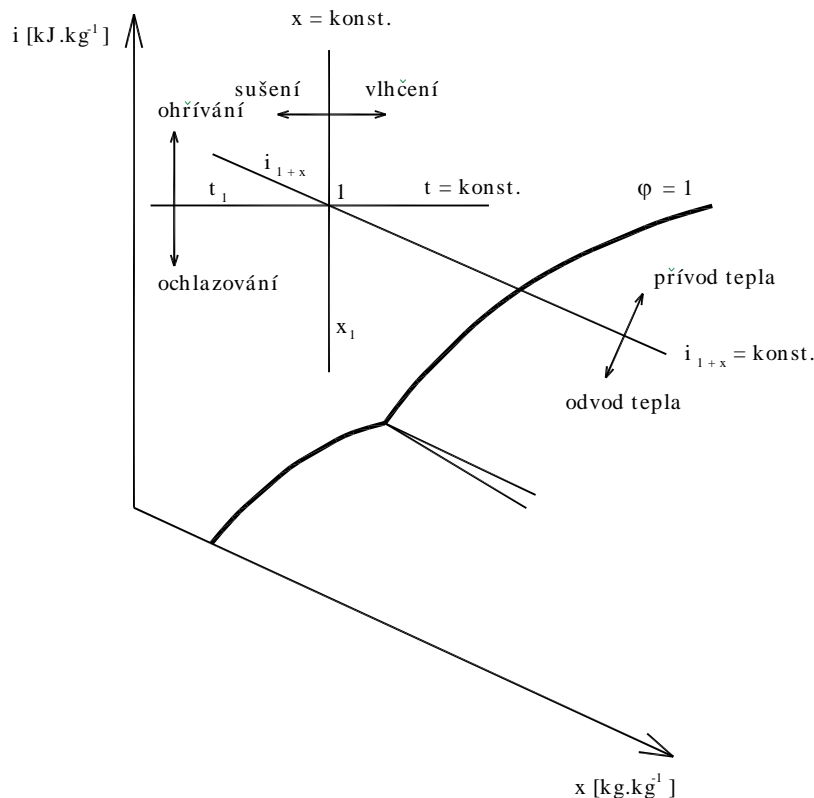
Číselné hodnoty veličin i, x, t v diagramu kresleném pro určitý tlak se v nenasyčené oblasti, při přechodu na jiný tlak, nemění. Podle uvedeného vztahu (3.2) se mění pouze relativní vlhkost. Dosadíme-li $\varphi=1$, získáme novou křivku sytosti. Potom můžeme jeden diagram použít pro více tlaků.

$$\frac{\varphi_1}{p_1} = \frac{\varphi_2}{p_2} \quad (3.3)$$

Vztah (3.3) udává, že poměr relativní vlhkosti a celkového tlaku směsi je při konstantní teplotě a při konstantní měrné vlhkosti stálý a je daný původním poměrem pro který byl diagram sestaven.

3.2 Změny stavu vlhkého vzduchu

Budou popsány pouze změny izobarické, tedy změny při kterých se celkový tlak vlhkého vzduchu nemění. Když se mísí vzduch s různými vlhkostmi, mají obě složky stejný tlak. Do této skupiny změn patří ohřívání a chlazení, vysoušení a vlhčení vzduchu, odvod tepla z vlhkého vzduchu, přívod tepla vlhkému vzduchu, kondenzace par, odpařování vody do vzduchu a mísení vzduchu různé vlhkosti. (Obr.3.3)



Obr. 3.3: Změny stavu vlhkého vzduchu

Pro změnu při konstantním tlaku platí z 1. zákona termodynamiky, že množství tepla přivedeného do vlhkého vzduchu je rovno rozdílu celkových entalpií.

$$Q_{12} = (i_2 - i_1) \cdot m_{sv} \quad [\text{J}] \quad (3.4)$$

Poznámka



Entalpie i není entalpií 1kg látky (v tomto případě vlhkého vzduchu), ale entalpií takového množství vlhkého vzduchu, které obsahuje právě 1kg suchého vzduchu a x kg páry. Celkovou entalpii I proto získáme vynásobením entalpie i počtem kilogramů suchého vzduchu obsažených ve vlhkém vzduchu.

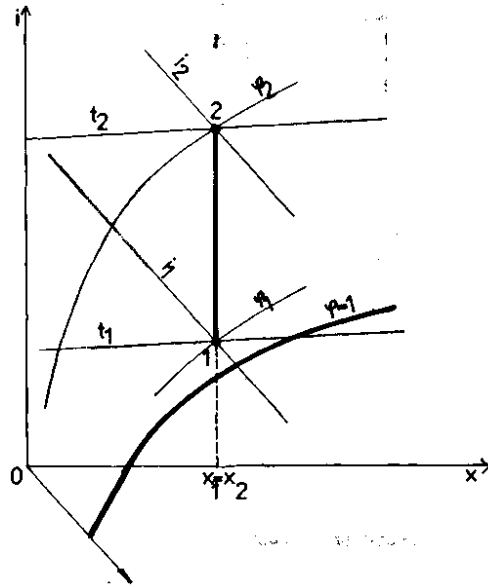
3.2.1 Změny stavu při konstantní měrné vlhkosti

Jsou to změny, u kterých se celková hmotnost vzduchu nemění. Probíhají při ohřívání nebo ochlazování vzduchu nad křivkou sytosti v nenasycené oblasti. Vlhký vzduch je přitom oddělen od vytápěcího nebo chladícího media pevnou stěnou, takže se s ním nemísí. Z diagramu i - x musí tyto změny probíhat po čarách $x = konst.$

3.2.1.1 Ohřívání vzduchu

Přivádíme-li teplo vzduchu, jeho teplota stoupá a relativní vlhkost se snižuje. Počáteční stav 1 je obvykle dán teplotou t_1 a relativní vlhkostí ϕ_1 , takže v diagramu i - x leží v jejich průsečíku (Obr.3.4). Tím je daná měrná vlhkost x_1 , která

se po dobu celého pochodu nemění, takže $x_1=x_2$. Konečný stav 2 dostaneme jako průsečík přímky $x_1=konst.$ s izotermou t_2 , případně s φ_2 .



Obr. 3.4: Ohřev vlhkého vzduchu

Analyticky se pro počáteční parametry t_1 , φ_1 a konečnou teplotu t_2 zjistí výsledná relativní vlhkost z rovnosti:

$$x_1 = x_2 = 0,622 \cdot \frac{\varphi_1 \cdot p''_{p1}}{p - \varphi_1 \cdot p''_{p1}} = 0,622 \cdot \frac{\varphi_2 \cdot p''_{p2}}{p - \varphi_2 \cdot p''_{p2}} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (3.4)$$

Do této rovnosti z parních tabulek pro příslušné teploty t_1 a t_2 vyhledáme hodnoty p''_{p1} a p''_{p2} . Jestliže je místo teploty zadána relativní vlhkost φ_2 stanovíme p''_{p2} ze vztahu:

$$p''_{p2} = p''_{p1} \cdot \frac{\varphi_1}{\varphi_2} \quad [\text{MPa}] \quad (3.5)$$

K tomuto tlaku vyhledáme v parních tabulkách teplotu t_2 (pro sytou páru). Je-li parametrem počátečního stavu x_1 a t_1 vypočteme φ_1 a řešíme jak je výše uvedeno. Podobně řešíme je-li místo t_1 , udaná φ_1 , tj. stanovíme p''_{p1}

a z parních tabulek odečteme příslušnou teplotu t_1 a řešíme stejně jako v předchozím případě.

Množství tepla, které musíme přivést hmotnosti $(1 + x)$ kg vlhkého vzduchu, který obsahuje 1 kg suchého vzduchu, pro zvýšení teploty z t_1 na t_2 je dané rozdílem entalpií:

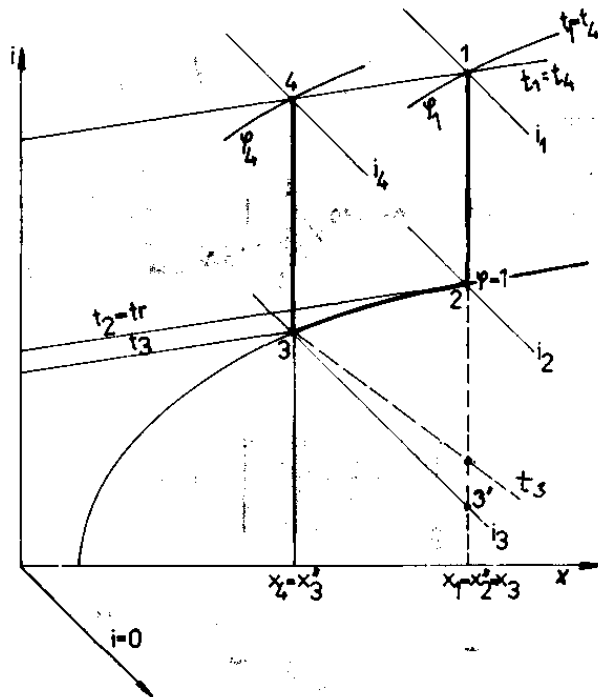
$$q = i_2 - i_1 = (c_{psv} + x \cdot c_{pp}) \cdot (t_2 - t_1) \quad [\text{J}] \quad (3.6)$$

V diagramu i-x je určeno úsečkou 12, jejímž změřením v příslušném měřítku dostaneme číselnou hodnotu. Ohříváme-li množství vlhkého vzduchu, ve kterém je m kg suchého vzduchu, je celkové spotřebované teplo:

$$Q = m \cdot q = m \cdot (i_2 - i_1) \quad [\text{J}] \quad (3.7)$$

3.2.1.2 Ochlazování vzduchu

Při ochlazování vzduchu teplota klesá a relativní vlhkost vzduchu se zvyšuje. Máme-li počáteční stav v bodě 1, určený parametry t_1 , φ_1 probíhá ochlazování po svislici $x_1 = \text{konst.}$ (Obr3.5). Maximální hodnotu relativní vlhkosti $\varphi=1$ dosáhne vzduch při ochlazení na rosný bod, tj. je-li jeho stav dán bodem 2, ve kterém svislice $x_1 = \text{konst.}$ protíná křivku sytosti. Izoterma, procházející tímto bodem udává rosnou teplotu $t_2'' = t_r$.



Obr. 3.5: Ochlazování v vlhkého vzduchu

Při dalším ochlazování teplota klesá, vzduch se stává přesycený a počne se z něho srážet voda v podobě drobných kapiček. Současně se vzduch zamlží, stane se neprůhledným - vznikne mlhovina. Změna postupuje dále po čáře $x_1 = \text{konst.}$, až do bodu 3', o konečné teplotě t_3 . V konečném stavu obsahuje $(1+x_1)$ kg mlhoviny nasycený vzduch se stejnou teplotou. Tento stav musí ležet na průsečíku 3 izotermy t_3 mlhoviny s křivkou sytosti. Má měrnou vlhkost x_3'' , takže jeho hmotnost je $(1+x_3'')$ kg, a obsahuje vodu o hmotnosti $(x_1 - x_3'')$ kg. Změna stavu nasyceného vzduchu probíhá po čáře sytosti z bodu 2 do bodu 3.

Znázornění změny stavu vzduchu v diagramu $i-x$, určení teploty rosného bodu, konečného stavu a hmotnostních složek nasyceného vzduchu i vody je velmi jednoduché.

Analyticky se teplota rosného bodu pro počáteční stav vzduchu, který je určen parametry t_1 , φ_1 určí tak, že pro rosný bod platí:

$$x_1 = x_2'' = \frac{P_{p2}''}{P - P_{p2}''} \quad (3.8)$$

Z uvedeného výrazu vyčíslíme P_{p2}'' a z parních tabulek stanovíme $t_2=t_r$. Konečnou vlhkost nasyceného vzduchu ve stavu 3 stanovíme z výrazu:

$$x_3'' = 0,622 \cdot \frac{P_{p3}''}{P - P_{p3}''} \quad (3.9)$$

Množství vyloučené vody je $(x_1 - x_3'')$ kg. Celkové teplo potřebné na ochlazení $(1+x)$ kg vzduchu obdržíme z rozdílu entalpií:

$$q_{13} = i_1 - i_3 = (i_1 - i_2) + (i_2 - i_3) \quad [\text{J}] \quad (3.10)$$

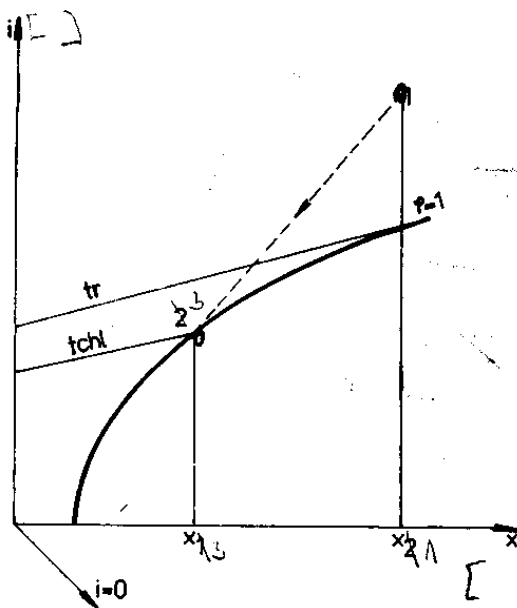
Celkové teplo se skládá z tepla potřebného na ochlazení vzduchu na rosný bod q_{12} a z tepla potřebného na ochlazení mlhoviny q_{23} .

$$q_{12} = i_1 - i_2 = (c_{psv} + x_1 \cdot c_{pp}) \cdot (t_1 - t_2) \quad [\text{J}] \quad (3.11)$$

$$q_{23} = i_2 - i_3 = c_{psv} \cdot (t_2 - t_3) + c_{pp} \cdot (x_2'' \cdot t_2 - x_3'' \cdot t_3) + 2500 \cdot (x_2'' - x_3'') - t_3 \cdot (x_2'' - x_3'')$$

Kdybychom po odloučení vody ohřívali vzduch ze stavu 3 na původní teplotu, do stavu 4, dostaneme vzduch s menší relativní vlhkostí. Parametry tohoto vzduchu a spotřebu tepla určíme jako v předchozím případě. (Obr.3.3)

Tento pochod je základem průmyslového vysoušení vlhkého vzduchu. Při ohřívání vzduchu musí být teplota stěny, od které vzduch přejímá teplo, vždy vyšší než teplota, na kterou vzduch ohříváme. Jen při nekonečně velké ploše se vzduch ohřeje na teplotu stěny. Při ochlazování je pochod složitější. Abychom dosáhli změnu při $x=\text{konst}$, musíme chladit ve dvou stupních. Nejprve chladíme vzduch stěnou, která nesmí mít teplotu nižší než t_r . Jen po ochlazení vzduchu na teplotu rosného bodu můžeme použít chladící stěnu s příslušně nízkou teplotou, abychom se dostali na konečnou teplotu vzduchu t_3 . Kdybychom chladili v jednom stupni s teplotou chladící stěny vhodnou k dosažení konečné teploty t_3 , nedostali bychom průběh změny podle $x=\text{konst}$. Na povrchu chladné stěny by se vzduch v mezní vrstvě ochladil na teplotu ležící pod rosným bodem, takže se stane nasyceným a začne se z něho vylučovat voda už tehdy, kdy ostatní vzduch má ještě teplotu nad rosným bodem. Nasycený vzduch z mezní vrstvy se při turbulentním proudění mísí s nenasyceným vzduchem. Tato změna, jak dále uvidíme, probíhá po přímce, která v diagramu i-x spojuje oba stavy. Proto skutečná změna stavu při ochlazování vzduchu stěnou a teplotou nižší než je rosný bod, probíhá podle přímky spojující počáteční stav vzduchu 1 s bodem 3, ve kterém střední teplota chladící plochy protíná křivku sytosti. (Obr.3.6)



Obr. 3.6: Ochlazování vlhkého vzduchu

3.2.2 Změny stavu při konstantní entalpii

Při těchto změnách nedochází ke sdílení tepla mezi vlhkým vzduchem a jeho okolím, proto mluvíme o adiabatické změně. Touto změnou ($p=\text{konst.}$, $i=\text{konst.}$) lze přibližně nahradit adiabatické sušení vlhkých předmětů vzduchem, adiabatické odpařování vodních filmů do okolního vzduchu, tato změna probíhá také při sušení vzduchu silikagelem.

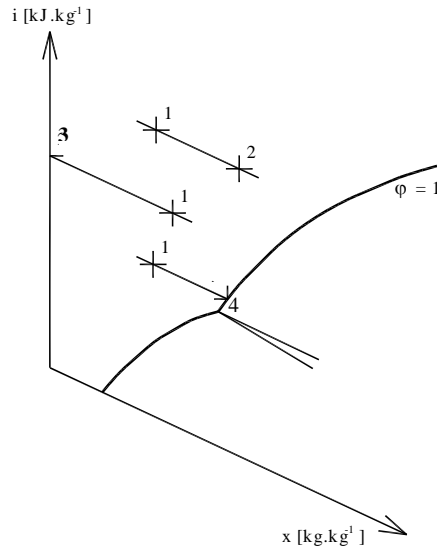
Při změnách tohoto druhu se v průběhu pochodu vlhkost vzduchu, a tím i jeho hmotnost, mění. Změny však probíhají při konstantním tlaku. Tyto pochody jsou mimořádně důležité při úpravách vzduchu v sušárnách, vlhčících komorách, skladech, nebo výrobnách, kde relativní vlhkost vzduchu musí mít v prostoru určitou, přesně udržovanou hodnotu. Vlhký vzduch se v těchto prostorách stýká s vlhkým materiálem, kterému má a nebo nesmí odnímat vlhkost a proto se jeho stav musí upravit tak, aby byl dosažen žádaný účinek.

Mohou nastat pouze dva případy:

- Adiabatické vlhčení vzduchu s ochlazováním
- Adiabatické sušení vzduchu s ohříváním

Všechno teplo potřebné na odpaření vody a ohřev páry se odebírá z vlhkého vzduchu. Teplota vlhkého vzduchu tedy klesá, přestože nedochází k přenosu tepla mezi vlhkým vzduchem a jeho okolím. Při sušení se naopak všechno teplo uvolněné kondenzací části vlhkosti využije na ohřev vlhkého vzduchu. Teplota vlhkého vzduchu roste, přestože nedochází ke sdílení tepla mezi vlhkým vzduchem a jeho okolím.

Protože v tomto případě dochází ke změně složení, mění se v průběhu děje c_p a t_r vlhkého vzduchu. Změna je v i - x diagramu zobrazena úsečkou rovnoběžnou s osou měrné vlhkosti x , tedy pod úhlem 135° ke svislé ose. (Obr.3.7)



Obr. 3.7: Adiabatické vlhčení a sušení vlhkého vzduchu

Při známé výsledné hodnotě teploty lze ostatní parametry vlhkého vzduchu v konečném stavu určit ze vztahů:

$$x_2 = \frac{i - c_{psv} \cdot t_2}{l_{l,g} + c_{pp} \cdot t_2} = x_1 \cdot \frac{l_{l,g} + c_{pp} \cdot t_1}{l_{l,g} + c_{pp} \cdot t_2} - \frac{c_{psv} \cdot (t_2 - t_1)}{l_{l,g} + c_{pp} \cdot t_2} \quad [\text{kg.kg}^{-1}] \quad (3.12)$$

$$\varphi_2 = \frac{x_2 \cdot p}{0,622 \cdot p_{p2}'' + x_2 \cdot p_{p2}''} = \frac{x_2}{0,622 + x_2} \cdot \frac{p}{f(t_2)} \quad [-] \quad (3.13)$$

Při adiabatickém sušení (vlhčení) mohou nastat dva mezní stavy:

- Absolutní vysušení vlhkého vzduchu (Obr.3.5, úsečka 1,3)
- Nasycení vlhkého vzduchu (Obr.3.5, úsečka 1,4)

Absolutní vysušení je dosaženo, když $x_2=0$, $\varphi_2=0$, tento stav nastane dle rovnice (3.12) při teplotě:

$$t_2 = t_1 \cdot \left(1 + \frac{x_1 \cdot c_{pp}}{c_{psv}} \right) + \frac{l_{l,g} \cdot x_1}{c_{psv}} \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.14)$$

Nasycení vlhkého vzduchu při konstantní entalpii je označováno jako mezní adiabatické ochlazení. V tomto stavu je relativní vlhkost $\varphi_2=1$ (Obr.3.5). Měrná vlhkost je (dle vztahu 2.12):

$$x_2 = x_2'' = 0,622 \cdot \frac{p_{p2}''}{p - p_{p2}''} = f(t_2) \quad [\text{kg.kg}^{-1}] \quad (3.15)$$

A teplota mezního adiabatického ochlazení je s pomocí (3.12):

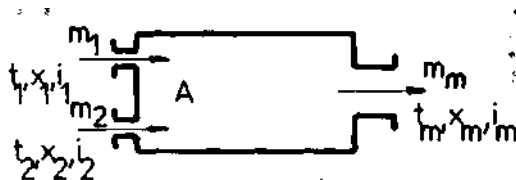
$$t_2 = t_1 \frac{c_{psv} + x_1 \cdot c_{pp}}{c_{psv} + x_2 \cdot c_{pp}} + \frac{l_{l,g} \cdot (x_1 - x_2'')}{c_{psv} + x_2 \cdot c_{pp}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.16)$$

Měrnou vlhkost a teplotu mezního adiabatického ochlazení lze určit iteračním řešením rovnic (3.15 a 3.16).

3.2.3 Změny stavu při adiabatickém směšování

Izobarická změna s ideálním směšováním je velmi častá v přírodě a technických zařízeních, např. v klimatizaci, výtok vlhkého vzduchu, nebo páry z trysek do atmosféry, tato změna probíhá také v psychrometru. Tento pochod se běžně vyskytuje v sušárnách, při klimatizaci a vytápění. Vzduch se může přitom vlhčit nebo vysoušet. Řeší se buď analyticky nebo jednodušeji v diagramu i - x a nyní také pomocí dostupného softwaru.

Při této změně směšujeme různá množství vlhkého vzduchu o různých stavech, ale stejném tlaku a to bez přívodu tepla. Po ideálním smíšení vznikne vzduch o stavu m .



Obr. 3.8: Mísení vzdušných proudů

Do směšovacího prostoru A (Obr.3.8) vedeme dva vzdušné proudy o stavech x_1 , t_1 , i_1 a o hmotnosti suchého vzduchu m_1 a druhý proud o parametrech x_2 , i_2 , t_2 o hmotnosti suchého vzduchu m_2 při stejných tlacích. Oba proudy se při konstantním tlaku mísí a z prostoru je odváděn vzduch o stavu x_m , i_m , t_m o hmotnosti suchého vzduchu m_m . Mísící prostor je těsný a dokonale izolovaný, takže z něho nemůže unikat ani hmota ani teplo.

Protože ve směšovacím prostoru se tlak nezvyšuje, musí vstupující hmota být rovna hmotě vystupující, takže pro hmotnost suchého vzduchu platí vztah $m_1 + m_2 = m_m$ a pro měrnou vlhkost vztah $m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 = m_m \cdot x_m$. Z těchto

výrazů můžeme stanovit měrnou vlhkost směsi:

$$x_m = \frac{m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2}{m_1 + m_2} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (3.12)$$

Protože stěnami směšovacího prostoru se nemůže teplo ztrácet a také se nevykonává při mísení žádná vnější práce, můžeme napsat tepelnou bilanci procesu ve tvaru:

$$m_1 \cdot i_1 + m_2 \cdot i_2 = m_m \cdot i_m \quad (3.13)$$

Ze vztahu (3.13) vyjádříme výslednou entalpii směsi:

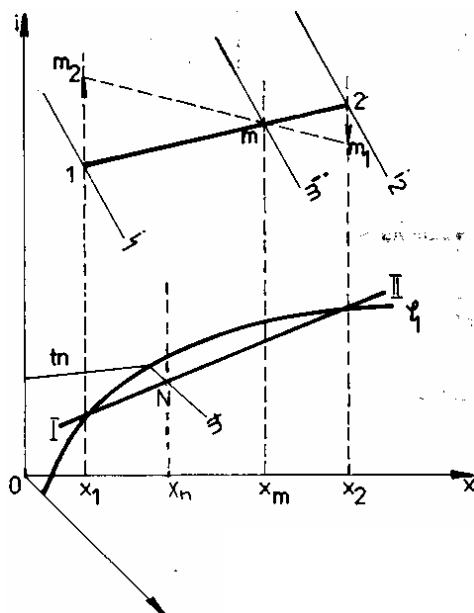
$$i_m = \frac{m_1 \cdot i_1 + m_2 \cdot i_2}{m_1 + m_2} \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (3.14)$$

Uvedené rovnice platí pro dokonale izolovanou soustavu bez vykonávání vnější práce, bez ohledu na to, jaké změny ve směšovací prostor nastávají, tj. zda tam vzniká nenasycený vzduch, či se tvoří mlhovina, popřípadě se odpařuje voda.

Vyloučíme-li z uvedených výrazů m_1 a m_2 a rovnice upravíme, dostaneme konečný vztah:

$$\frac{i_2 - i_m}{x_2 - x_m} = \frac{i_m - i_1}{x_m - x_1} = \frac{i}{x} \quad (3.15)$$

Tento výraz představuje lineární závislost mezi souřadnicemi diagramu, takže všechny jeho hodnoty musí ležet na přímce. Tím dostáváme velmi důležité pravidlo, že výsledný stav vzduchu, vzniklý smíšením dvou proudů vzduchu, leží na spojovací přímce jejich stavů (Obr.3.9) Je to pravidlo směšovací přímky. Je přitom vedlejší jaký je počáteční stav obou proudů, ať je vzduch nenasycený nebo v oblasti mlhoviny.



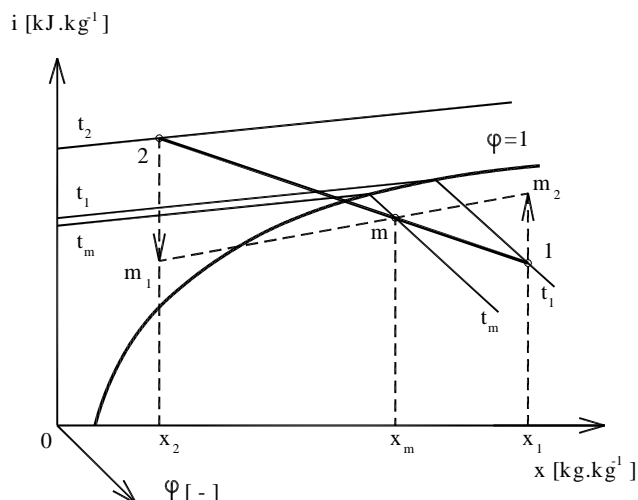
Obr. 3.9: Mísení nenasyceného vzduchu

Výsledný stav směsi dělí směšovací přímku v obráceném poměru hmotností vstupujících vzdušných proudů - v těžišti bodů 1 a 2 s hmotností m_1 , a m_2 se dá lehce sestavit tak, že se na libovolné rovnoběžky, vedené počátečními stavy vzduchu, nanese v opačných směrech hmotnosti vzduchu a spojnice takto získaných bodů protíná směšovací přímku v bodě m , ve kterém leží hledaný stav.

Mísením dvou proudů nenasyceného vzduchu může vzniknout vzduch nenasycený, nasycený nebo mlhovina. Pro stavy vzduchu I. a II. s různými teplotami padne výsledný stav N do mlhovinné oblasti (Obr.3.9) Jako příklad tohoto pochodu lze uvést tvoření mlhy nad vodními toky, viditelný dech v zimě aj. Směšováním dvou nasycených proudů vzduchu vznikne vždy mlhovina.

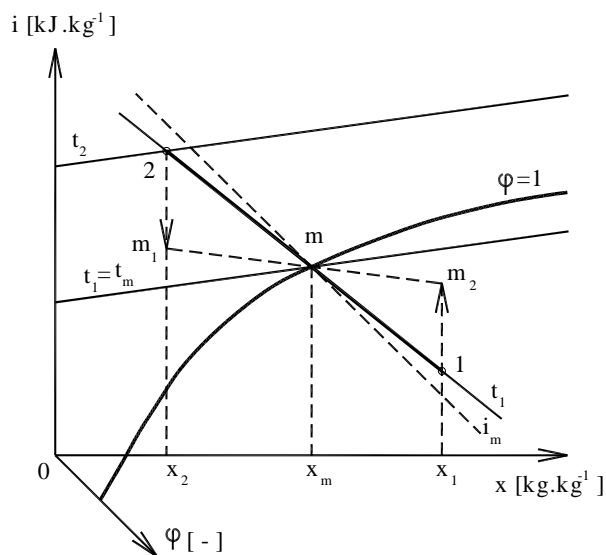
Při míšení dvou proudů nenasyceného vzduchu můžeme vzniklou mlhovinu zbavit mlhy tím, že přivádíme další množství, ať již teplého nebo chladného vzduchu. Výsledný stav směsi se přitom posunuje po směšovací přímce blíže ke stavu vzduchu, který přidáváme, dokud se nedostaneme nad křivku sytosti.

Je zřejmé, že vzduch můžeme zbavit mlhy i chladným vzduchem, na to však potřebujeme velké množství tohoto vzduchu.



Obr. 3.10: Mísení mlhoviny s nenasyceným vzduchem

Při mísení mlhoviny s nenasyceným vzduchem může vzniknout směs s nižší teplotou, než je teplota chladnějšího vzduchu (Obr.3.10). Tento výsledek vyplývá z průběhu izoterem v oblasti mlhoviny a dá se vysvětlit tím, že výsledný vzduch stavu m obsahuje méně kapalné vody než výchozí vzduch, takže na její odpaření se spotřebuje určité množství tepla, které se odebrává vzduchem. Nejnižší teplota vznikne, když se odpaří všechna voda, takže výsledný stav m leží na průsečíku izotermy s křivkou sytosti.



Obr. 3.11: Mísení mlhoviny s nenasyceným vzduchem

Když stav nenasyceného vzduchu, se kterým se mlhovina mísí, leží na prodloužené izotermě mlhoviny (Obr.3.11), je teplota výsledné směsi stejná pro všechny stavy, ležící v oblasti mlhoviny pod průsečíkem m izotermy mlhoviny s křivkou sytosti.

Z podobnosti trojúhelníků vyplývá:

$$\frac{m_1}{x_m - x_2} \geq \frac{m_2}{x_1 - x_m} \quad (3.16)$$

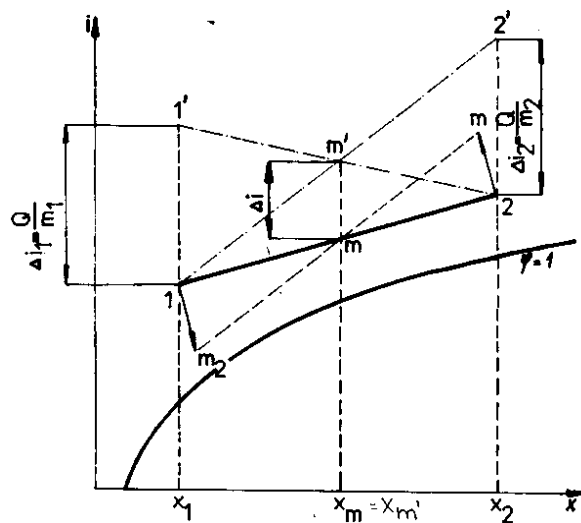
Takže podmínkou pro konstantní teplotu vzniklé směsi je:

$$\frac{m_1}{m_2} \geq \frac{x_m - x_2}{x_1 - x_m} \quad (3.17)$$

Přivádíme-li do směřovacího prostoru teplo Q zvýší se entalpie směsi o:

$$i = \frac{Q}{m_1 + m_2} \quad [\text{J.kg}^{-1}] \quad (3.18)$$

a výsledný stav m' najdeme na průsečíku přímky $x_m = \text{konst.}$ s čarou entalpie $i_m + \Delta i$ (Obr.3.12).



Obr. 3.12: Míchání vzduchu s přívodem tepla

Úsečka mm' představuje množství tepla přivedené hmotnosti $(1+x)$ kg, ve které je 1 kg suchého vzduchu. Přivedením tepla můžeme mlhovinu zbavit mlhy.

Stejný výsledek dostaneme, když teplo Q přivedeme kterémukoliv vzdušnému proudu před smícháním, čímž se jejich entalpie zvětší o:

$$\Delta i_1 = \frac{Q}{m_1} \quad \Delta i_2 = \frac{Q}{m_2} \quad [\text{J.kg}^{-1}] \quad (3.19)$$

takže jejich stavy se po ohřátí nacházejí v bodech $1'$ nebo $2'$ diagramu. Směšovací přímka $1'2'$ nebo $12'$ určí výsledný stav m' jako průsečík s úsečkou x_m jako v předchozím případě.

V uvedeném případě jde buď o jednorázové množství vzduchu i tepla, nebo o množství za časovou jednotku, jde-li o ustálený pochod.

Při ideálním smíchování více než dvou různých množství vlhkého vzduchu určujeme graficky v i-x diagramu výsledný stav postupným smíchováním vždy dvou množství o různých stavech.

Speciálním případem smíchování je vstřikování páry nebo vody do vlhkého vzduchu. Předpokládejme, že voda nebo pára o hmotnosti m_{H_2O} a entalpii i_{H_2O}

se všechna rozptýlí či odpaří ve vlhkém vzduchu o hmotnosti m_1 , měrné vlhkosti x_1 a entalpii i_1

Z bilance hmotnosti určíme měrnou vlhkost výsledné směsi:

$$x_m = x_1 + \frac{m_{H_2O}}{m_{sv1}} \quad [\text{kg.kg}^{-1}] \quad (3.20)$$

Z prvního zákona termodynamiky určíme výslednou entalpii směsi:

$$i_m = i_1 + \frac{m_{H_2O}}{m_{sv1}} \cdot i_{H_2O} \quad [\text{J.kg}^{-1}] \quad (3.21)$$

3.2.4 Odpařování vody do vzduchu

Když se vzduch stýká s vodní hladinou nebo s vlhkým vzduchem, odpařuje se voda do vzduchu, nebo se vlhkost vzduchu sráží do vody, podle stavu obou médií. Tento pochod se vyskytuje v procesu sušení vlhkým vzduchem, při kterém jde o to, aby se vlhkost látky odpařila do vzduchu a s ním také odstranila za sušeného materiálu. Dále se s ním setkáváme u chlazení oběhové vody v chladících věžích a vůbec při pochodech, při kterých se vzduch stýká s vlhkou plochou. Je to technicky velmi významný proces.

Pochod fázové přeměny vody na páru může probíhat odpařováním - jen na hladině, nebo vypařováním - v celém objemu kapaliny.

- Odpařování

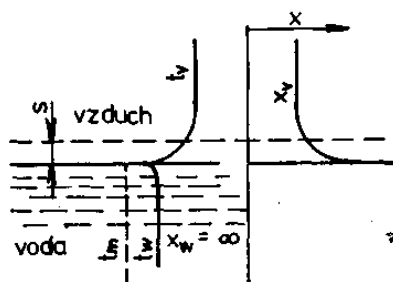
může nastat jen tehdy, jestliže se nad hladinou kapaliny nachází nenasycený vzduch nebo jiný plyn, který svým celkovým tlakem $p = p_{sv} + p_p$ působí na hladinu. Je-li $p_p < p_p''$ při dané teplotě vody na hladině, je pro páru k dispozici tlakový spád, takže vzniklá sytá pára může s hladiny odcházet. Odpařování ustává, jestliže se tlak syté páry na hladině vyrovná s parciálním tlakem páry ve vzduchu. Je to proto, že pára s hladiny není nucena odcházet (počet molekul vystupujících z kapaliny se rovná počtu molekul do ní vstupujících), nastává rovnováha. Vzduch se nad hladinou při dané teplotě nasýtil, takže už nemůže žádnou páru přijímat. Pára proniká s hladiny do vzduchu difúzí nebo prouděním. Uvnitř kapaliny se pára tvořit nemůže, protože by musela mít tlak rovný celkovému tlaku, který může dosáhnout až při určité teplotě.

- Vypařování

Při tomto procesu se tvoří pára v celém objemu kapaliny. Její teplota musí být tak vysoká, aby odpovídala bodu varu při celkovém tlaku, který na hladinu působí, případně s připočtením hydrostatického tlaku kapaliny. Při vypařování nezáleží na tom, nachází-li se nad hladinou vzduch nebo jiný plyn, protože pára vystupuje z kapaliny vlivem tlakového rozdílu a postupně vytlačí z prostoru nad hladinou všechn vzduch.

Abychom mechanismus pochodu vysvětlili předpokládejme, že na začátku se stýká vlhký vzduch s parametry t_v , x_v , i_v s vodou, která má v celém objemu stejnou teplotu $t_w = i_w$ ($i_w = \infty$). Hladina vody tvoří fázové rozhraní a je-li teplota jiná než teplota vody $t_v \neq t_w$, vznikne v tomto místě teplotní spád. Protože přerušení teploty nemůže existovat, vyrovnají se rychle teploty vrstev,

které se vzájemně stýkají, na teplotu $t'' = t_w = t_v''$. Kdyby tomu tak nebylo, způsobily by rozdíly teplot a napětí páry intenzivní odpařování, které rychle teploty vyrovná. Těsně nad hladinou má pára tlak p_p'' syté páry, kterou kapalina vysílá nad hladinu a který je dán teplotou kapaliny. Částičky vzduchu, které se stýkají s hladinou, jsou vždy nasycené, bez ohledu na to, jaký stav vzduchu je nad hladinou (Obr.3.13) znázorňuje průběh teplot a vlhkosti v blízkosti hladiny pro určité poměry. Strmost a průběh křivek závisí především na proudění vzduchu nad hladinou. Přímo na hladině vzniká vždy laminární vrstva tloušťky s , přes kterou teplo přechází jen vedením a pára difúzí.



Obr. 3.13: Průběh teplot a vlhkosti nad vodní hladinou při vypařování

Když parciální tlak páry ve vzduchu, vzdáleném od hladiny, je menší než tlak syté páry odpovídající teplotě na hladině, proudí pára s hladiny do vzduchu a tak vzniká odpařování. Když parciální tlak ve vzduchu, který přichází do styku s hladinou je větší než tlak syté páry při dané teplotě hladiny, postupuje pára ze vzduchu k hladině do vody a vlhkost ze vzduchu se sráží. Množství vody, které se vymění mezi vzduchem a hladinou, je úměrné rozdílu parciálních tlaků a závisí na proudění vzduchu u hladiny.

Příklad 3.1

V místnosti je vzduch o teplotě $t_1=10^\circ\text{C}$. Vlhkoměr ukazuje 86,3 % vlhkosti. Vypočítejte hmotnost vodní páry obsažené ve vzduchu. Jak se změní relativní vlhkost vzduchu, stoupne-li teplota z 10°C na $t_2=15^\circ\text{C}$? Jak se změní relativní vlhkost vzduchu, ochladí-li se z 10°C na $t_3=5^\circ\text{C}$?



Příklad 3.2

Vlhký vzduch, který má počáteční objem 50 m^3 a relativní vlhkost $\varphi = 60\%$ izobaricky ohříváme při tlaku $p=0,1\text{ MPa}$ z teploty 10°C na teplotu 45°C . Jak se změní relativní vlhkost vzduchu a jaké množství tepla je na tuto změnu potřeba?

Příklad 3.3

Vlhkému vzduchu o hmotnosti $4\,000\text{ kg}$, teplotě 23°C , tlaku $0,1\text{ MPa}$ a relativní vlhkosti 50% je dodáno teplo 50 MJ . Vypočítejte jaká bude po ohřátí měrná vlhkost, teplota a relativní vlhkost.

Příklad 3.4

Vlhký vzduch o teplotě 30°C , relativní vlhkosti 50% izobaricky ochlazujeme bez přívodu vody na teplotu 10°C . Stanovte rosný bod, množství vysrážené vody a odvedené teplo.

Příklad 3.5

Umělé vlákno se suší vzduchem o teplotě $t=20\text{ °C}$ a relativní vlhkosti $\varphi=60\%$. Tento vzduch se předeřívá v ohříváči na teplotu 95 °C , vstupuje do sušárny a odchází o teplotě 35 °C . Určete množství vzduchu a množství tepla na odpaření 1kg vlhkosti.

Příklad 3.6

Kolik vzduchu potřebujeme na odpaření 50kg vlhkosti ze sušárny? Při vstupu do sušárny má vlhký vzduch měrnou vlhkost $0,03\text{ kg.kg}^{-1}$ a na výstupu ze sušárny je měrná vlhkost $0,05\text{ kg.kg}^{-1}$.

Řešení

Příklad 3.1: $\rho_V=8,11 \cdot 10^{-3}\text{ kg.m}^{-3}$, $\varphi(15)=0,63$, $\varphi(5)=1$; Příklad 3.2: $\varphi_2=0,077$, $Q=2,168\text{ MJ}$; Příklad 3.3: $x_2=9,1 \cdot 10^{-3}\text{ kg.kg}^{-1}$, $t_2=35,3\text{ °C}$, $\varphi_2=0,24$; Příklad 3.4: $t_r=18,5\text{ °C}$, $x_k=6 \cdot 10^{-3}\text{ kg.kg}^{-1}$, $q=35\text{ kJ.kg}^{-1}$; Příklad 3.5: na odpaření 1kg vody je potřeba 41,6kg vzduchu a cca 3200kJ tepla; Příklad 3.6: 2500 kg vzduchu

3.3 Autotest

1. Popiš Molliérův i-x diagram vlhkého vzduchu, popiš křivky a přímky v něm zakreslené.
2. Popiš změny stavu vlhkého vzduchu při konstantní měrné vlhkosti
3. Co je to teplota rosného bodu, jak ji stanovíme v i-x diagramu?
4. Popiš změny stavu vzduchu při konstantní entalpii a dva mezní případy těchto změn.
5. Jaké pravidlo se uplatňuje při mísení vzdušných proudů za konstantního tlaku?

4 Závěr

4.1 Shrnutí

Modul 05 studijního předmětu Technická termodynamika se měl za úkol seznámit čtenáře s teorií vlhkého vzduchu a s praktickými příklady využití této teorie při řešení základních úloh termodynamiky vlhkého vzduchu.



V kapitole 2 je uvedena definice vlhkého vzduchu a najdeme tam také všechny charakteristiky vzduchu suchého, přes jeho chemické složení po základní fyzikálně mechanické konstanty. V této části studijních opor je vysvětlen význam nových veličin, které jsou používány pro charakterizování vlhkého vzduchu jako je entalpie, teplota rosného bodu, teplota mokrého teploměru, vlhkost vzduchu apod.

V kapitole č.3 je popsán Molliérův i-x diagram vlhkého vzduchu a práce s ním. Jsou popsány základní úkony (změny stavu), ke kterým v praxi při práci s vlhkým vzduchem dochází, jako je ohřívání vzduchu, chlazení, vlhčení a sušení za různých podmínek. Rozebráno je také mísení vzdušných proudů.

V textu bylo využito vědecko-výzkumného záměru MSM 0021630511 „*Progressivní stavební materiály s využitím druhotných surovin a jejich vliv na životnost konstrukcí*“.

4.2 Studijní prameny

4.2.1 Seznam použité literatury

- [1] Hejzlar, R. *Termodynamika*. ČVUT v Praze 2004, ISBN 80-01-02975-1
- [2] Nožička, J. *Termomechanika*. ČVUT v Praze 1998, ISBN 80-01-01836-9
- [3] Raček, J. *Mechanika a termomechanika, Přehled teorie a úlohy*. VUT v Brně 1992, ISBN 80-214-0446-9
- [4] Bureš, J., Malota, D., Kulísek, K. *Tepelná energetika*. VUT v Brně 1990, ISBN 80-214-0167-2
- [5] Adamovský, R., Kára, J. *Aplikovaná termomechanika*. VŠZ v Praze 1994, ISBN 80-213-0177-5
- [6] Malota, D. *Tepelná zařízení I (sušárny)*. VUT v Brně 1985
- [7] Malota, D., Novák, J. *Tepelná zařízení II (pece)*. VUT v Brně 1987
- [8] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. *Fyzika, část 2 Mechanika a termodynamika*. VUT v Brně 2000, ISBN 80-214-1868-0
- [9] Kheilová, M. *Termodynamika*. VUT v Brně 1998, ISBN 80-214-0997-5
- [10] Klomfar, J., Šifner, O. *Molliérův h-s diagram vody a vodní páry*. Akademia Praha 1997, ISBN 80-200-0653-2



4.2.2 Odkazy na další studijní zdroje a prameny

- [11] www.label.com.pl
- [12] www.anemo.cz
- [13] www.novi.cz
- [14] www.tzb-info.cz
- [15] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kategorie:Termodynamika>



4.3 Klíč



Kontrolní otázky najdete vždy na konci každé z kapitol. Nejde o vyčerpávající seznam otázek k danému tématu. Tyto kontrolní otázky slouží jen jako ukázka možné formulace otázek, se kterou se může setkat v ústní části zkoušky. Odpověď na každou otázku každý pozorný čtenář snadno najde v odpovídající části textu.