

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Jan Macák

KTE

Ročník práce a přílohy

Počet stran: 53

Počet obrázků: 52

Počet tabulek: 16

Počet příloh: 14

1996 vypracováno 17. 12. 96

Jan Macák

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Obor: č. 23-17-08

KONSTRUKCE STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

zaměření

TEPELNÁ TECHNIKA

KATEDRA TERMOMECHANIKY

téma práce

APLIKACE PŘENOSU TEPLA A HMOTY PŘI ZVLHČOVÁNÍ
A ODVLHČOVÁNÍ VZDUCHU

Jan Macák

KTE

Vedoucí diplomové práce: doc.ing. Josef Olehla, CSc.

Rozsah práce a příloh

Počet stran: 53

Počet obrázků: 22

Počet tabulek: 10

Počet příloh: 13

Datum vypracování: 10.1.1997

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra : Termomechaniky

Školní rok : 1996/97

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro Jana M a c á k a

obor Tepelná technika

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona č.172/1990 Sb. o vysokých školách určuje tuto diplomovou práci :

Název tématu : APLIKACE PŘENOSU TEPLA A HMOTY PŘI ZVLHČOVÁNÍ
A ODVLHČOVÁNÍ VZDUCHU

Zásady pro vypracování :

- 1/ Možnosti zvlhčování a odvlhčování vzduchu, rozbor, schema zařízení.
- 2/ Analytické řešení přenosu tepla a hmoty při zvlhčování a odvlhčování.
- 3/ Experimentální určení přenosu tepla a hmoty pro zvolené případy.
- 4/ Konkrétní postup při návrhu zvlhčovacího příp. odvlhčovacího zařízení s ohledem na okrajové podmínky /rychlosti, vlhkosti, teploty/, na letní a zimní extrém atd.
- 5/ Závěr a zhodnocení jednotlivých metod.

KTE/TT

54s., 13 s. příl.

V 18/94 S

Rozsah grafických prací : 10

Rozsah průvodní zprávy : 50

Seznam odborné literatury :

1. Chyský, J.: Vlhký vzduch, Praha SNTL 1977
2. Kalčík, J.: -Šýkora, K.: Technická termodynamika, ACADEMIA Praha, 1973
3. Jenčík, J.-Kohn, L.: Technická měření, SNTL Praha, 1982
4. Chapman, J.A.: Heat Transfer, Maxwell Intern. Edit., 1974
5. Měca, F.: Klimatizace, Práce, Praha 1958
6. Firemní podklady
7. Časopis ZTV, ACADEMIA, Praha

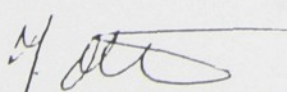
Vedoucí diplomové práce : Doc. Ing. Josef Olehla, CSc.

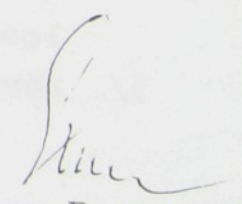
Konzultant :

Zadání diplomové práce : 18. 11. 1996

Termín odevzdání diplomové práce : 10. 01. 1997




Doc. Ing. Josef Olehla, CSc.
Vedoucí katedry


Prof. Ing. Jaroslav Exner, CSc.
Děkan

V Liberci dne 18. 11. 1996

ANOTACE

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra termomechaniky

Obor: Tepelná technika

Školní rok: 1996/97

Diplomant: Jan Macák

Téma práce: Aplikace přenosu tepla a hmoty při zvlhčování a odvlhčování vzduchu

Číslo diplomové práce: 015

Vedoucí diplomové práce: doc.ing. Josef Olehla, CSc.

Stručný výtah:

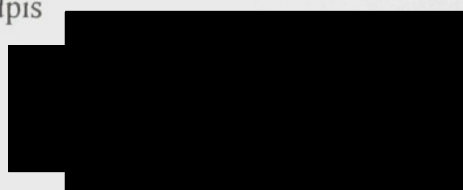
Práce se zabývá problematikou přenosu tepla a hmoty při zvlhčování a odvlhčování vzduchu. Pomocí metody *přenosu tepla konvekci a přenosu hmoty z vodní hladiny obtékané vzduchem*, zkoumá vliv okolních parametrů na účinnost zvlhčovacího procesu. Obsahuje rozbor děje odpařování na volné vodní hladině za různých podmínek proudění okolního vzduchu (změna směru, rychlosti a teploty proudění). A srovnání intenzity odpařování získané experimentálním měřením s teoretickými poznatky jiných autorů.

Místopřísežné prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

v Liberci, 10.1.1997

podpis

A large black rectangular box redacting the signature of the author.

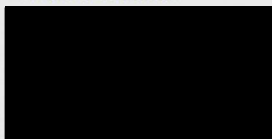
Jan Jureš

Prohlášení

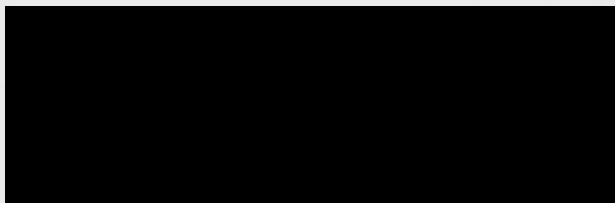
Prohlášení k využívání výsledků diplomové práce. Jsem si vědom toho, že diplomová práce je majetkem školy a že s ní nemohu sám bez svolení školy disponovat, a že diplomová práce může být zapůjčena či objednána (kopie) za účelem využití jejího obsahu. Beru na vědomí, že po pěti letech si mohu diplomovou práci vyžádat v Univerzitní knihovně TU v Liberci, kde je uložena.

Adresa

Jan Macák



Podpis



Poděkování

Chtěl bych poděkovat doc.ing. Josefu Olehlovi, CSc. za cenné připomínky, náměty a rady k obsahové stránce a všem pracovníkům Katedry termomechaniky, kteří svými odbornými radami napomohli při vypracování této diplomové práce.

Jan Macák

Obsah

Zadání diplomové práce

Anotace

Místopřisežné prohlášení

Prohlášení

Poděkování

Obsah

Seznam použitých symbolů a označení

	str.
1. - Úvod	10
2. - Stanovení vlhkosti vzduchu	11
3. - Základní způsoby odvlhčování vzduchu	13
3.1 - Ohřevem vlhkého vzduchu na vyšší teplotu	14
3.2 - Ochlazením vlhkého vzduchu pod teplotu rosného bodu t_r	15
3.3 - Schémata odvlhčovacích zařízení	16
4. - Základní způsoby zvlhčování vzduchu	16
4.1 - Adiabatické odpařování	18
4.2 - Zvlhčování vzduchu vodou	20
4.3 - Zvlhčování vzduchu párou	21
4.4 - Schémata zvlhčovacích zařízení	22
5. - Speciální úpravy vzduchu	
5.1 - Úprava vzduchu adsorpcí	23
5.2 - Úprava vzduchu absorpcí	25
6. - Základní vztahy analytického řešení přenosu tepla a hmoty při zvlhčování a odvlhčování vzduchu	27
7. - Experimentální určení přenosu tepla a hmoty	
7.1 - Přenos tepla a hmoty při jednostranné difuzi	30

	str.
7.2 - Analogie přenosu tepla a hmoty	33
7.2.1 - Určení poměru mezi součinitelem přenosu tepla a hmoty	35
7.3 - Znázornění přenosu tepla a hmoty v Mollierově diagramu	39
8. - Popis experimentálních zařízení	42
9. - Zhodnocení teoretických výsledků a experimentálních měření	46
10. - Závěr	53

Seznam použité literatury

Příloha

Seznam použitých symbolů a označení

Symbol	Název	Rozměr
a	součinitel teplotní vodivosti	$[m^2/s]$
A	psychometrický součinitel	$[1/K]$
c	měrná tepelná kapacita	$[J/kg.K]$
$\bar{c}$	střední měrná tepelná kapacita	$[J/kg.K]$
D_e	součinitel difúze	$[m^2/s]$
d_{CH}	charakteristický rozměr	$[m]$
Gu	Guchmanovo číslo	
i	entalpie vlhkého vzduchu	$[J/kg]$
K_k	korekční faktor	$[1]$
l	měrné teplo výparné	$[J/kg]$
Le	Lewisovo číslo	
m	hmotnost	$[kg]$
M	hmotnostní průtok	$[kg/s]$
Nu	Nusseltovo číslo	
p	tlak	$[Pa]$
$\bar{p}$	střední tlak	$[Pa]$
Pr	Prandtlovo číslo	
q	sdělené teplo	$[J/kg]$
Q	celkové množství sděleného tepla	$[J]$
r	měrná (individuální) plynová konstanta	$[J/kg.K]$
Re	Reynoldsovo číslo	
S	plocha	$[m^2]$
Sc	Schmidtovo číslo	
Sh	Sherwoodovo číslo	
t	teplota	$[^{\circ}C]$
$\bar{T}$	střední hodnota absolutní teploty	$[K]$

T	absolutní teplota	[K]
w	rychlost	[m/s]
x	měrná vlhkost vzduchu	[kg/kg]
z	vzdálenost	[m]
α	součinitel přestupu tepla	[W/m ² .K]
β	součinitel přenosu hmoty	[kg/m ² .s]
δ	směrové měřítko v diagramu i-x	[J/kg]
Δ	konečný rozdíl dvou hodnot	
ϑ	směrové měřítko v diagramu i-x	[J/kg]
Θ	teplotní činitel	
λ	součinitel tepelné vodivosti	[W/m.K]
ν	kinematická viskozita	[m ² /s]
ρ	hustota	[kg/m ³]
φ	relativní vlhkost	[1]

Indexy dolní:

- ad - adiabatický proces
- c - koncentraci
- D - pára
- e - venkovní
- i - vnitřní
- k - konvekce
- L - vzduch, lázeň
- m - střední hodnota, mezní hodnota, mokrý
- p - při stálém tlaku, stav na povrchu, při celkovém tlaku, polytropický
- r - stav při teplotě rosného bodu
- R - sálání
- rozt - roztoku

- s - střední
- sv - suchého vzduchu
- v - stav při stálém objemu, vody
- w - vody, rychlost
- x - stav vztahující se na měrnou vlhkost
- 1, 2 - veličiny v daných místech
- a, b - veličiny v daných místech

Indexy horní:

- II - stav sytosti nebo nasycení

1. - Úvod

V dnešním vyspělém průmyslu, speciálních prostorech, ale i v dalších oblastech našeho života je stále vzrůstající potřeba vytvoření určitých klimatických podmínek okolního prostředí a jejich udržování.

Toto znamená udržování parametrů vlhkého vzduchu na dané úrovni, pomocí regulace vlhkosti, teploty případně tlaku. A právě vlhkost vzduchu je jedním z nejdůležitějších parametrů tzv. tepelné pohody okolního prostředí, které sledujeme. Je způsobena obsahem vodních par v atmosféře a lze ji upravovat pomocí známých procesů z oblasti úprav vlhkého vzduchu. Jsou to: ohřívání, ochlazování, zvlhčování, odvlhčování a směšování. Tyto procesy obvykle probíhají beze změny tlaku a proto je lze považovat za izobarické. Pro uskutečnění těchto potřebných změn se využívají zvlhčovací a sušící zařízení, kterými lze do určité míry regulovat požadované parametry okolního prostředí.

Tyto zařízení jsou, spolu s dalšími elementy používanými ve vzduchotechnice, ve většině případů zabudovány do systémů nazývaných klimatizační jednotky. Část klimatizačního zařízení, která upravuje vzduch směrem k vyššímu obsahu vlhkosti, pracuje na základě přenosu tepla a hmoty při fázových změnách vody ve vodní páru, nebo míšením vzduchu s vodní párou. Na základě těchto procesů bylo uskutečněno několik experimentálních měření v oblasti zvlhčování vzduchu vodou.

Jako základní bylo provedeno přirozené adiabatické odpařování z volné vodní hladiny za různých podmínek změn teplot lázně, čehož se dosáhlo ochlazením nebo ohřátím lázně. Během tohoto experimentu bylo odměřeno rozložení teplotních vrstev ve vzduchu nad vodní hladinou a pod ní.

Odpařováním z volné vodní hladiny obtékané vzduchem se zabýval další experiment. Porovnáván byl vliv teploty ofukovaného proudu vzduchu, jeho rychlosti, a směru ofukování na hmotnostní tok odpařené vody s důrazem na účinnost zvlhčovacího procesu.

Studium procesů a způsobů zvlhčování vzduchu nám umožňuje lépe využít znalostí k co nejefektivnější konstrukci zařízení pro úpravy vzduchu.

2. - Stanovení vlhkosti vzduchu

Nejběžnější metodou, kterou určujeme relativní vlhkost, je psychometrická metoda. Přístroj používaný k měření se nazývá *aspirační psychometr*. Skládá se ze dvou teploměrů, suchého a vlhkého (mokrého). Suchým, normálním teploměrem měříme teplotu atmosferického vzduchu. Druhý teploměr má rtuťovou nádobku obalenou tkaninou (punčoškou) snadno sající vodu z připojené nádoby. Odtud *vlhký* nebo *mokrý* teploměr. Voda z tkaniny se vypařuje teplem sdíleným z okolního vzduchu, následkem čehož se ochlazuje vlhký teploměr. Teplota vlhkého teploměru se po určité době ustálí na hodnotě, která je závislá na stavu vlhkého vzduchu t , ϕ a na rychlosti proudění vzduchu kolem teploměru. Při daném stavu vzduchu klesá konečná teplota vlhkého teploměru s rostoucí rychlostí proudění a při rychlosti asi 3 m/s dosahuje hodnoty, která se dále s rostoucí rychlostí proudění mění jen nepatrně. Aby se dosáhlo této hodnoty, užívá se umělého proudění vzduchu ventilátorkem (větraný teploměr). K zabránění rušivého vlivu sálání se teploměry chrání prstencovým kovovým chráničem.

Rozdíl teplot suchého (t) a vlhkého teploměru (t_m) - krátce rozdíl suché a mokré teploty - se nazývá *psychometrický rozdíl*.

Proces odpařování na mokré punčošce se podobá procesu adiabatického odpařování, poněvadž všechno teplo potřebné pro odpařování dodává prakticky vzduch. Na tento proces však mají vliv i poměry při přestupu tepla a přenosu látky. Praktické zkoušky však prokázaly, že jednotlivé vlivy jsou takového řádu a smyslu, že se u aspiračního psychometru vzájemně kompenzují v mezích běžných teplot (do $t \leq 60^\circ\text{C}$ a $t_m \leq 30^\circ\text{C}$). Vlivem přestupu tepla a přenosu látky by byla teplota $t_m < t_{ad}$, kdežto vlivem sálání naopak $t_m > t_{ad}$. Můžeme proto v uvedených mezích přijmout předpoklad, že $t_m \doteq t_{ad}$.

Vyčíslování psychometrických měření provádíme pomocí *Spreungova* vzorce

$$p_p = p''_{p_m} - Ap(t - t_m) \quad (1)$$

kde A je *psychometrický součinitel*, nazývaný též nesprávně psychometrická konstanta. Součinitel A není totiž konstantní.

Dosadíme-li do (1) za $p_{pm}^{\parallel} = p x_m^{\parallel} / (0,622 + x_m^{\parallel})$ a za $p_p = p x / (0,622 + x_p)$ obdržíme po úpravě

$$A_p(t - t_m) = p_{p_m}'' - p_p = \frac{p(x_m'' - x)}{0,622 + x + x_m'' + x x_m'' / 0,622} \quad (2)$$

Předpokládáme-li, že mokrá punčoška má teplotu mezního adiabatického chlazení, budou hodnoty t_m , $x_m^{\parallel}$, t , x vázány vztahem

$$\mathcal{G}_{ad} = c_w t_w = \frac{i - i_m''}{x - x_m''} = \frac{c_v t + x l_0 + x c_p t - c_v t_m - x_m'' l_0 - x_m'' t_m}{x - x_m''} \quad (3)$$

z čehož

$$c_w t_w (x - x_m'') = c_v t + x l_0 + x c_p t - c_v t_m - x_m'' l_0 - x_m'' t_m$$

takže

$$x(c_w t_w - l_0 - c_p t) = c_v(t - t_m) - x_m'' l_0 - x_m'' t_m - x_m'' c_w t_w$$

zde c_v a c_p jsou měrná tepla vzduchu a páry při konstantním tlaku.

Poněvadž $l_m = l_0 + c_p t_m - c_w t_w$, bude po úpravě

$$x = \frac{x_m'' l_m - c_v(t - t_m)}{l_m + c_p(t - t_m)} \quad (4)$$

Dosazením výrazu (4) do rovnice (2) bude po úpravě

$$A = \frac{c_v + x_m'' c_p}{(t - t_m)(0,622 c_p - c_v) \left(1 + x_m'' / 0,622 + l_m (0,622 + 2x_m'' + 1,61x_m''^2) \right)} \quad (5)$$

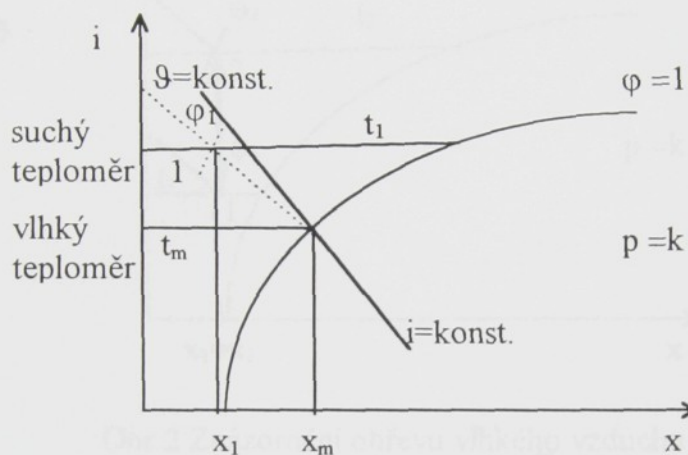
Ve jmenovateli můžeme zanedbat člen $(0,622 c_p - c_v) \approx 0$ a $1,61x_m''^2$, kde x_m je velmi malá hodnota, takže je

$$A \approx \frac{c_v + x_m'' c_p}{l_m (0,622 + 2x_m'')} \quad (5a)$$

Takto vypočítaná hodnota součinitele A v mezích $t_m = 0 \div 20$ °C je $A = 648 \cdot 10^{-6}$. Pro vyšší teploty t_m klesá.

Pro přesné určování relativní vlhkosti se užívají psychometrické tabulky, které jsou dodávány s příslušným psychometrem.

Z předchozích úvah vyplývá určení stavu vzduchu z psychometrického měření navržené Molliem. Poněvadž teplota mokrého teploměru se shoduje s teplotou mezního adiabatického chlazení, je dán výsledný stav vzduchu (t, x) a jemu odpovídající relativní vlhkost φ v i - x diagramu, v průsečíku izotermie suchého teploměru a izotermie mezního adiabatického ochlazení příslušné teploty t_m , obr. 1.



Obr. 1 Určení relativní vlhkosti v i - x diagramu.

3. - Základní způsoby odvlhčování vzduchu

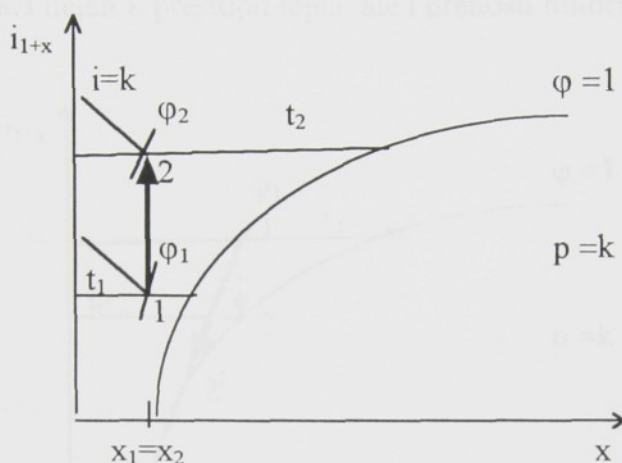
Při ohřevu vlhkého vzduchu se vedle teploty mění též jeho relativní vlhkost φ . Klesá, protože čím je vlhký vzduch teplejší, tím může obsahovat větší množství vlhkosti ve formě páry. Měrná vlhkost x zůstává konstantní. Změny stavu vlhkého vzduchu můžeme přehledně řešit pomocí Molliera diagramu. Tyto procesy jsou kvantitativně popsány rovnicí pro přestup tepla konvekcí (Newtonova rovnice):

$$Q = \alpha_k S (t_p - t) \quad (6)$$

Odvlhčení nebo vysušení vlhkého vzduchu lze dosáhnout několika způsoby:

3.1- Ohřevem vlhkého vzduchu na vyšší teplotu

Ohřevem vlhkého vzduchu na vyšší teplotu, čímž klesne relativní vlhkost φ , měrná vlhkost x zůstává stejná. Ohřívání vlhkého vzduchu máme zakresleno na obr.2.



Obr.2 Znázornění ohřevu vlhkého vzduchu v Mollierově diagramu.

Z diagramu můžeme pro zadaný výchozí stav a konečnou teplotu odečíst hodnotu relativní vlhkosti v konečném stavu. Odečtení hodnot obou entalpií umožní vyhodnotit množství tepla potřebné pro izobarický ohřev určitého množství vzduchu. Rozdíl entalpií násobíme jen množstvím suchého vzduchu v soustavě, poněvadž vlhkost je již obsažena v hodnotě entalpie. Entalpie je v diagramu vyhodnocena pro množství $1+x$ kilogramů vlhkého vzduchu. Jak je vidět ve vztahu pro výpočet tepelného příkonu ohříváče

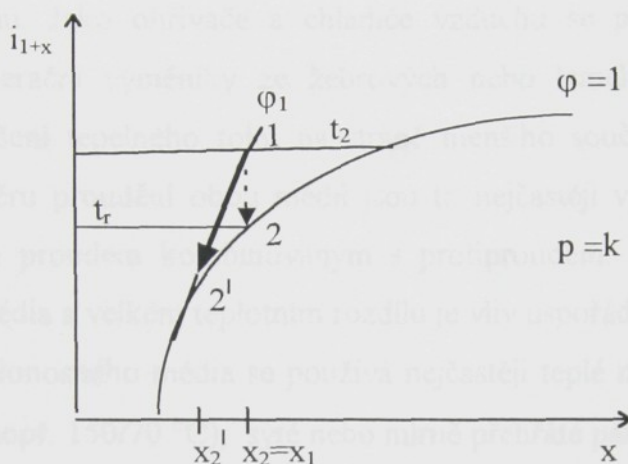
$$\begin{aligned} Q &= m_{sv} c_{psv} (t_2 - t_1) + m_p \bar{c}_{pp} (t_2 - t_1) = \\ &= m_{sv} [(i_{1+x})_2 - (i_{1+x})_1] \end{aligned} \quad (7)$$

Tepelný příkon průtokového ohříváče vlhkého vzduchu bude dán vztahem:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{sv} [(i_{1+x})_2 - (i_{1+x})_1] \quad (8)$$

3.2 - Ochlazením vlhkého vzduchu pod teplotu rosného bodu t_r

Ochlazením vlhkého vzduchu pod teplotu rosného bodu t_r s kondenzací vodní páry a následným ohřevem na danou teplotu t dojde ke snížení relativní vlhkosti φ i měrné vlhkosti x . Dochází nejen k přestupu tepla, ale i přenosu hmoty. Zobrazeno na obr.3.



Obr.3 Znázornění ochlazení vlhkého vzduchu s kondenzací páry v Mollierově diagramu.

V případě, že konečná teplota $t_2 < t_r$ dojde při chlazení vlhkého vzduchu ke kondenzaci části vlhkosti. Chladíme-li vzduch v chladiči, s těmito podmínkami, sráží se vlhkost na povrchu chladiče a odtéká. Vzduch se stává nasyceným - $2'$, měrná vlhkost vzduchu klesá. Při kontinuálně probíhajícím ději se snižuje celkové množství vlhkého vzduchu o množství zkondenzované vlhkosti

$$\dot{m}_k = \dot{m}_{sv}(x_1 - x_{2'}) \quad (9)$$

Zkondenzovaná vlhkost s sebou ze soustavy odnáší entalpii, která závisí na rozdílu entalpií ve stavech 2 a $2'$. Ve formě tepla odvádíme z chladiče tedy teplo závisící na rozdílu entalpií ve stavech 1 a 2.

Kombinací chlazení vlhkého vzduchu pod teplotu rosného bodu, odloučení zkondenzované vlhkosti a následujícího ohřevu na původní teplotu dostáváme vzduch

o nižší než výchozí měrné i relativní vlhkosti. Kombinací uvedených dějů jsme vzduch vysušili.

3.3 - Schémata odvlhčovacích zařízení

Proces odvlhčování vzduchu se provádí v zařízeních nazývaných ohřivače nebo chladiče vzduchu. Jako ohřivače a chladiče vzduchu se používají v klimatizaci téměř výhradně rekuperační výměníky ze žebrových nebo lamelových trubek. Žebrování se používá ke zvýšení tepelného toku na straně menšího součinitele přestupu tepla. Podle vzájemného směru proudění obou médií jsou to nejčastěji výměníky s příčným proudem nebo s příčným proudem kombinovaným s protiproudem. Při malých změnách teploty teplotního média a velkém teplotním rozdílu je vliv uspořádání proudění jen malý.

Jako teplotního média se používá nejčastěji teplé nebo horké vody (max. 90/70 °C, 90/80 °C, popř. 150/70 °C), syté nebo mírně přehřáté páry, obvykle do tlaku 0,5 Mpa. I když teplovodní ohřivače nemají lineární charakteristiku (tepelný výkon není lineárně úměrný množství vody), jsou výhodnější než ohřivače parní. Nevýhody parních ohřivačů jsou jejich vnitřní koroze (přítomnost vzduchu v páře), snižování výkonu v důsledku přítomnosti inertních plynů, nutnost použití odváděčů kondenzátu, obtížnější regulace. U chladičů je teplotním médiem nejčastěji voda, méně často (pro podnulové teploty) solanka. Někdy jsou chladiče vzduchu konstruovány jako přímé výparníky.

Schématy jsou uvedena na obr. 1,2 v příloze.

4. - Základní způsoby zvlhčování vzduchu

Vlhčení vzduchu je v podstatě směšování vzduchu s vodou. zde je uveden základní postup řešení adiabatického, kontinuálního vlhčení vzduchu při konstantním tlaku. Platí pro ně rovnice kontinuity a energetická v příslušné úpravě

$$(\dot{m}_w)_2 = (\dot{m}_w)_1 + \dot{m}_k \quad (10)$$

$$(\dot{I}_{vv})_2 = (\dot{I}_{vv})_1 + \dot{I}_k \quad (11)$$

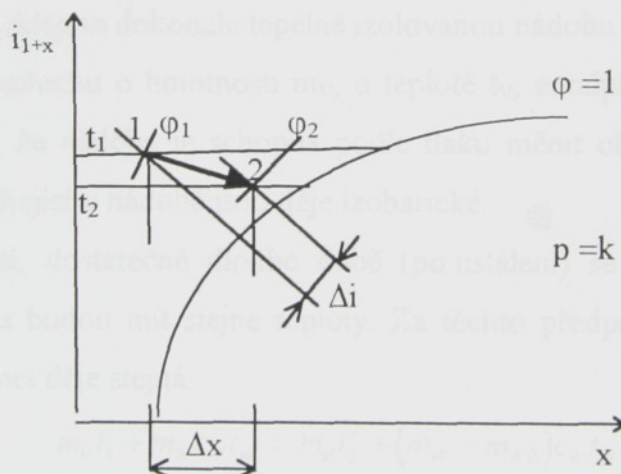
ve kterých jsou indexem k označeny veličiny týkající se přidávané vlhkosti. Z rovnice (10) obdržíme po úpravě

$$\begin{aligned} \dot{m}_{sv}(1+x_2) &= \dot{m}_{sv}(1+x_1) + \dot{m}_k, \\ x_2 - x_1 &= \Delta x = \frac{\dot{m}_k}{\dot{m}_{sv}} \end{aligned} \quad (12)$$

a z rovnice (11)

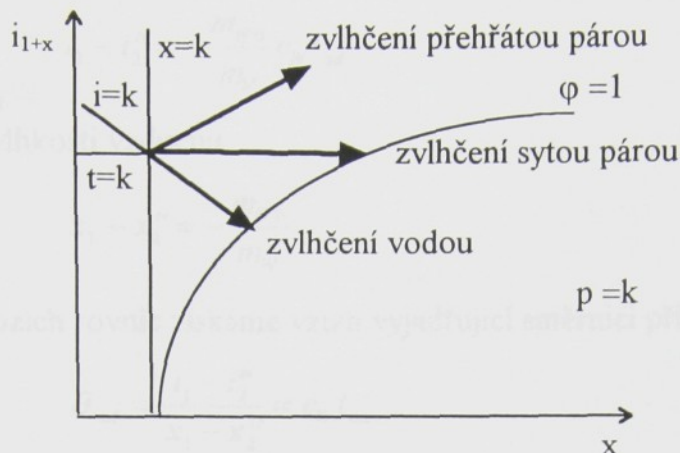
$$\begin{aligned} \dot{m}_{sv}(i_{1+x})_2 &= \dot{m}_{sv}(i_{1+x})_1 + \dot{m}_k i_k, \\ (i_{1+x})_2 - (i_{1+x})_1 &= \Delta i = \frac{\dot{m}_k}{\dot{m}_{sv}} i_k \end{aligned} \quad (13)$$

Podle toho v jaké formě (kapalina, pára) máme dodávanou vlhkost, vyčíslíme hodnotu i_k do rovnice (13). Pomocí změny entalpie a změny měrné vlhkosti najdeme v i - x diagramu nový stav vlhkého vzduchu a z diagramu odečteme výslednou teplotu a relativní vlhkost, obr.4.



Obr.4 Znázornění obecného děje zvlhčení vlhkého vzduchu v Mollierově diagramu.

V Mollierově diagramu je entalpie vstřikované vody nebo páry vyznačena na okrajovém měřítku a určuje směr počáteční změny.



Obr.5 Znáznornění způsobů zvlhčování vlhkého vzduchu v Mollierově diagramu.

4.1 - Adiabatické odpařování

Adiabatické odpařování je takové, při němž je teplo potřebné pro změnu dodáváno vzduchem. Tento jev můžeme idealizovat takto:

Předpokládejme dokonale tepelně izolovanou nádobu v níž je hmotnost vody m_w o teplotě t_w a vzduchu o hmotnosti m_v , o teplotě t_v , entalpii i_v a měrné vlhkosti x_1 . Dále předpokládáme, že nádoba je schopna podle tlaku měnit objem (válec uzavřený pístem), takže děje probíhající v nádobě jsou děje izobarické.

Po určité, dostatečně dlouhé době (po ustálení) se vzduch nasatí parami (m_{w0}) a vzduch i voda budou mít stejné teploty. Za těchto předpokladů je entalpie systému na počátku i na konci děje stejná.

$$m_v i_1 + m_w c_w t_w = m_v i_2'' + (m_w - m_{w0}) c_w t_{w2} \quad (14)$$

Stejná je též celková hmotnost vzduchu a vody (včetně páry) na počátku a na konci děje

$$m_v x_1 + m_w = m_v x_2'' + (m_w - m_{w0}) \quad (15)$$

Teplotu t_w vody můžeme v nádobě volit takovou, aby se při odpařování neměnila, takže všechno teplo pro odpařování dodává vzduch: $t_{w1} = t_{w2} = t_{ad}$. Na základě této rovnosti teplot úpravou rovnic (14) a (15) obdržíme rozdíl entalpií vzduchu vlivem odpařování

$$i_1 - i_2'' = -\frac{m_{w0}}{m_v} c_w t_{ad} \quad (16)$$

a změnu měrné vlhkosti vzduchu

$$x_1 - x_2'' = -\frac{m_{w0}}{m_w} \quad (17)$$

Dělením předchozích rovnic získáme vztah vyjadřující směrnici přímky, na níž je $t_{ad} = \text{konst}$,

$$\vartheta_{ad} = \frac{i_1 - i_2''}{x_1 - x_2''} = c_w t_{ad} \quad (18)$$

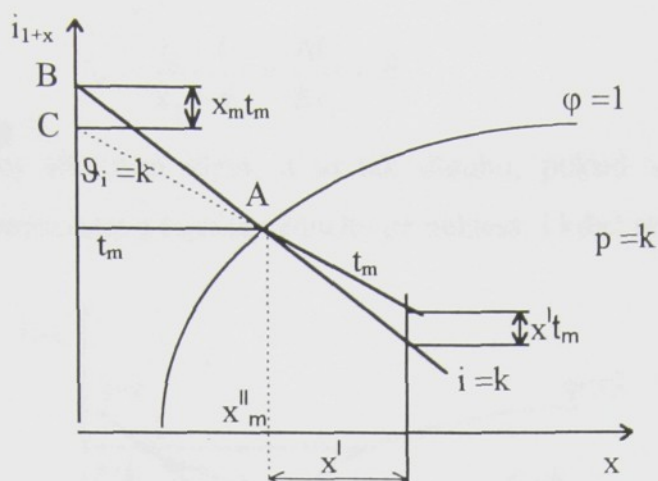
Hodnoty x_2'' , i_2'' a t_{ad} jsou při konstantním celkovém tlaku vzduchu navzájem závislé a velikost jedné z nich určuje hodnoty dvou druhých.

Volíme-li teplotu t_{ad} (a tím též i_2'' a x_2''), můžeme v i - x diagramu znázornit závislost i_1 a x_1 . Z rovnice (18) je zřejmé, že tato závislost je znázorněna přímkou $\vartheta_{ad} = c_w t_{ad}$. Tato přímka má stejný směr jako izotermy pod křivkou sytosti, tj. v oblasti mlhového vzduchu.

Je-li množství vzduchu velké proti odpařované vodě a je-li teplota vody na počátku děje libovolná, bude se teplota vody při odpařování měnit tak dlouho, až dosáhne teploty t_{ad} (teoreticky za nekonečně dlouhou dobu). Teplota t_{ad} se nazývá *teplota mezního adiabatického chlazení*. Je to tudíž teplota, na kterou lze ochladit vodu i vzduch pouhým odpařováním vody.

Při idealizaci tohoto děje nebyly uvažovány poměry při přestupu tepla a přenosu látky a popřípadě sálání, poněvadž byl vlastně uvažován rovnovážný stav, na který uvažované okolnosti nemají vliv.

Přímky ϑ , tj. $t_{ad} = \text{konst}$, nalezneme k různým teplotám t_m tak, že průsečíkem (A) izotermy t_m s křivkou sytosti $\varphi = 1$ vedeme čáru $i = \text{konst}$. Od jejího průsečíku (B) na ose i , ($x = 0$) nanese směrem dolů úsečku odpovídající hodnotě $x_m t_m$ (bod C), jehož spojnice s bodem A (x_m , t_m) je hledaná přímka $\vartheta = \text{konst}$. Přímky ϑ , tj. $t_{ad} = \text{konst}$, nejsou navzájem rovnoběžné, nýbrž se rozbíhají. S nižší teplotou se blíží $i = \text{konst}$ a při $i = 0$ se kryjí. Čáry $\vartheta = \text{konst}$ prodloužené pod $\varphi = 1$ jsou izotermy t_m v mlhové oblasti, obr.6.



Obr.6 Přímky $g = \text{konst.}$

4.2 - Zvlhčování vzduchu vodou

Zásadní pojem ve zvlhčování vzduchu vodou je *teplota mezního adiabatického ochlazení* t_{ad} . Teplota, na kterou se ochladí vzduch odpařováním vody bez přivodu tepla. Je to prakticky mezní teplota ochlazení vzduchu v pračce vzduchu. V diagramu $i-x$ se určí v průsečíku čáry, vycházející z bodu určujícího stav vzduchu ve směru $\delta = c_w t_{ad}$ a křivky nasycení vzduchu.

Uvažujeme případ kdy se veškerá voda přidávaná do vzduchu odpaří. Směr změny stavu vzduchu při vlhčení vodou se pohybuje poměrně v úzkém rozmezí entalpií $i = 0 \div 419$ [kJ/kg]. Voda dodávaná vzduchu se odpařuje teplem vzduchu, který se následkem toho ochlazuje. Úhrnná entalpie vody a vzduchu se však nemění, poněvadž odpařená voda zůstává součástí vlhkého vzduchu. Entalpie samotného vzduchu vzroste pouze o entalpii dodaného množství vody:

$$\dot{m}_w i_w = \dot{m}_1 (i_2 - i_1) \quad (19)$$

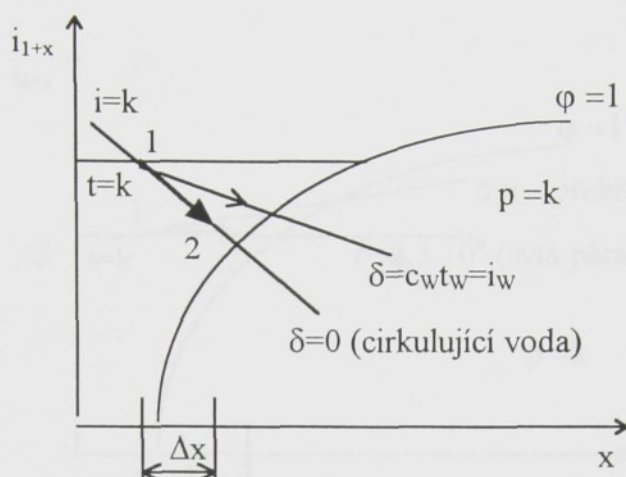
a měrná vlhkost se zvětší o

$$\dot{m}_w = \dot{m}_1 (x_2 - x_1) \quad (20)$$

dělením obou rovnic dostáváme hodnotu potřebné entalpie

$$i_w = \frac{i_2 - i_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta i_1}{\Delta x_1} = \delta \quad (21)$$

Teplota vzduchu vlhčením klesá, a to tak dlouho, pokud vzduch přijímá vlhkost. Po dosažení nasyceného stavu teplota vzduchu již neklesá, i když se voda dále přivádí.



Obr.7 Zvlhčování vlhkého vzduchu cirkulující vodou v Mollierově diagramu.

4.3 - Zvlhčování vzduchu párou

Zvlhčování vzduchu párou se liší od zvlhčování vodou odlišným směrem změny. Vzduch sycený vodou se vždy ochlazuje bez ohledu na teplotu vody, kdežto při míšení párou se může teplota vzduchu i zvyšovat. Směr změny je dán entalpií přiváděné páry stejně jako u vody. Entalpie vzduchu se zvětší o hodnotu

$$\dot{m}_p i_p = \dot{m}_1 (i_2 - i_1) \quad (22)$$

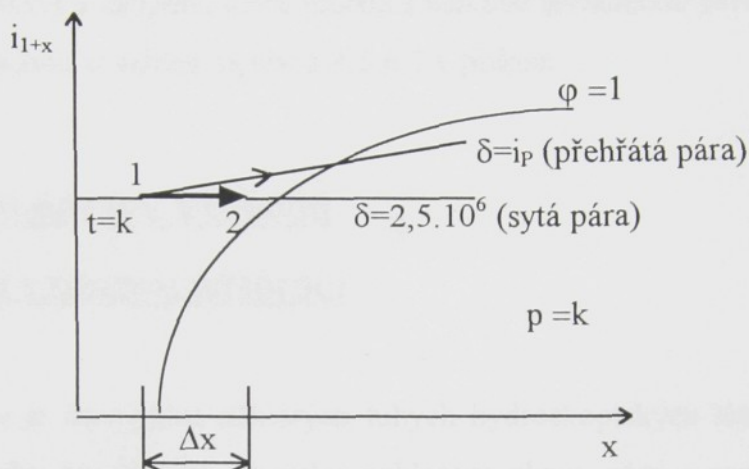
a měrná vlhkost se zvětší o

$$\dot{m}_p = \dot{m}_1 (x_2 - x_1) \quad (23)$$

a hodnota potřebné entalpie

$$i_P = \frac{i_2 - i_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta i_1}{\Delta x_1} = \delta \quad (24)$$

Stav po smíšení vzduchu o stavu 1 (x_1 , t_1) leží ve směru i_P (daném okrajovým měřítkem) a množstvím páry $\Delta x = m_p/m_1 = x_2 - x_1$ obr.8.



Obr.8 Zvlhčování vlhkého vzduchu párou v Mollierově diagramu.

Privádíme-li do vzduchu přehřátou páru, může nastat zmlžení vzduchu, protíná-li směšovací přímka mez sytosti. Podle směru změny může po zmlžení vzduchu přehřátou párou nastat opět odmlžení, privádíme-li dále páru v takovém množství, aby směšovací přímka opět překročila křivku sytosti $\phi = 1$. Speciálním případem je směšování vzduchu se sytou párou. Entalpie syté páry za atmosférického tlaku je $i = 2,5 \cdot 10^6$ [J/kg]. Za normálních atmosférických podmínek vzduchu (teploty do 35 °C) může být míšení vzduchu se sytou párou provázeno tvořením mlhového vzduchu. Kterému se nesprávně říká pára.

4.4 - Schémata zvlhčovacích zařízení

Zařízení pro vlhčení vzduchu jsou neodmyslitelnou součástí většiny klimatizačních zařízení. Zvlhčovací zařízení lze podle tepelného pochodu rozdělit do dvou skupin:

- zařízení odpařovací,
- zařízení pro zvlhčování párou.

Ke zvlhčovacím zařízením odpařovacím patří sprchové pračky vzduchu, blánové pračky vzduchu, rozprašovací zařízení mechanická a rozprašovací zařízení pneumatická. Parní zvlhčovací zařízení lze rozdělit do dvou skupin: pára vyráběná v místě zvlhčování (nejčastěji elektricky) a zařízení, které pracují s dálkově přiváděnou párou.

Schémata jsou uvedena na obr.3,4,5,6,7 v příloze.

5. - Speciální úpravy vzduchu

5.1 - Úprava vzduchu adsorpcí

Adsorpce je schopnost některých tuhých hygroskopických látek následkem svého značného vnitřního kapilárního povrchu pohlcovat plyny, páry a prachové částice, které jsou v nich obsaženy. Tato schopnost je značná, zejména pro vodní páru. Je to jev kapilární, při kterém vlhkost ze vzduchu kondenzuje na povrchu a kapilárními silami je vtahována dovnitř látky. Když se látka naplní vodou, nastane rovnováha vnitřních sil s tlakem páry. Za nezměněných podmínek další adsorpce nenastane.

Při adsorpci probíhá difúze adsorbované látky do tuhého tělesa, kapilární kondenzace a chemické reakce (chemisorpce). Proto se také pohlcování plynů, par a rozpuštěných látek často považuje za obecný pochod sorpce.

Množství (vody) plynů, které může být pohlceno, závisí na teplotě adsorpční látky a na relativní vlhkosti a teplotě vzduchu. Stoupne-li teplota látky nebo poklesne-li relativní vlhkost, je voda puze na zase ven.

Sušení vzduchu adsorpčními látkami se také nazývá dehydrace nebo vysokotlaké sušení, jehož hlavní funkcí je odstranit vlhkost ze vzduchu bez jeho podchlazení. Tím se liší od povrchové a sprchové kondenzace, jako tomu je při sušení s podchlazováním u povrchového chladiče nebo ve sprchové komoře.

Adsorbér nebo dehydrátor je konvektor, ve kterém se latentní teplo pak ve vzduchu mění při kondenzaci v citelné teplo. Tím je teplota vystupujícího vzduchu z adsorbéru vždy

vyšší než teplota vstupující. Teplota bude tím vyšší, čím více vodní páry vzduch v adsorbéru zanechá.

V praxi se jako adsorbéru používá ponejvíce silikagelu chemické značky SiO_2 a aktivovaného hliníku. Pohlcování vodních par silikagelem o malé pórovitosti probíhá při obvyklých teplotách takovou intenzitou, že jednoduché proběhnutí vlhkého vzduchu sušícím zařízením působí až 100 % vysušení. Výrobci SiO_2 udávají, že je možno získat rosný bod $t_r = -40^\circ\text{C}$, aniž je adsorpční schopnost ohrožena.

Nasycený silikagel je možno jednoduše regenerovat a po vysušení a ochlazení je dále schopný k používání. Desorpce nebo regenerace se děje bez změny tvaru a hmotných ztrát. Odpor vzduchu při průchodu sušícím zařízením zůstává stále stejný, lhostejno zdali je silikagel v suchém nebo vlhkém stavu. Silikagel je chemicky inertní, t.j. nepůsobí rušivým vlivem na součástky sušícího zařízení, je naprosto nehořlavý a vzdoruje vyšším teplotám.

Výlohy spojené s vysoušením jsou poměrně nízké a omezují se pouze na překonávání odporu vzduchu při průtoku sušícím zařízením a na regeneraci vlhkého silikagelu.

Další adsorpční látky jsou:

a) Silikagel s malou pórovitostí.

Použitelný pro sušení průmyslových plynů, jako vzduchu, vodíku, kyslíku, svítiplynu, kysličníku uhličitého, chloru a pod.

b) Silikagel s velkou pórovitostí.

Použitelný pro vysoušení organických roztoků a pro základní hmotu katalyzátorů a pro farmaceutické účely.

c) Modrý silikagel.

Odpovídá silikagelu s malými póry a je ukazatelem vlhkosti. Ve stavu suchém je modrý a vlhkém růžový.

d) Práškový silikagel.

Používá se ho pro sušení vzduchu kontinuálním způsobem v neustálém oběhu.

Silikagel je čistý a prakticky bez zápachu a chuti, nehořlavý, vzdoruje kyselinám

a alkáliím (s výjimkou kyseliny fluorovodíkové a silně koncentrovaných alkalických louhů), vzdoruje mechanickému opotřebení, je naprosto netečný k teplotě, teprve při teplotě 600 - 700 °C se porušuje pórovitá struktura.

e) Aktivovaný kysličník hlinitý.

Pohlčení vodní páry je u aktivovaného kysličníku hlinitého menší než u silikagelu, ale zato je možno s ním dosáhnout nižšího rosného bodu nebo většího vysušení vzduchu podle tlakových poměrů.

Schéma zařízení na úpravu vzduchu adsorpcí je uvedeno na obr.8 v příloze.

5.2 - Úprava vzduchu absorpcí

Některé soli rozpuštěné ve vodě mají tu vlastnost, že snižují napětí par nad hladinou roztoku, a to tím více, čím větší je jejich koncentrace a čím nižší je teplota. Takové roztoky způsobují, že pára obsažená ve vzduchu kondenzuje i tehdy, když je teplota vzduchu nad roztokem mnohem vyšší než odpovídající rosný bod (dle teploty roztoku).

$$p''_{\text{prost}} < p''_{\text{pvoda}}$$

Při styku vzduchu s vodní sprchou nebo povrchem hydroskopického roztoku je tlak vodní páry v mezní vrstvě nebo na vzduchovém filmu stejný jako tlak na hladině. Podle toho nemůže být vzduch při styku s takovou roztokovou sprchou syčen jako při styku s čistou vodou. Má proto podle tlaku páry nad roztokem menší vodní obsah. Jinými slovy: při styku vzduchu s absorpčními roztoky nastává sprchová kondenzace vodní páry se vzduchem při mnohem vyšších teplotách, než je rosný bod.

Při vyšší rychlosti v je sušení vzduchu intenzivnější, stejně tak je tomu při vlhčení následkem větší výměny vzduchu na vodní kapičce.

Jako absorpčních roztoků se například používá chloridu lithia, vápníku, hořčíku, sodíku a jiných solí.

Chloridu lithia se používá jako roztoku s přidavkem antikorozivních stabilizátorů, takže nepůsobí korozivně na černý plech. Jeho příznivé tlakové poměry umožňují při

normální teplotě roztoku vysušit vzduch až na vodní obsah $x = 2 \text{ g/kg}$, což odpovídá při teplotě $t_v = 25 \text{ °C}$ relativní vlhkosti $\phi_v = 10 \text{ %}$ nebo vodnímu obsahu vzduchu při rosném bodě $t_r = -7,5 \text{ °C}$. Cena soli je vysoká, ale při provozu se sůl nespotřebuje a zůstává stálá. Nebezpečí krystalizace v rozsahu teplot použitých v klimatechnice není. Normálně použitá 44,5 procentní koncentrace začíná krystalizovat úplně nepatrně teprve při podchlazení roztoku pod $t_w = t_{\text{rozt}} = -19 \text{ °C}$. Roztok o 35 procentní koncentraci začíná krystalizovat teprve při teplotě $t_{\text{rozt}} = -26 \text{ °C}$.

V tab.1 je udána dosažitelná relativní vlhkost vzduchu nad roztokem z chloridu lithia podle koncentrace a teplotě $t_{\text{rozt}} = 18 \text{ °C}$.

Roztok chloridu lithia na 100 g	Relativní vlhkost vzduchu ϕ při teplotě $t = 18 \text{ °C}$
5	95
10	89
15	80
20	67
25	54
30	41
35	28
40	19

Tab.1 Relativní vlhkost vzduchu ϕ v % nad roztokem chloridu lithia podle koncentrace při teplotě $t = 18 \text{ °C}$.

Pro sušení vzduchu je třeba znát tlak páry nad syceným roztokem v poměru k čisté vodě. Tlakové poměry roztoku a vody, jakož i procentuální porovnání roztoku k vodě udává tab.2.

Teplota [°C]	Napětí páry p''_p nad roztokem chloridu lithia [mm Hg]	Napětí tlaku vodní páry p''_p [mm Hg]	Procentuální podíl roztoku chloridu lithia ve vodě [%]
10	1	9	11
20	2	17,5	11,5
30	4	31,8	12,7
40	6	55,3	11
50	10	92,5	11

Tab.2 Napětí páry nad nasyceným roztokem chloridu lithia v poměru k vodě.

Roztoky se rozstříkují v pračce, takže přichází vzduch do styku se sprchou nebo se sprchují plochy a těsně kolem nich proudí vzduch. Pro sušení vzduchu stačí úplně nepatrná doba, která je mnohem kratší než při vlhčení vzduchu s vodou v pračce.

Schéma zařízení na úpravu vzduchu absorpcí je uvedeno na obr.9 v příloze.

6. - Základní vztahy analytického řešení přenosu tepla a hmoty při zvlhčování a odvlhčování vzduchu

Pochod zvlhčování a odvlhčování můžeme nazvat též pochodem vypařování a kondenzování vody ze vzduchu a opačně. Tento proces je poměrně složitý a jeho důsledkem je změna stavu vlhkého vzduchu. Množství odpařené (zkondenzované) vody se určuje podle *Daltonova vztahu*:

$$M = \beta_p (p''_{D1} - p_{D2}) \frac{P}{P - p''_{D1}} \cdot S \quad (25)$$

nebo

$$M = \beta_c (p''_{D1} - p_{D2}) \frac{P}{P - p''_{D1}} \cdot S \quad (26)$$

Člen $p/(p-p_{D1})$ představuje korekci na jednostrannou difúzi a při nízkých vlhkostech vzduchu se zanedbává.

Při praktických výpočtech ve vzduchotechnice se nejčastěji používá vztahu:

$$M = \beta_x (x_1'' - x_2) \cdot S \tag{27}$$

Obecné kritériální vztahy:

Podobně jako u přestupu tepla konvencí se při přenosu hmoty vyjadřují kvantitativní závislosti nejčastěji pomocí kritériálních rovnic. V obecném vyjádření mají tyto rovnice tvar:

- pro volné proudění:

$$Sh = f_1(Ar, Sc) \tag{28}$$

- pro nucené proudění:

$$Sh = f_2(Re, Sc, Gu, \Theta) \tag{29}$$

Součinitel difúze vodních par do vzduchu D_c se určí ze vztahu:

$$D_c = \frac{2,194}{p} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,8} \tag{30}$$

Hodnoty $D_c \cdot 10^5$ jsou v tab.3.

p [kPa]	Teplota [°C]									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
97,9	2,236	2,391	2,547	2,702	2,874	3,030	3,209	3,381	3,563	3,741
99,3	2,209	2,363	2,517	2,669	2,839	2,994	3,171	3,341	3,520	3,696
101,3	2,166	2,316	2,467	2,616	2,783	2,935	3,108	3,275	3,450	3,623

Tab.3 Hodnoty $D_c \cdot 10^5$ pro tlaky vzduchu 97,9, 99,3, 101,3 [kPa].

Přestup tepla konvekčí a přenos hmoty z rovinného povrchu:

- pro volné proudění ($Ar.Pr, resp. Ar.Sc=3 \cdot 10^6$ až $2 \cdot 10^8$):

$$Nu = 5(Ar \cdot Pr)^{0,104} \tag{31}$$

$$Sh = 0,66(Ar \cdot Sc)^{0,25} \tag{32}$$

Pro teplotu 20 °C a při zanedbání vlivu obsahu páry ve vzduchu na měrnou hmotnost mají vztahy tvar (tok tepla směrem nahoru)

- pro rozsah $l^3 \Delta t = 0,03$ až 2:

$$\alpha_k = 0,9 \Delta t^{0,104} l^{-0,688}$$

- pro rozsah $l^3 \Delta t = 0,033$ až 2:

$$\beta_p = 15,2 \cdot 10^{-9} \Delta t^{0,26} l^{-0,22}$$

Rovnice neobsahují Gu ani Θ , protože teplotní podmínky jsou dostatečně respektovány kritériem Ar .

- pro nucené proudění:

$$Nu = A \cdot Re^n Pr^{0,33} Gu^{0,175} \Theta^2 \quad (33)$$

$$Sh = B \cdot Re^m Sc^{0,33} Gu^{0,135} \Theta^2 \quad (34)$$

kde hodnoty A , B , m , n jsou uvedeny v tab.4.

Re	A	B	m	n
$3,15 \cdot 10^3 - 2,2 \cdot 10^4$	0,51	0,49	0,61	0,61
$2,2 \cdot 10^4 - 3,15 \cdot 10^5$	0,027	0,0248	0,90	0,90

Tab.4 Hodnoty součinitelů A , B , m , n .

Pro praktické výpočty se často používají různé empirické vzorce, jako např. $\beta_x = 25 + 19w$ [$\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$], a výpočet se provádí podle vztahu (27).

Přestup tepla a přenos hmoty z kapek nebo těles s mokrým povrchem obtékaným vzduchem (pro $Re = 1$ až 220)

$$Nu = 2 + 1,07 Re^{0,48} Pr^{0,33} Gu^{0,175} \quad (35)$$

$$Sh = 2 + 0,85 Re^{0,52} Sc^{0,33} Gu^{0,135} \quad (36)$$

Číslo 2 v těchto rovnicích představuje mezní hodnotu pro $Re=0$. Charakteristický rozměr je zde průměr obtékaného tělesa (kapky).

Lewisův vztah

Praktickými měřeními bylo prokázáno, že pro výpočet pochodů přestupu tepla

a přenosu hmoty v rozsahu teplot a parciálních tlaků, přicházejících v klimatizaci v úvahu, lze bez velké chyby použít zjednodušené analogie mezi přestupem tepla a přenosem hmoty. Nejčastěji se používá přímo tzv. *Lewisova vztahu*:

$$\frac{\alpha_k}{\beta_x} = c \tag{37}$$

kde $c=c_L+c_D$.x je měrné teplo vlhkého vzduchu.

Pomocí tohoto vztahu lze provádět výpočty přenosu hmoty, je-li znám součinitel přestupu tepla konvekcí. Je-li znám celkový součinitel přestupu tepla α , je nutno od něj odečíst součinitel přestupu tepla sáláním α_R . Ten má při nízkých rychlostech proudění poměrně značnou hodnotu, a to průměrně:

Proudění vzduchu na hladině α_R	Volné proudění $1,5\alpha_k$	Rychlost nuceného proudění [m.s ⁻¹]			
		1	2	3	4
		0,6 α_k	0,35 α_k	0,25 α_k	0,16 α_k

Tab.5 Hodnoty součinitele přestupu tepla konvekcí α_k .

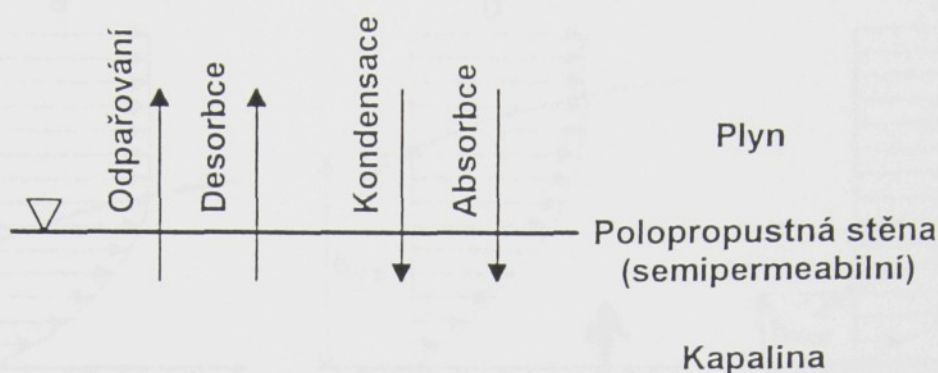
7. - Experimentální určení přenosu tepla a hmoty

7.1 - Přenos tepla a hmoty při jednostranné difuzi

Uvažujeme případ polopropustné stěny obr.9 (semipermeabilní) např. povrch kapaliny, kterou mohou procházet jen molekuly kapaliny do prostoru okolního vzduchu. Kapalina se odpařuje nebo v kapalině rozpuštěná komponenta desorbuje. V obou případech směřuje difúzní proud z kapaliny do vzduchu.

Jestliže směřuje difúzní tok opačným směrem, ze vzduchu do kapaliny, dochází ke kondenzaci příp. absorpci.

Vliv směru difúzního proudu na průběh rychlostí v mezní vrstvě je patrný z obr.10.



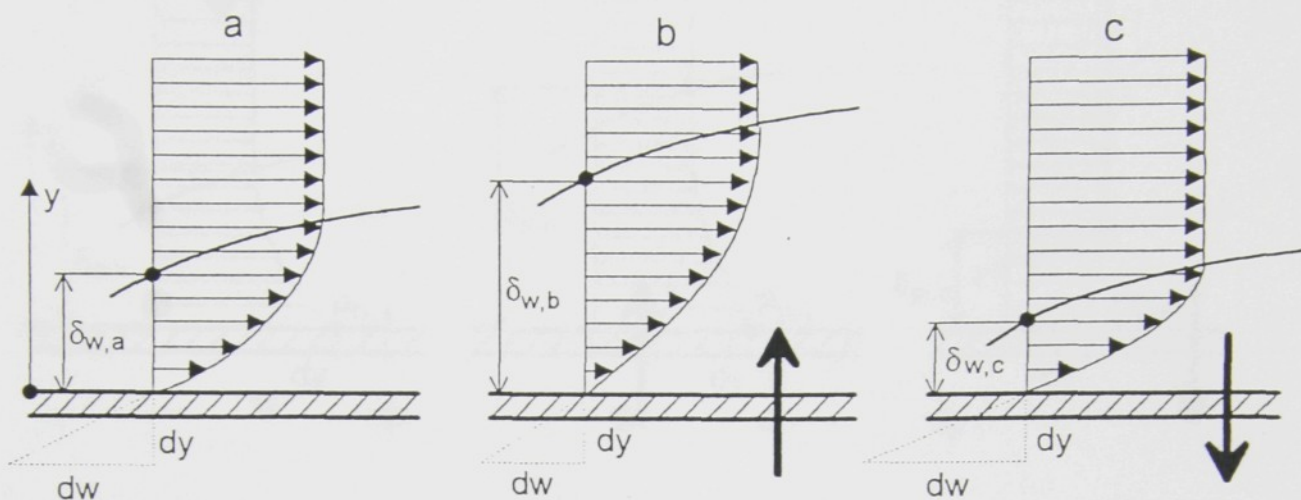
Obr.9 Případy jednostranné difuze.

V případě a , kdy nedochází k difúzi, není průběh rychlostí v mezní vrstvě ovlivněn difúzním proudem a tloušťka mezní vrstvy je $\delta_{w,a}$ a rychlostní gradient $(dw/dy)_{w,a}$.

V případě b , kdy dochází k odpařování příp. desorpci jsou v bezprostřední blízkosti hranice fází podstatně menší rychlosti ve srovnání s případem a . V důsledku toho, za jinak stejných podmínek, je tloušťka mezní vrstvy větší $\delta_{w,b} > \delta_{w,a}$ a rychlostní gradient na hranici fází je menší, $(dw/dy)_{w,b} < (dw/dy)_{w,a}$.

Vzhledem k tomu, že rychlostní gradient je rozhodující pro hydraulické ztráty jsou v tomto případě hydraulické ztráty menší než v případě a .

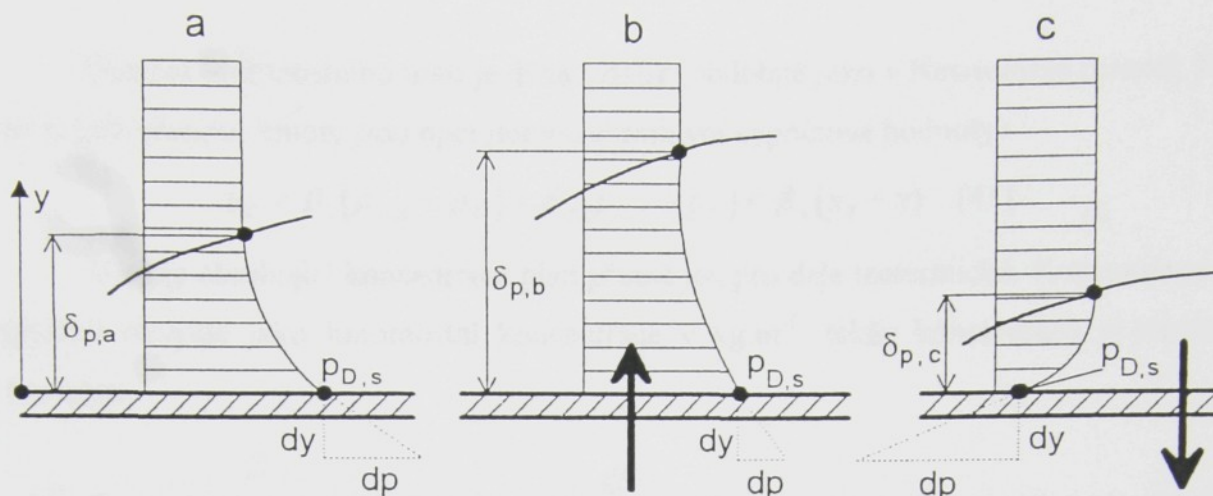
V případě c , kdy dochází ke kondenzaci příp. absorpci jsou v bezprostřední blízkosti hranice fází podstatně vyšší rychlosti než v případě a . V důsledku toho, za jinak stejných podmínek, je tloušťka mezní vrstvy menší $\delta_{w,c} < \delta_{w,a}$ a rychlostní gradient na hranici fází je větší $(dw/dy)_{w,c} > (dw/dy)_{w,a}$. V důsledku toho jsou hydraulické ztráty větší než v případě a .



Obr.10 Vliv jednostranné difuze na tloušťku mezní vrstvy a rychlostní gradient.

Vliv směru difúzního toku na průběh tlaků v mezní vrstvě je patrný z obr.11. Tloušťka mezní vrstvy $\delta_{p,a}$ pro případ oboustranné difúze je menší než při kondenzaci, případně absorpci $\delta_{p,b}$, pro případ odpařování desorbci je $\delta_{p,c}$ menší. Totéž platí pro tlakové gradienty.

Vzhledem k průběhu rychlostí a tlaků příp. desorbci, se přenos hmoty sníží, při kondenzaci příp. absorpci se přenos tepla zvýší ve srovnání s oboustrannou difúzí.



Obr.11 Vliv jednostranné difuze na tloušťku mezní vrstvy a tlakový gradient.

Vliv toku tekutiny kolmo k hranici fází na vnější proudění (rychlosti, tlaky, teploty) je pro jednoduché případy (zpravidla podélné obtékání desky) uveden literatuře.

7.2 Analogie přenosu tepla a hmoty

Přenos tepla kondukcí pro stacionární děj je dán rovnicí Fourierovou

$$\dot{q} = -\lambda \left(\frac{dt}{dn} \right)_p \quad (38)$$

Přenos tepla konvekcí je dán rovnicí Newtonovou (složitost výpočtu tepla se přenáší na součinitele přenosu tepla, který je pomocnou výpočtovou smluvní hodnotou a není fyzikální konstantou).

$$\dot{q} = \alpha (t_s - t_\infty) \quad (39)$$

Přenos hmoty při oboustranné difúzi je dán prvním Fickovým zákonem

$$\dot{m}_D = -D_c \left(\frac{d\rho_D}{dn} \right)_p = -D_p \left(\frac{dp}{dn} \right)_p \quad (40)$$

který pro jednostrannou difuzi přechází na Stefanův vztah.

Hustota hmotnostního toku je dána vztahy (obdobně jako v Newtonově rovnici, kde součinitelé přenosu hmoty jsou opět pomocné smluvní výpočtové hodnoty).

$$\dot{m}_D = \beta_c(\rho_{D,S} - \rho_D) = \beta_p(p_{D,S} - p_D) = \beta_x(x_S - x) \quad (41)$$

Vztahy obsahující koncentrace platí přesně jen pro děje izotermické. Koncentrace se vyjadřují obvykle jako hmotnostní koncentrace v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, takže koncentrace je totožná s hustotou.

Z uvedených vztahů (41) je možno odvodit převodní vztahy mezi jednotlivými součiniteli přenosu hmoty:

$$\beta_p = \frac{\beta_c}{r_D \bar{T}} \quad (42a)$$

$$\beta_x = \beta_c \frac{p}{r_D \bar{T}} \quad (42b)$$

$$\beta_x = \beta_p p \frac{r_D}{r_L} \quad (42c)$$

V případě, že děj není izotermický dosazujeme střední teplotu

$$\bar{T} = \frac{T_S + T_\infty}{2}$$

Z analogie mezi přenosem tepla a hmoty vyplývá, že i případ přenosu hmoty příp. současného přenosu tepla a hmoty do stabilizovaného proudu plynu je možno vyjádřit analogickými funkčními závislostmi bezrozměrných kritérií.

Pro přenos tepla

$$Nu = \frac{\alpha d_{CH}}{\lambda} = \frac{d_{CH}}{t_S - t_\infty} \left(\frac{dt}{dn} \right)_p = f(\text{Re}, \text{Pr}) \quad (43)$$

Pro přenos hmoty

$$Sh = \frac{\beta_c d_{CH}}{D_c} = \frac{d_{CH}}{p_{D,S} - p_{D,\infty}} \left(\frac{dp_D}{dn} \right)_p = f(\text{Re}, \text{Sc}) \quad (44)$$

Uvedené funkční závislosti se zpravidla vyjadřují v mocninovém tvaru

$$Nu = C_{\alpha} Re^m Pr^n \quad (45)$$

$$Sh = C_{\beta} Re^m Sc^n \quad (46)$$

7.2.1 Určení poměru mezi součinitelem přenosu tepla a hmoty

Případ $a = D_c$

Pro tento případ je $Pr = Sc$ a ze vztahů (45) a (46) dostáváme

$$\frac{Nu}{Sh} = 1 \quad (47)$$

a tedy

$$\frac{\alpha}{\beta_c} = \frac{\lambda}{D_c} \quad (48)$$

Poměr a/D_c je označován jako *Lewisovo číslo*

$$Le = \frac{a}{D_c} \quad (49)$$

kteří charakterisuje podobnost fyzikálních vlastností tekutiny pro vedení tepla a difuzi.

Dosazením za součinitele tepelné vodivosti do vztahu (48)

$$\lambda = a \bar{c}_p \rho$$

dostáváme *Lewisův vztah*

$$\frac{\alpha}{\beta_c} = \bar{c}_p \rho \quad (50)$$

Případ $a \neq D_c$ a nízké parciální tlaky par p_D

Pro směs vodní páry a vzduch platí vztahy (49) a (50) jen přibližně, neboť hodnoty a , D_c se liší, jak je patrné z tab.6.

Teplota t [°C]	$a \cdot 10^5$ [m ² ·s ⁻¹]	$D_c \cdot 10^5$ [m ² ·s ⁻¹]	$Le=a/D_c$ [-]
20	2,08	2,55	0,8156
50	2,55	2,98	0,8557
100	3,33	3,86	0,8627

Tab.6 Hodnoty součinitele teplotní vodivosti α a součinitele difuze D_c v závislosti na teplotě pro tlak $p=0,98 \cdot 10^5$ Pa.

Ze vztahů (45) a (46) dostáváme

$$\frac{Nu}{Sh} = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^n \quad (51)$$

a dále po dosazení a úpravě

$$\begin{aligned} \frac{\alpha}{\beta_c} &= \frac{\lambda}{D_c} \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^n = \frac{a \bar{c}_p \rho}{D_c} \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^n = \\ &= \rho \bar{c}_p \left(\frac{a}{D_c} \right)^{1-n} = \rho \bar{c}_p Le^{1-n} \end{aligned} \quad (52)$$

Případ $a \neq D_c$ a vyšší parciální tlaky par p_D

Pro přenos tepla platí

$$\dot{q} = \alpha(t_s - t_\infty) = \frac{\lambda}{\delta_{m,v}}(t_s - t_\infty)$$

Součinitel přenosu tepla je dán vztahem

$$\alpha = \frac{\lambda}{\delta_{m,v}} \quad (53)$$

Pro přenos hmoty pro jednostrannou difuzi platí

$$\dot{m}_D = \frac{\beta_c}{r_D T} (p_{D,S} - p_{D,\infty}) = \frac{1}{r_D T} \frac{D_c}{\delta_{m,v}} \frac{p}{p - \bar{p}_D} (p_{D,S} - p_{D,\infty})$$

Součinitel přenosu hmoty je dán vztahem

$$\beta_c = \frac{D_c}{\delta_{m,v}} \frac{p}{p - \bar{p}_D} \quad (54)$$

Porovnáním vztahů (53) a (54) je patrné, že difuze neprobíhá zcela analogicky k přenosu tepla. Ze vztahů (45) a (46) dostáváme po úpravě

$$\begin{aligned} \frac{\alpha}{\beta_c} &= \frac{\lambda}{D_c} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Sc}} \right)^n \frac{p - \bar{p}_D}{p} = \frac{\alpha \bar{c}_p \rho}{D_c} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Sc}} \right)^n \frac{p - \bar{p}_D}{p} = \\ &= \left(\frac{a}{D_c} \right)^{1-n} \rho \bar{c}_p \frac{p - \bar{p}_D}{p} = \rho \bar{c}_p Le^{1-n} \frac{p - \bar{p}_D}{p} \end{aligned} \quad (55a)$$

Poznámka:

Hodnota p_D bývá často nahrazována hodnotou $p_{D,s}$, zejména v anglosaské literatuře. Obdobně můžeme vyjádřit poměr α/β_p , dosadíme-li za hodnoty λ a D_p

$$\lambda = \frac{\nu \rho c}{\text{Pr}}; D_p = \frac{\nu}{\text{Sc} r_D T}$$

dostaneme

$$\begin{aligned} \frac{\alpha}{\beta_p} &= \frac{\lambda}{D_p} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Sc}} \right)^n \frac{p - \bar{p}_D}{p} = \rho_L c_L r_D \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Sc}} \right)^{n-1} \frac{p - \bar{p}_D}{p} = \\ &= \rho_L c_L r_D Le^{n-1} \frac{p - \bar{p}_D}{p} \end{aligned} \quad (55b)$$

příp. poměr α/β_x

$$\begin{aligned} \frac{\alpha}{\beta_x} &= \frac{r_L T}{p - p_D} \rho c Le^{1-n} = \frac{\rho_L + \rho_D}{\rho_L} \frac{c_L + c_D x}{1 + x} Le^{1-n} = \\ &= (c_L + x c_D) Le^{1-n} \end{aligned} \quad (55c)$$

Hodnota exponentu (1-n) je uvedena v tab.7.

n	Procesy
0	pro děj probíhající v klidném prostředí,
1/3	pro procesy v laminárních mezních vrstvách nebo náběhové procesy při laminárním proudění,
0,42	pro procesy při turbulentním proudění,
1/2	pro procesy při proudění bez tření,
1	pro případ dokonalého vyrovnání stavů (vzduch - obtékaný povrch) a procesy při dokonalé turbulenci (teoretický případ)

Tab.7 Hodnoty exponentů Lewisova čísla pro různé druhy proudění.

Při intenzivním odpařování kapaliny z fázového rozhraní do proudícího vzduchu je v důsledku výrazného příčného toku páry zaváděna oprava Lewisova vztahu korekčním faktorem K_K (Stefanova korekce Lewisova vztahu v důsledku jednostranné difuze).

$$L_K = K_K L \tag{56}$$

kterou pro binární systém kapalina - plyn určíme ze vztahu

$$K_K = \frac{\pm Le^{-1} \frac{(x_s - x_\infty)}{(x_s + 1)(x_\infty + 1)}}{1 - \left(\frac{x_s + 1}{x_\infty + 1} \right)^{\pm Le^{-1}}} \tag{57a}$$

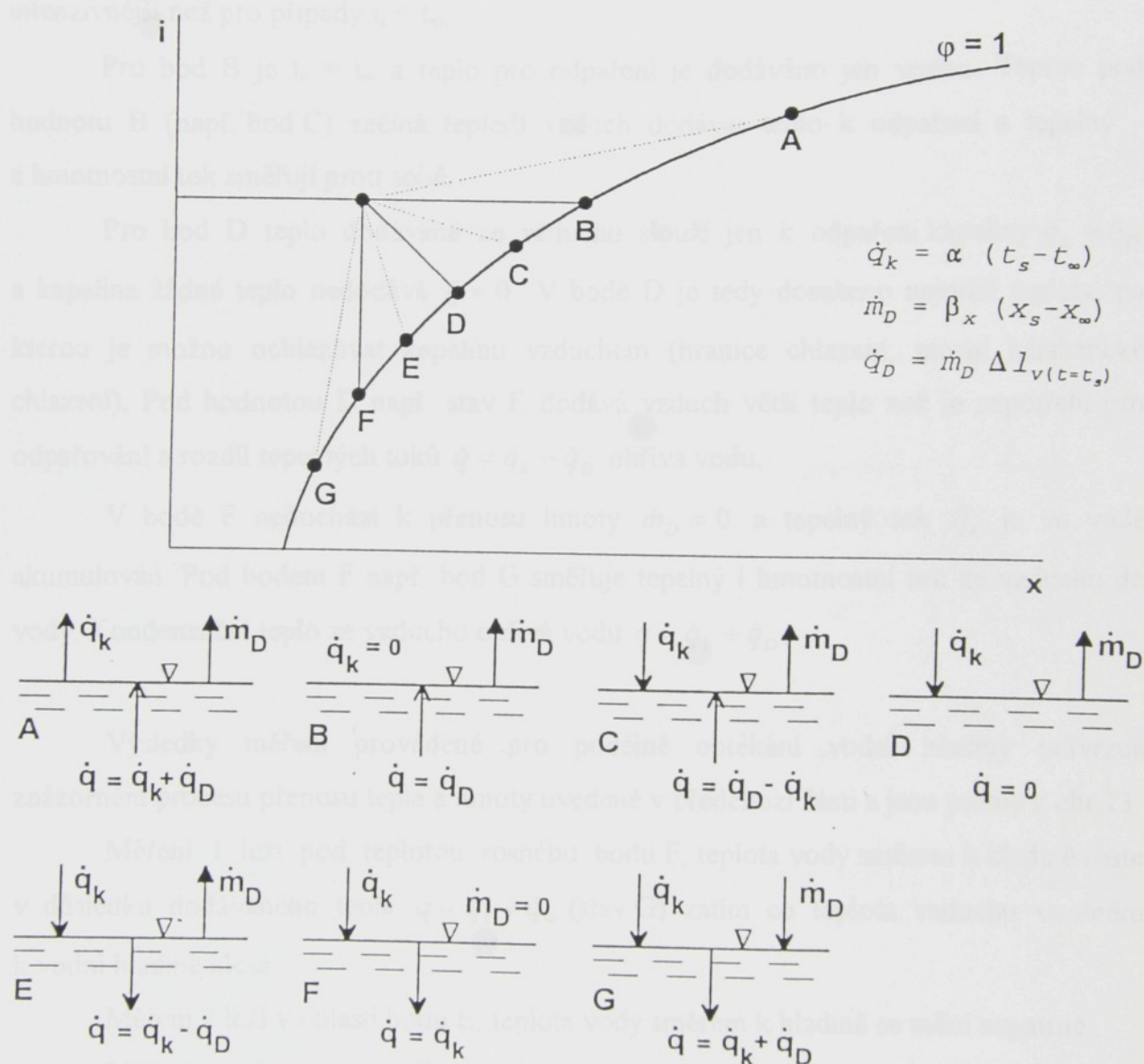
kde kladné znaménko určuje přenosové jevy při $t_s > t_\infty$ t.j. odpařování se současným ohřevem plynu, záporné znaménko t.j. při $t_s < t_\infty$ odpařování se současným ochlazováním plynu.

Nebo korekce

$$K_K = \frac{\frac{0,622 + x_s}{0,622 + x_\infty} - 1}{\ln \frac{0,622 + x_s}{0,622 + x_\infty}} \tag{57b}$$

7.3 Znázornění přenosu tepla a hmoty v Mollierově diagramu

Znázornění procesu přenosu tepla a hmoty pro zjednodušený případ, že se stav vzduchu proudícího nad mokrým povrchem (voda) nemění (předpoklad nekonečně velkého množství vzduchu) je patrné z obr.12. Stav vzduchu je dán teplotou t_∞ , tlakem p a vlhkostí x_∞ , stav mokrého povrchu vlhkostí x_s určené pro teplotu mokrého povrchu t_s .



Obr.12 Proces přenosu tepla a hmoty pro konstantní stav vzduchu a proměnné hodnoty stavů mokrého povrchu.

Rovnice $\dot{m}_D = \beta_x(x_s - x_\infty)$ vychází z Daltonova zákona odpařování, který první experimentálně dokázal, že hmotnost odpařené tekutiny je úměrná rozdílu parciálních tlaků vlhkého povrchu a vzduchu proudícího nad povrchem v dostatečné vzdálenosti nad mezní vrstvou.

Pro bod A, kde teplota mokrého povrchu t_s je větší než teplota vzduchu t_∞ , přechází teplo $\dot{q} = \dot{q}_k + \dot{q}_D$ z mokrého povrchu do vzduchu a kapalina se odpařuje. Přenos tepla je intenzivnější než pro případy $t_s < t_\infty$.

Pro bod B je $t_s = t_\infty$ a teplo pro odpaření je dodáváno jen vodou. Teprve pod hodnotu B (např. bod C) začíná teplejší vzduch dodávat teplo k odpaření a tepelný a hmotnostní tok směřují proti sobě.

Pro bod D teplo dodávané ze vzduchu slouží jen k odpaření kapaliny $\dot{q}_k = \dot{q}_D$ a kapalina žádné teplo nedodává $\dot{q} = 0$. V bodě D je tedy dosaženo nejnižší teploty, na kterou je možno ochlazovat kapalinu vzduchem (hranice chlazení; mezní adiabatické chlazení). Pod hodnotou D např. stav E dodává vzduch větší teplo než je zapotřebí pro odpařování a rozdíl tepelných toků $\dot{q} = \dot{q}_k - \dot{q}_D$ ohřívá vodu.

V bodě F nedochází k přenosu hmoty $\dot{m}_D = 0$ a tepelný tok $\dot{q}_k$ je ve vodě akumulován. Pod bodem F např. bod G směřuje tepelný i hmotnostní tok ze vzduchu do vody. Kondenzační teplo ze vzduchu ohřívá vodu $\dot{q} = \dot{q}_k + \dot{q}_D$.

Výsledky měření prováděné pro podélné obtékání vodní hladiny potvrzují znázornění procesu přenosu tepla a hmoty uvedené v předchozí části a jsou patrné z obr. 13.

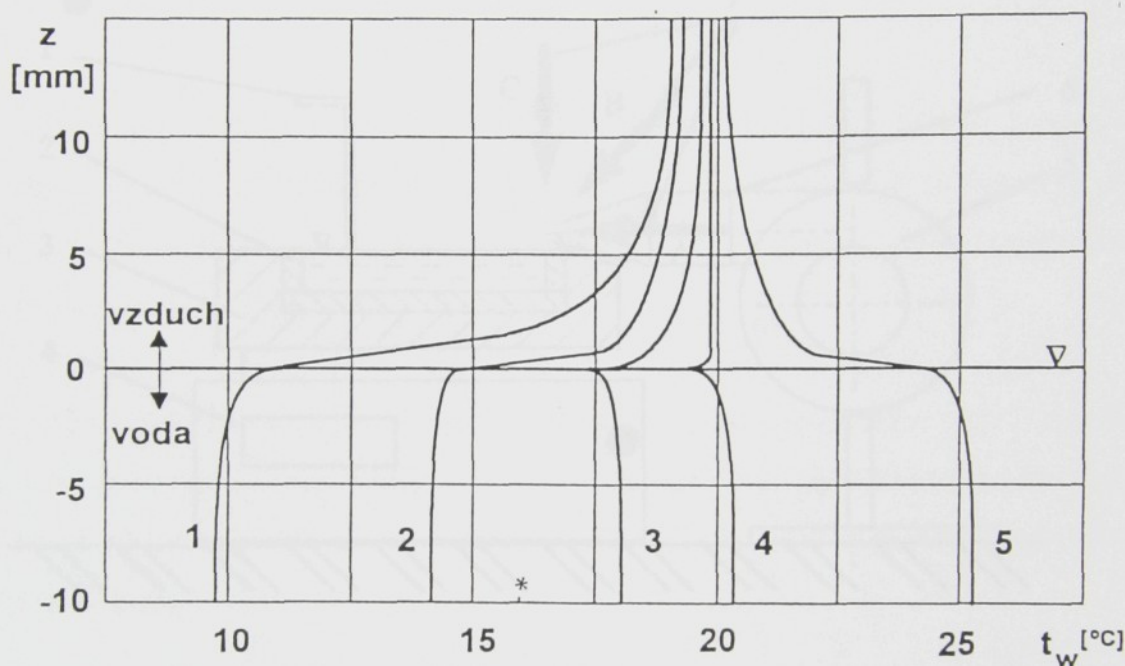
Měření 1 leží pod teplotou rosného bodu F, teplota vody směrem k hladině roste v důsledku dodávaného tepla $\dot{q} = \dot{q}_k + \dot{q}_w$ (stav G) zatím co teplota vzduchu ve směru k vodní hladině klesá.

Měření 2 leží v oblasti bodu E, teplota vody směrem k hladině se mění nepatrně.

Měření 3 leží v oblasti C, zde je patrný pokles teploty směrem k vodní hladině, v důsledku odvodu tepla do vzduchu.

Mezi měřením 2 a 3 se nachází stav mezního adiabatického chlazení, oblast D což potvrzuje i srovnání s teplotou mokrého teploměru. Pro $t_{\infty} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ je $t_{m,ad} = 15,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (v obr. 13 ozn. *).

Měření 4 se nachází v oblasti B, teplota vzduchu se blíží teplotě na povrchu vodní hladiny. Pro měření 5 ležící v oblasti A je teplota povrchu hladiny vyšší, než teplota vzduchu a teplota vody směrem k vodní hladině klesá.



Obr.13 Průběhy teplot vody v závislosti na hloubce pod hladinou a vzduchu v závislosti na vzdálenosti od hladiny.

Z uvedených měření je patrné, že jen v případě mezního adiabatického chlazení je možno zanedbat změny teplotního gradientu ve vodě, kdy $\Delta t_w = 0$

$$\Delta t_w = t_{wi} - t_s$$

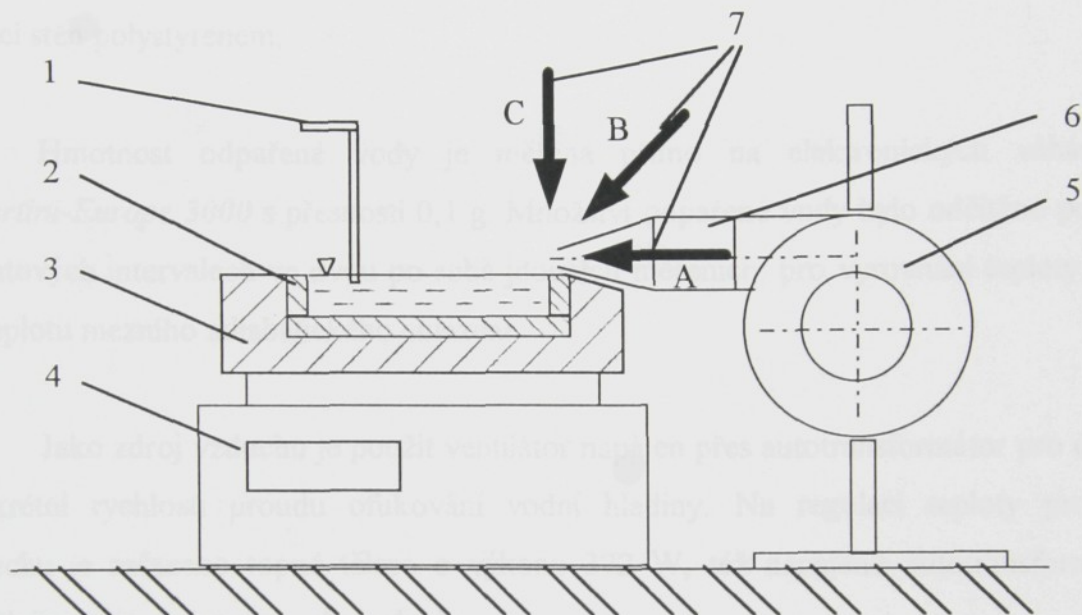
kde t_{wi} - teplota vody pod hladinou; t_s - teplota vody na hladině.

V jiných případech, roste chyba se zvětšující se vzdáleností od teploty mezního adiabatického chlazení.

8. - Popis experimentálních zařízení

Pro konkrétní měření byla navržena tato experimentální zařízení:

1. Zařízení pro měření hmotnostního toku při odpařování z vodní hladiny, za různých podmínek proudění okolního vzduchu obr.14.



Obr.14 Schéma měřicího zařízení.

- 1 - čidlo měření teploty
- 2 - nádoba s vodou
- 3 - tepelná izolace
- 4 - váha
- 5 - ventilátor
- 6 - ohřívač vzduchu
- 7 - směry ofukování vodní hladiny vzduchem
 - A - rovnoběžně s hladinou vody 0°
 - B - šikmo pod úhlem 45°
 - C - kolmo na hladinu 90°

Tryska je umístěna ve stojanu, tak aby bylo možné dosáhnout několika směrů ofukování vodní hladiny. Rovnoběžně s vodní plochou, pod úhlem 45° na vodní plochu

a pod úhlem 90° na vodní plochu. Tryska je vždy umístěna na okraji vodní hladiny, aby byla ofukována celá plocha.

Odpařovací plocha je tvořena plochou miskou ve tvaru čtverce o straně 5 cm a hloubce 1 cm. Je po okraj naplněna vodou, aby okraje co nejméně narušovaly proud obtékaného vzduchu nad hladinou. Teplota vody v misce je rovna teplotě okolního prostředí. Zamezení sdílení tepla mezi vodou v misce a okolím je provedeno tepelnou izolací stěn polystyrenem.

Hmotnost odpařené vody je měřena přímo na elektronických váhách *Gibertini-Europe 3000* s přesností 0,1 g. Množství odpařené vody bylo odčítáno po 10 - ti minutových intervalech ve dvou po sobě jdoucích měřeních, pro vyrovnaní teploty hladiny na teplotu mezního adiabatického chlazení.

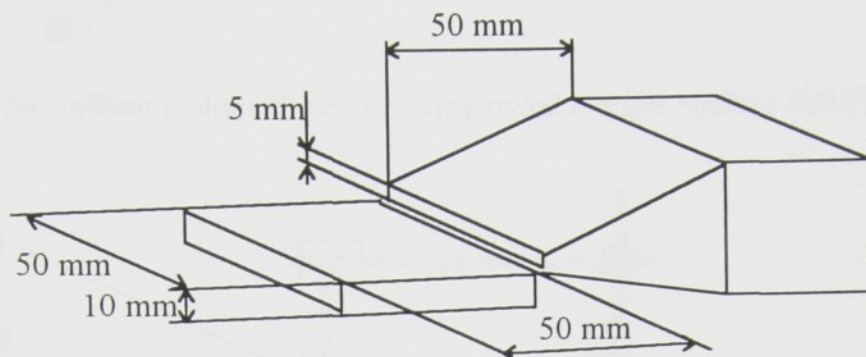
Jako zdroj vzduchu je použit ventilátor napájen přes autotransformátor pro dosažení konkrétní rychlosti proudu ofukování vodní hladiny. Na regulaci teploty proudícího vzduchu je zařazeno topné těleso o výkonu 372 W, též napájeno autotransformátorem zajišťující stálé teploty proudu vzduchu.

Teplota vzduchu proudícího z trysky a teplota vody v odpařované nádobě byla měřena termočlánkem Ni-Cr, AMR T130 10N a vyhodnocována na přístroji AMR THERM 3280-8M.

Rychlost vzduchu v ústí trysky byla měřena *Prandlovou trubicí* a srovnána s hodnotami naměřenými rychlostním čidlem FV 9915 MI2 - 642 a-m/3-2. Po vyhodnocení výsledků měření, které nepřesáhly chybu 3%. Bylo pro následující měření používáno rychlostní čidlo na proměření rychlostních polí a dalších měření. Na určení vlhkosti vzduchu byl použit *Asmanův aspirační psychometr*.

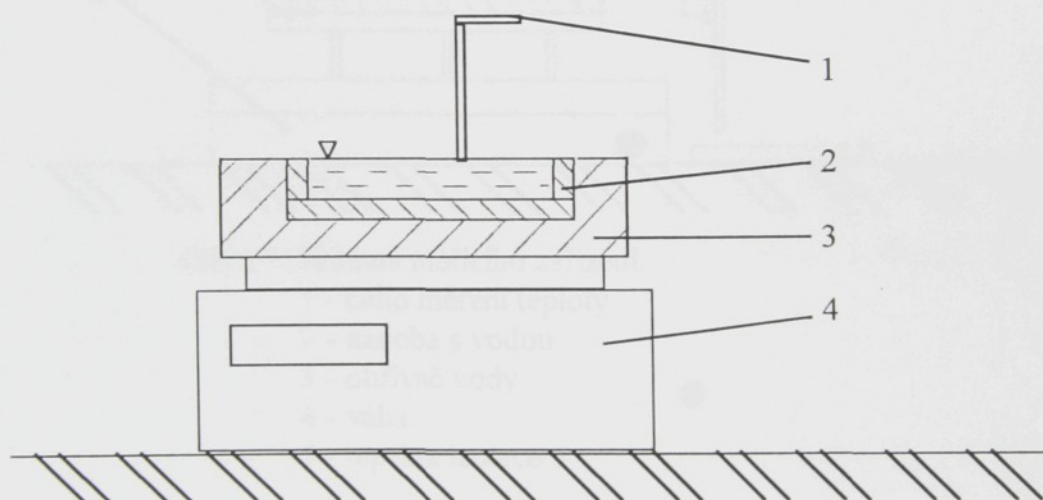
Při experimentu byla použita tryska obdélníkového průřezu zobrazena na obr.15

v následujícím uložení s odpařovací nádobkou.



Obr.15 Zobrazení trysky a odpařovací nádobky

2. Zařízení pro měření hmotnostního toku při volném odpařování z vodní hladiny obr.16.



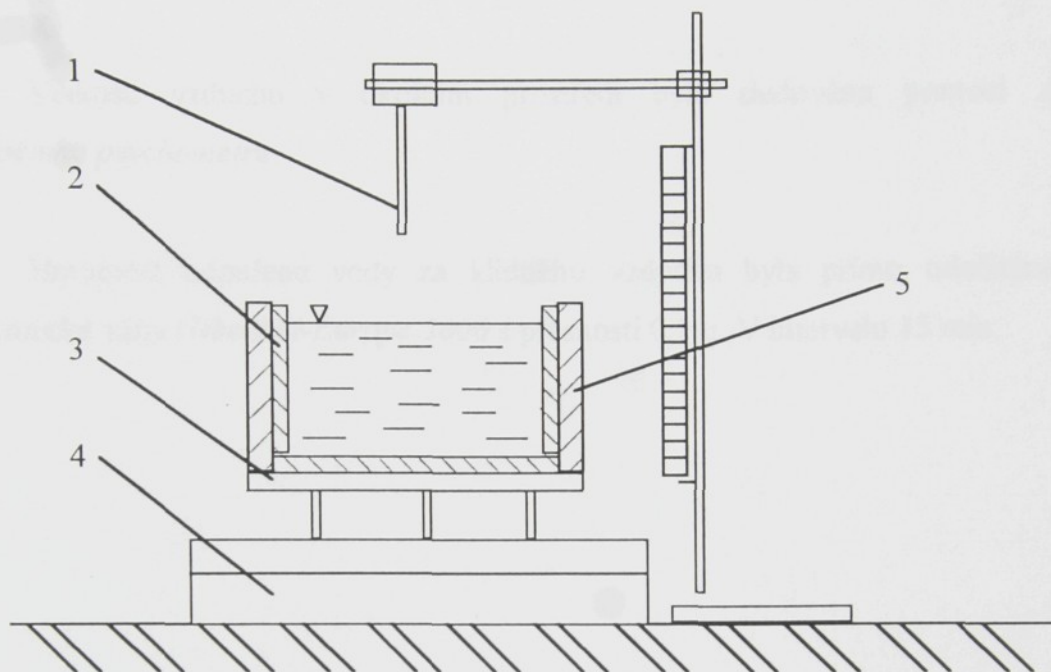
Obr.16 Schéma měřicího zařízení.

- 1 - čidlo měření teploty
- 2 - nádoba s vodou
- 3 - tepelná izolace
- 4 - váha

Pro měření hmotnostního toku odpařované vody za klidného vzduchu byla použita elektronická váha *Gibertini-Europe 3000*. Odpařovací nádoba byla naplněna vodou o teplotě okolního prostředí. A vůči sdílení tepla s okolím je tepelně izolována polystyrenem. V místnosti byla sledována vlhkost vzduchu pomocí *Asmanova aspiračního*

psychometru. A v průběhu měření odečítána teplota vody v odpařované nádobě a teplota okolního vzduchu pomocí termočlánku Ni-Cr, AMR T130 10N.

3. Zařízení pro měření teplotních polí při odpařování z volné hladiny obr.17.



Obr.17 Schéma měřicího zařízení.

- 1 - čidlo měření teploty
- 2 - nádoba s vodou
- 3 - ohříváč vody
- 4 - váha
- 5 - tepelná izolace

Odpařovací nádoba je válcového tvaru vyrobená z mědi o průměru 113 mm a hloubky 50 mm, naplněná vodou. Pro zamezení sdílení tepla s okolím je tepelně izolována.

Teplota vody v nádobě byla udržována topným tělesem o výkonu 592 W, napájeným autotransfornátorem na konstantní hodnotě. Vlastní měření bylo započato až po ustálení teplot vody v celém objemu nádoby. Teplota okolního vzduchu byla neměnným parametrem a rovnala se teplotě místnosti.

Pro měření teplotních vrstev ve vzduchu i pod hladinou, bylo teplotní čidlo instalováno do stojanu, v kterém byl zaručen rovnoměrný posun čidla vůči hladině. Tento směr byl oceňován pro odečítání vzdáleností nad hladinou i pod hladinou. Teploty vody v odpařované nádobě a vzduchu nad hladinou byla měřena termočlánkem Ni-Cr, AMR T130 10N.

Vlhkosti vzduchu v okolním prostředí byla sledována pomocí *Asmanova aspiračního psychometru*.

Hmotnost odpařené vody za klidného vzduchu byla přímo odečítána pomocí elektronické váhy *Gibertini-Europe 3000* s přesností 0,1 g. V intervalu 15 min.

9. - Zhodnocení teoretických výsledků a experimentálních měření

První měření bylo provedeno na zařízení sestaveném podle obr.14. Principem bylo ofukování vodní hladiny proudem různě teplého vzduchu, vystupujícího z ploché trysky obr.15 pod různými úhly.

Jedno měření bylo provedeno, ofukováním vodní hladiny vodorovným proudem vzduchu, neboli pod úhlem 0° .

Druhé měření bylo provedeno na zařízení, které ofukovalo vodní hladinu pod úhlem 45° .

Třetí měření, kde proud vzduchu ofukoval vodní hladinu kolmo, neboli pod úhlem 90° .

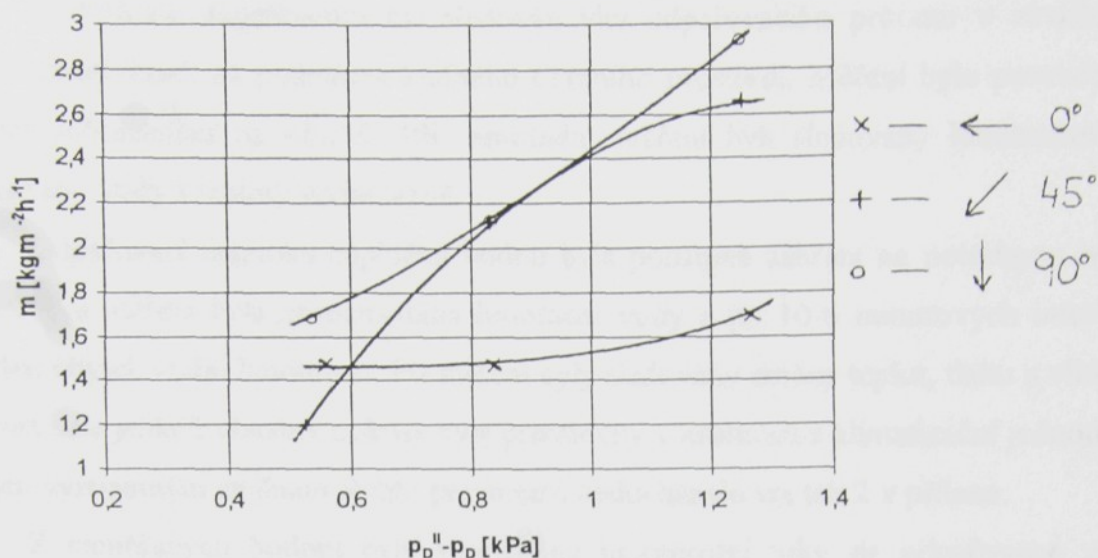
Aby bylo dosaženo proudění vzduchu nad celou hladinou, je vždy plochá tryska umísťována na okraj odpařovací nádoby.

Jednotlivá měření byla několikrát opakována za různých teplot proudu vzduchu a to při 20, 30 a 40 °C. Všechna tato měření byla provedena při konstantních rychlostech vzduchu 6 m/s. Naměřené hodnoty vodních úbytků a ostatních parametrů jsou uvedeny v tab.1 v příloze. Z těchto hodnot byly vypočítány hmotnostní toky $\dot{m}$, parciální tlaky nasycených vodních par $p_D^{\parallel}$ a parciální tlaky vodních par p_D uvedené v tab.8.

úhel ofukování	č.m.	$\dot{m}$ [kg/m ² h]	$p_D^{\parallel} - p_D$ [kPa]	$t_{w,ad}$ [°C]
0°	1	1,44	0,588	15,2
	2	1,44	0,821	16,7
	3	1,68	1,288	19
45°	1	1,2	0,529	15,8
	2	2,16	0,821	17,0
	3	2,64	1,258	19,0
90°	1	1,68	0,562	16,5
	2	2,16	0,821	17,3
	3	2,88	1,258	20,4

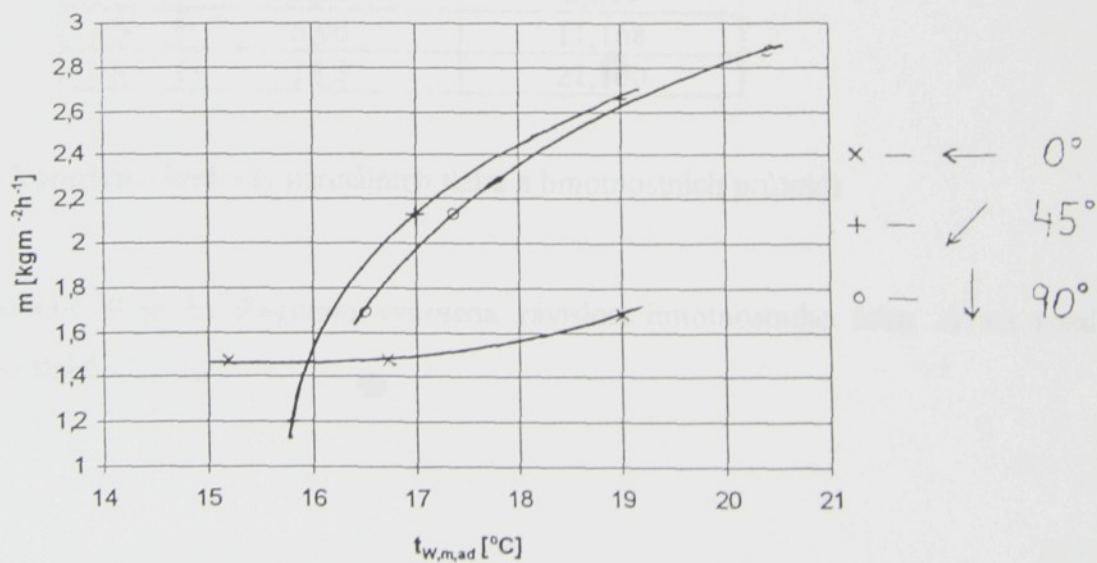
Tab.8 Vypočtené hodnoty parciálních tlaků a hmotnostních průtoků

a zobrazených v grafu na obr.18. Na obrázku jsou vyneseny závislosti hmotnostních toků na rozdílu parciálních tlaků $p_D^{\parallel} - p_D$.



Obr. 18 Diagram průtoku odpařené vodní páry z hladiny při různých směrech proudění vzduchu a rychlosti 6 m/s a měnící se teplotě proudu vzduchu (20, 30, 40 °C).

Tento děj lze popsat množstvím hmotnostního toku odpařené vody v závislosti na teplotě hladiny vodní lázně obr. 19, které je možno porovnat s měřeními uvedenými v literatuře [8] viz. obr. 10 v příloze.



Obr. 19 Diagram průtoku odpařené vodní páry z hladiny při různých směrech proudění vzduchu a rychlosti 6 m/s.

U druhého experimentu byl sledován vliv odpařovacího procesu v závislosti na teplotě vodní lázně, za podmínek klidného okolního prostředí. Měření bylo provedeno na zařízení zobrazeném na obr.16. Při samotném měření byli sledovány hmotnostní toky odpařované vody a teploty vodní lázně.

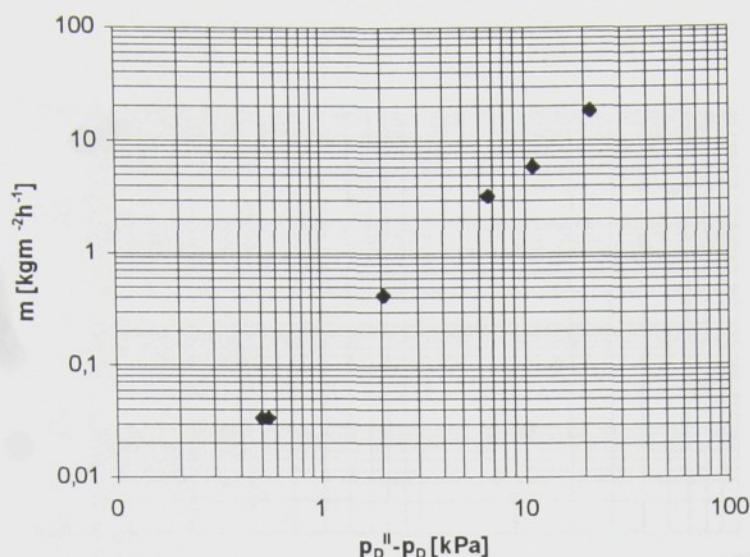
Odpařovací nádobka naplněná vodou byla postupně zahřáta na potřebnou teplotu. Na počátku měření byla zaznamenána hmotnost vody a po 10-ti minutových intervalech odečítán úbytek vodní hmotnosti. Při měření byly sledovány změny teplot, tlaku a vlhkosti v místnosti, ale jelikož všechny pokusy byly prováděny v místnosti s klimatizační jednotkou, k žádným významným změnám těchto parametrů nedocházelo viz tab.2 v příloze.

Z naměřených hodnot byly vypočítány hmotnostní toky $\dot{m}$ odpařované vody a rozdíly parciálních tlaků $p_D'' - p_D$, kde parciální tlak p_D'' platí pro povrchovou teplotu hladiny, uvedeno v tab.9.

č.m.	$\dot{m}$ [kg/m ² h]	$p_D'' - p_D$ [kPa]
1	0,034	0,539
2	0,034	0,502
3	0,42	2,053
4	3,21	6,619
5	6,06	11,168
6	18,3	21,160

Tab.9 Vypočtené hodnoty parciálních tlaků a hmotnostních průtoků

Na obr.20 je do diagramu vynesena závislost hmotnostního toku $\dot{m}$ na rozdílu parciálních tlaků $p_D'' - p_D$,



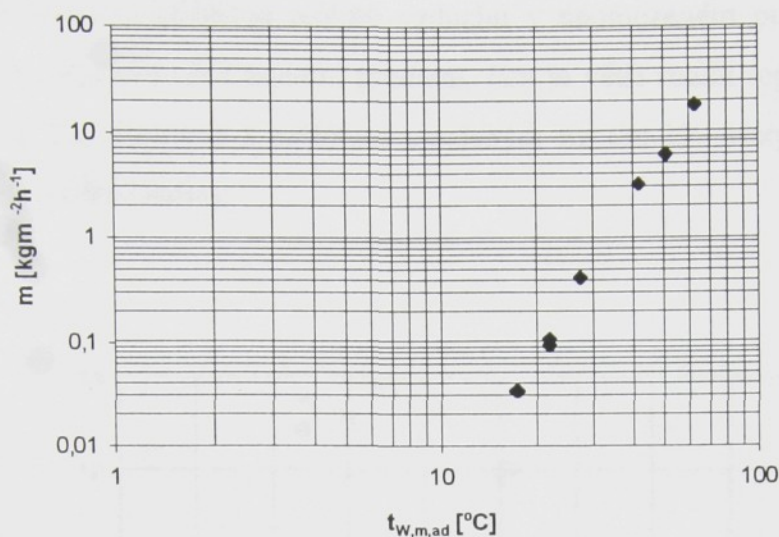
Obr.20 Diagram průtoku odpařené vodní páry z volné hladiny při klidném vzduchu

tento diagram můžeme porovnat s měřením uvedeným v literatuře [8] viz. obr.11 v příloze, kde je možno spatřit obdobný průběh křivky odpařování z vodní hladiny při klidném vzduchu.

Na obr.21 je do diagramu vynesena závislost hmotnostního toku $\dot{m}$ na teplotě vodní hladiny $t_{w,ad}$, z hodnot uvedených v tab.10.

č.m.	$\dot{m}$ [kg/m ² h]	$t_{w,ad}$ [°C]
1	0,034	17,4
2	0,034	17,1
3	0,109	21,6
4	0,0932	21,6
5	0,42	27,3
6	3,21	42
7	6,06	50,8
8	18,3	63

Tab.10 Tabulka naměřených hodnot průtoku odpařené vodní páry z hladiny při klidném vzduchu

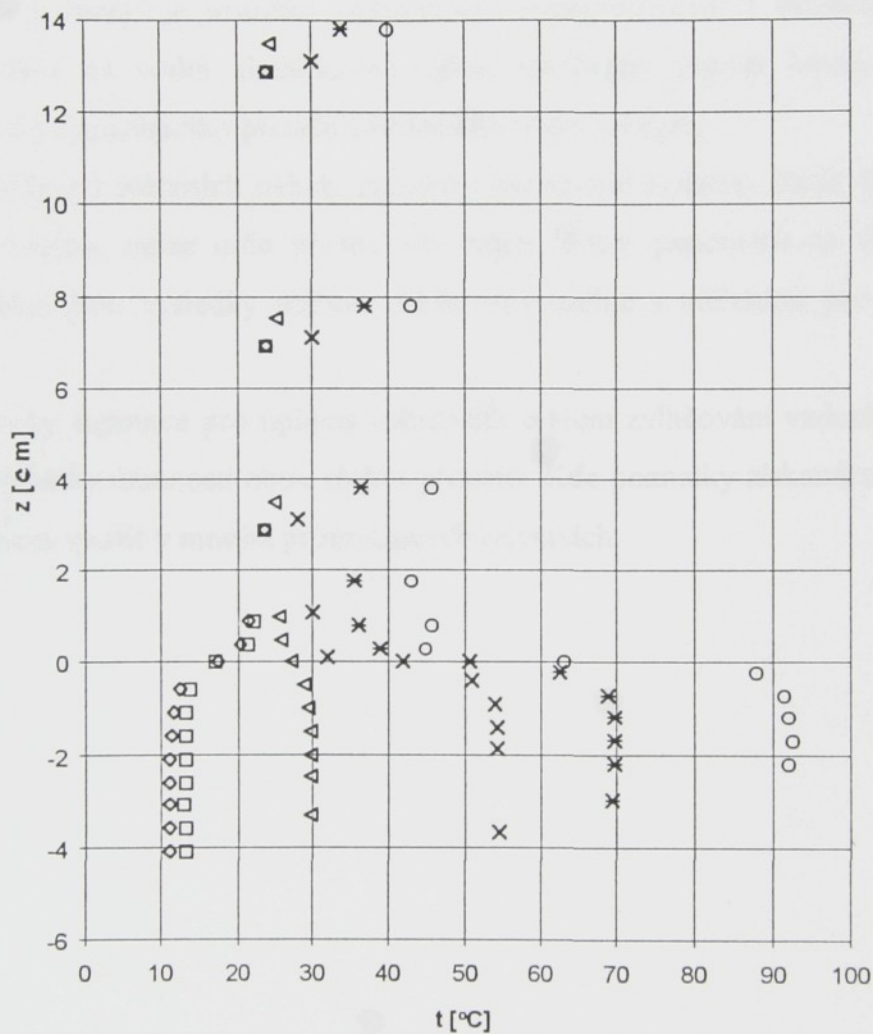


Obr.21 Diagram průtoku odpařené vodní páry z volné hladiny při klidném vzduchu

Třetí měření je provedeno na experimentálním zařízení podle obr.17. Cílem měření bylo zmapovat teploty v oblasti nad vodní hladinou, tedy ve vzduchu, a teploty pod vodní hladinou, tedy ve vodě. K tomuto účelu bylo měřící čidlo teploty instalováno do posuvného stojanu, kterému byl umožněn pouze vertikální pohyb, kolmo vůči vodní hladině. Odměrování vzdáleností bylo prováděno od povrchu vodní hladiny.

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab.3 v příloze. Zpracovány jsou do grafu obr.22, kde na osu x jsou vyneseny teploty vody v závislosti na hloubce pod hladinou a vzduchu v závislosti na vzdálenosti od hladiny.

Uvedené měření je srovnatelné z měřeními provedenými jinými autory. Křivky teplot nad hladinou se přibližují teplotě vzduchu v neomezeném prostoru a křivky teplot pod hladinou mají tím větší teplotní gradient, čím je větší rozdíl teplot vzduchu a lázně. Tento výsledek lze porovnat s měřením uvedeným na obr.13, který je proveden pro podélné obtékání vodní hladiny.



Obr.22 Průběhy teplot vody a vzduchu v závislosti na vzdálenosti od hladiny

10. - Závěr

Práce obsahuje souhrn využití děje přestupu tepla a hmoty v oblasti zvlhčování a odvlhčování vzduchu.

Z výsledků uvedených v měření vyplývá, že proces zvlhčování vzduchu je dost složitý a jeho účinnosti je ovlivňována mnoha faktory. Některé z nich jsou publikovány a zkoumány v provedených měřeních. Je zřejmé, že účinnost odpařovacího procesu je tím větší, čím intenzivnější je proudění vzduchu nad vodní hladinou. V případě zkoumání vlivu směru proudění na vodní hladinu, byl zjištěn narůstající přenos hmoty v závislosti na zvyšování úhlu dopadajícího proudu vzduchu na vodní hladinu.

Protože při měřeních nebyly zaručeny konstantní hodnoty tlaků, teploty a vlhkosti okolního vzduchu, nelze určit přesně vliv změn těchto parametrů na vlastní prováděné měření. Přesto jsou výsledky měření dobře srovnatelné s měřeními prováděnými jinými autory.

Bylo by zajímavé pro úplnost uskutečnit měření zvlhčování vzduchu sytou párou a porovnat výsledky účinností obou těchto procesů. Kde poznatky získané z těchto měření lze s úspěchem využít v mnoha průmyslových odvětvích.

Seznam použité literatury

- [1] Chyský J. : Vlhký vzduch, SNTL Praha, 1977
- [2] Kalčík J., Sýkora K. : Technická termodynamika, ACADEMIA Praha, 1973
- [3] Jenčík J., Kohn L. : Technické měření, SNTL Praha, 1982
- [4] Chapman J. A. : Heat transfer, Maxwell Intern. Edit., 1974
- [5] Máca F. : Klimatizace, Práce Praha, 1958
- [6] Firemní podklady
- [7] Časopis ZTV, ACADEMIA Praha
- [8] Chyský J., Oppl L. a kolektiv : Větrání a klimatizace, SNTL Praha, 1973
- [9] Kmoníček V., Sazima M., Středa I., Doubrava J. : Termomechanika, ČVUT Praha, 1988
- [10] Olehla J. : Termomechanika, VŠST Liberec, 1992
- [11] Časopis VVI, Společnost pro techniku prostředí Praha

Rozsah příloh

Počet stran 13

Počet obrázků 11

Počet rovnic 3

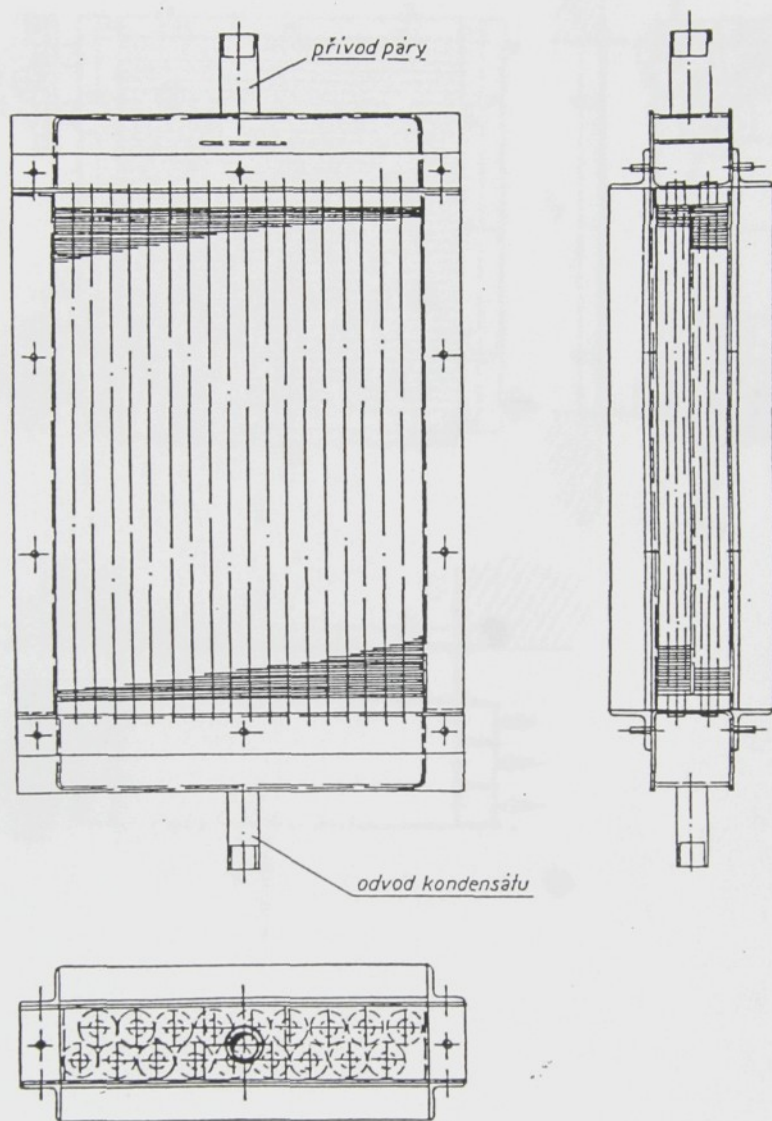
Příloha

Rozsah příloh

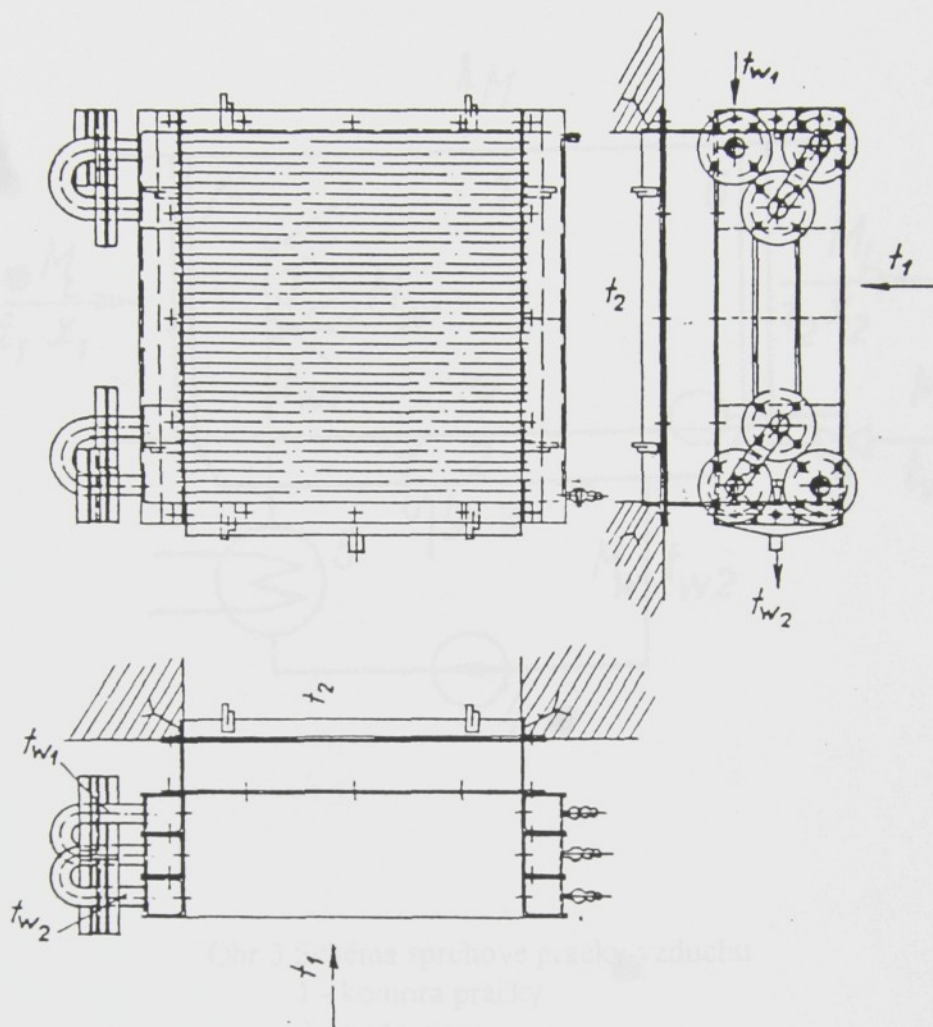
Počet stran: 13

Počet obrázků: 11

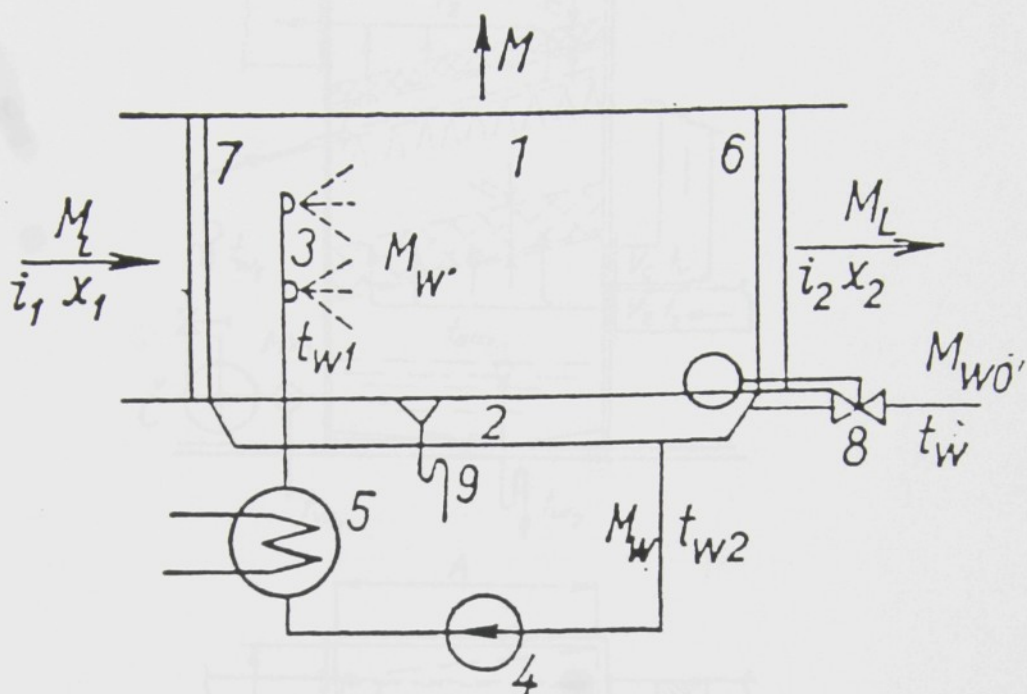
Počet tabulek: 3



Obr.1 Schéma běžného provedení ohříváků vzduchu s natáčenými žebrovkami včetně protirámu pro připojovací vzduchovod.

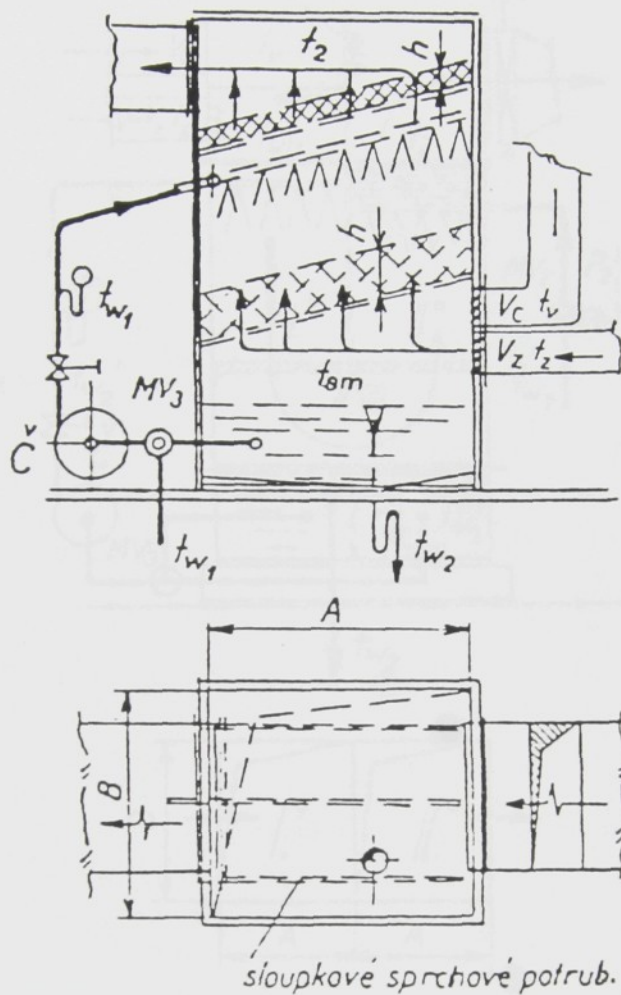


Obr.2 Schéma uspořádání povrchového chladiče a jeho montáž v zařízení.

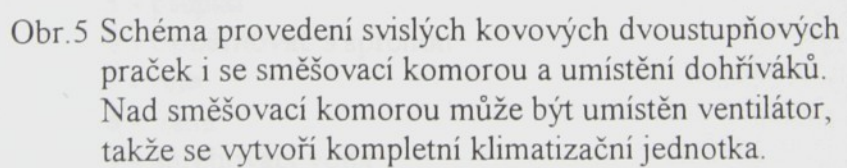


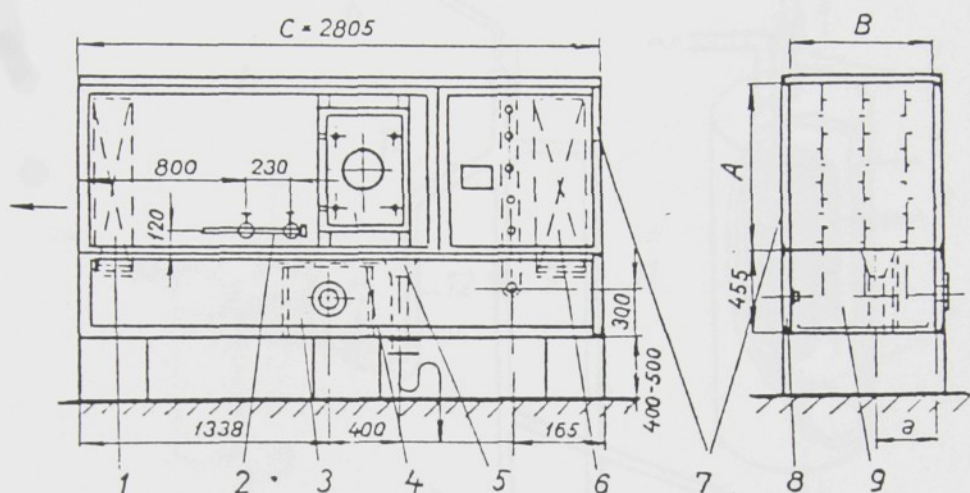
Obr.3 Schéma sprchové pračky vzduchu

- 1 - komora pračky
- 2 - vodní vana
- 3 - rozprašovací trysky
- 4 - odstředivé čerpadlo
- 5 - výměník
- 6 - odlučovací plechy
- 7 - usměrňovací plechy
- 8 - plovákový ventil
- 9 - přepad do kanalizace



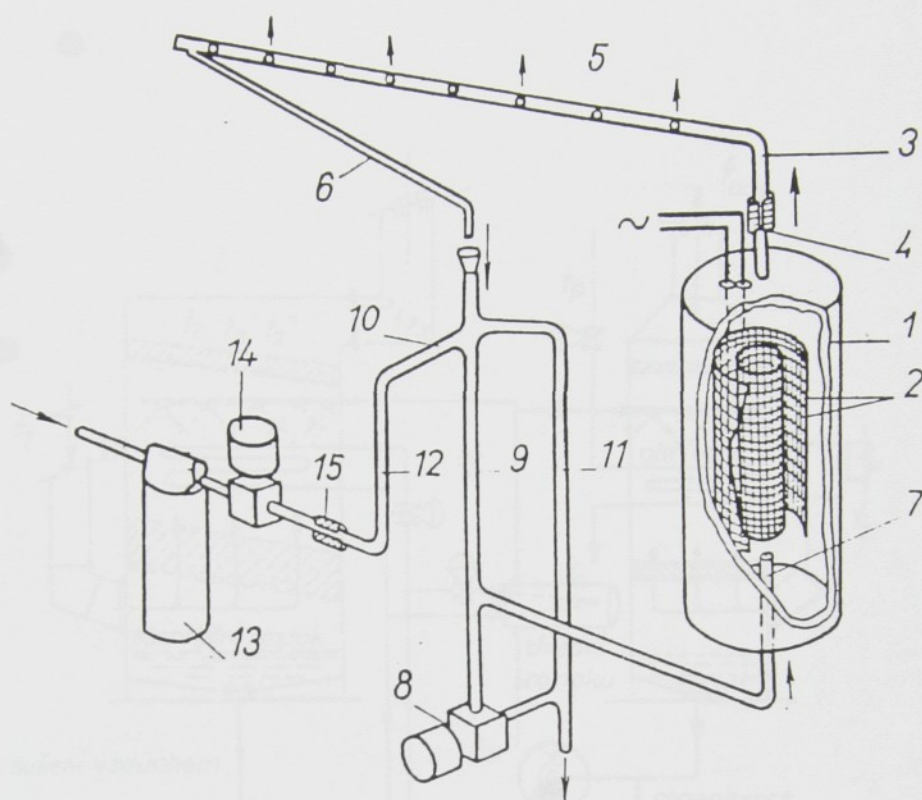
Obr.4 Schéma provedení svislých jednostupňových náplňových praček. Spodní vrstva z tělísek je vlhčící a horní sušící. Spodní vrstva usměřuje a rozděljuje stejnoměrně vzduch po celém průřezu.





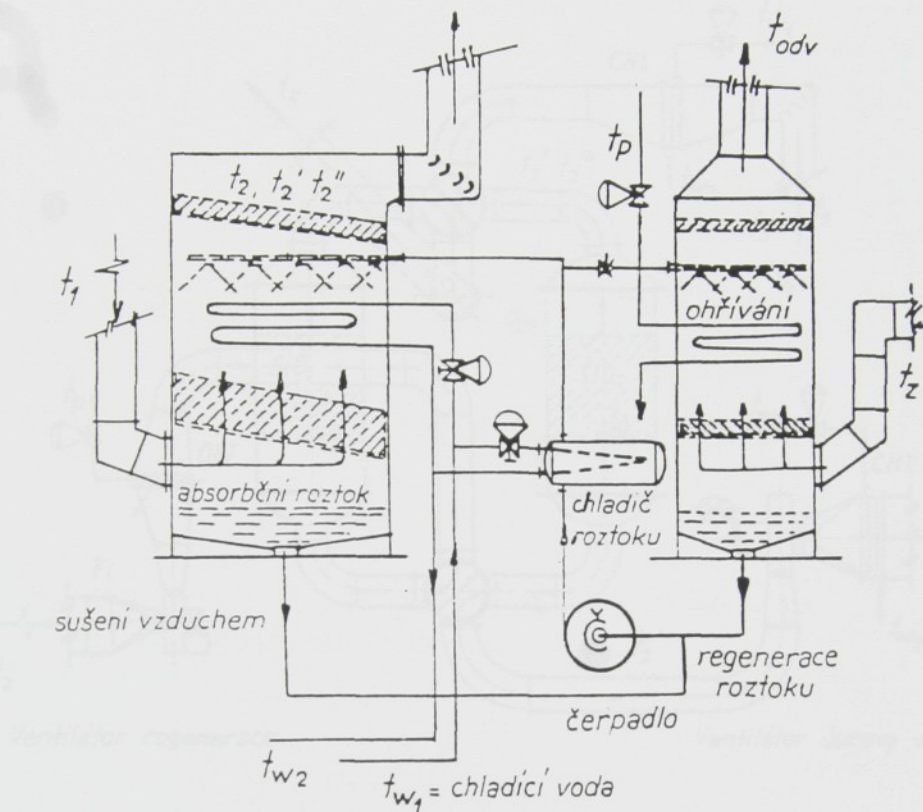
Obr.6 Schéma provedení kovových jednostupňových praček.

- 1 - odlučovací plechy
- 2 - plnicí souprava
- 3 - čerpadlo
- 4 - ohřívač
- 5 - přepad
- 6 - usměrňovač s sprchou
- 7 - rám
- 8 - vana
- 9 - sprchovací voda

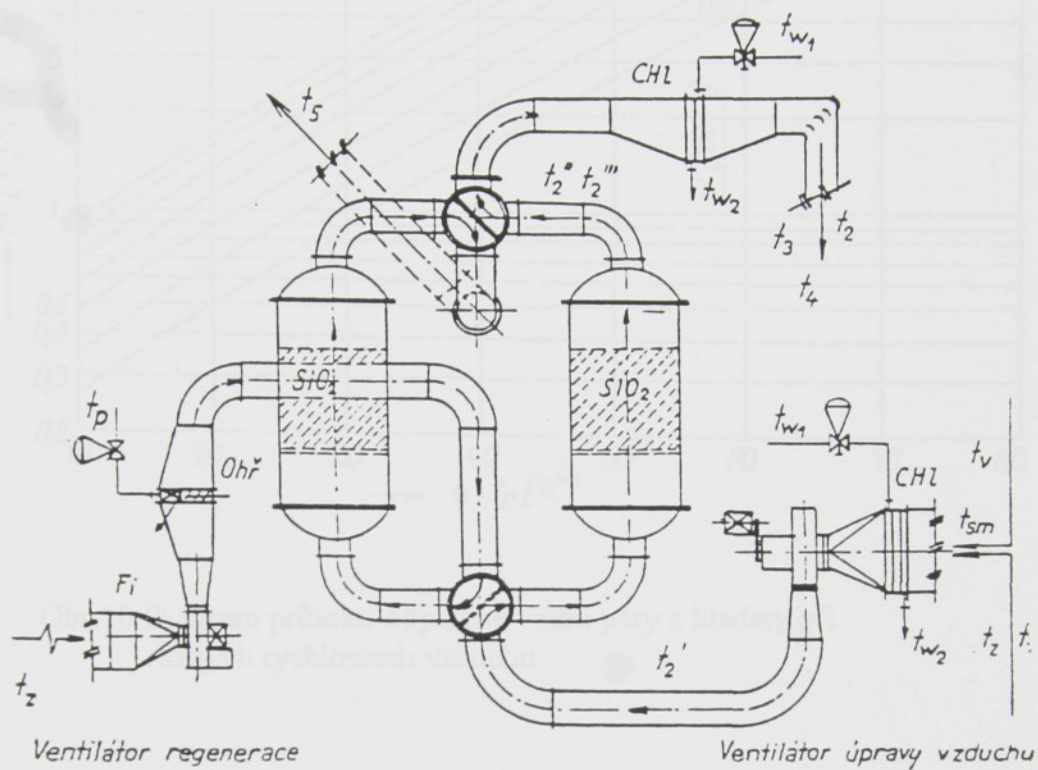


Obr.7 Schéma parního zvlhčovače Lumatic

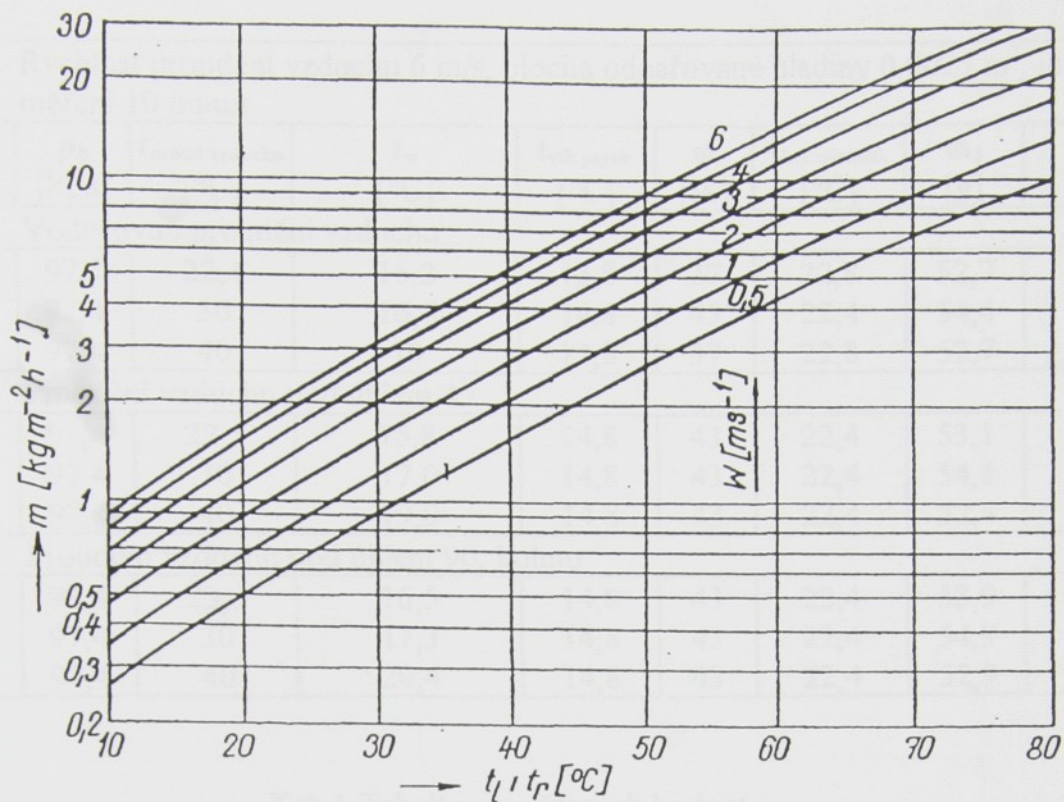
- 1 - parní generátor
- 2 - elektrody
- 3 - potrubí
- 4 - dýza
- 5 - děrovaná trubka
- 6 - odvod kondenzátu
- 7 - příváděcí voda
- 8 - regulační ventil
- 9 - regulační trubka
- 10 - regulátor hladiny
- 11 - přepad
- 12 - potrubí
- 13 - vodní filtr
- 14 - regulační ventil
- 15 - tryska



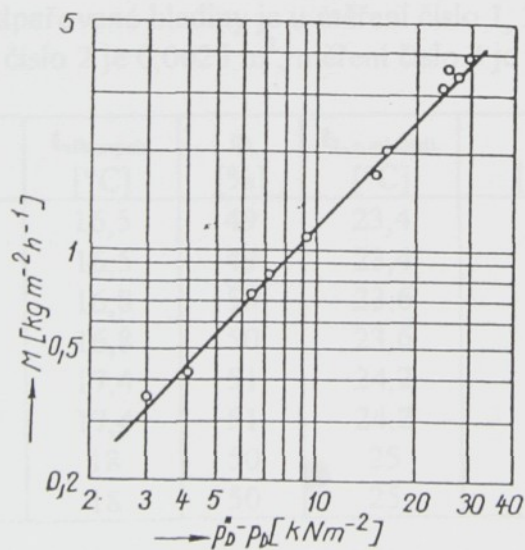
Obr.8 Schéma zařízení pro sušení vzduchu absorpčními roztoky včetně regenerace roztoku (vypařování vyloučené vody ze vzduchu).



Obr.9 Schéma zařízení pro sušení vzduchu silikagelem SiO_2 .
Přepojovací klapky pro střídavý provoz zařízení a regeneraci se mohou snadno automaticky přepínat.



Obr.10 Diagram průtoku odpařené vodní páry z hladiny při různých rychlostech vzduchu



Obr.11 Diagram průtoku odpařené vodní páry z hladiny při klidném vzduchu

Rychlost proudění vzduchu 6 m/s, plocha odpařované hladiny 0,0025 m ² , interval měření 10 minut								
č.m.	p _b [kPa]	t _{proud.vzduchu} [°C]	t _w [°C]	t _{vlh.psych.} [°C]	φ [%]	t _{L.v.místnsti.} [°C]	m ₁ [g]	m ₂ [g]
Vodorovné proudění vzduchu								
1	97,7	22,4	15,2	13,8	37	22,8	52,7	52,1
2	97,4	30	16,7	14,8	43	22,4	54,4	53,8
3	97,4	40	19	13,8	37	22,8	52,7	52,0
Proudění vzduchu pod úhlem 45								
1	97,4	22,5	15,8	14,8	43	22,4	53,1	52,6
2	97,4	30	17,0	14,8	43	22,4	54,1	53,2
3	97,4	40	19,0	14,8	43	22,4	52,4	51,3
Proudění vzduchu pod úhlem 90, kolmo								
1	97,4	23,9	16,5	14,8	43	22,4	53,9	53,2
2	97,4	30	17,3	14,8	43	22,4	54,9	54,0
3	97,4	40	20,4	14,8	43	22,4	52,9	51,7

Tab.1 Tabulka naměřených hodnot

Volné odpařování z vodní hladiny za klidného vzduchu								
Plocha odpařované hladiny je u měření číslo 1, 2, 5, 6, 7, 8 rovna 0,01 m ² u měření číslo 2 je 0,0025 m ² , měření číslo 3 je rovna 0,00708 m ²								
č.m.	p _b [kPa]	t _{vlh.psych.} [°C]	φ [%]	t _{L.v.místnsti.} [°C]	čas [min]	m ₁ [g]	m ₂ [g]	t _{povrch.vod.hlad.} [°C]
1	96,7	16,5	49	23,4	35	944,6	944,4	17,4
2	96,7	16,5	49	23,4	35	944,4	944,2	17,1
3	97	16,8	50	23,6	900	58,7	54,6	21,6
4	97	16,8	50	23,6	900	116	106,1	21,6
5	96,7	17,4	51	24,2	10	821,9	821,2	27,3
6	96,7	17,4	51	24,2	17	847,9	838,8	42
7	96,7	18	50	25	10	801	790,9	50,8
8	96,7	18	50	25	10	772	741,5	63

Tab.2 Tabulka naměřených hodnot

č.m.	1	2	3	4	5	6
p_b [kPa]	96,7	96,7	96,7	96,7	96,7	96,7
$t_{vlh.psych.}$ [°C]	16,5	16,5	17,4	17,4	18	18
φ [%]	49	49	51	51	50	50
$t_{L.v.mistnsti.}$ [°C]	23,4	23,4	24,2	24,2	25	25
Vzdálenost [cm]						
13,8					34	40
13,5			24,6			
13,1				30		
12,9	24	24,2				
7,8					37	43
7,5			25,4			
7,1				30		
6,9	23,9	24				
3,8					36,5	45,7
3,5			25,1			
3,1				28		
2,9	23,7	23,8				
1,8					35,5	43
1,1				30		
1			25,6			
0,9	21,5	22,4				
0,8					36	45,7
0,5			25,8			
0,4	20,4	21,4				
0,3					38,8	45
0,1				32		
0	17,4	17,1	27,3	42	50,8	63
-0,2					62,5	87,8
-0,4				51		
-0,5			29			
-0,6	12,4	13,8				
-0,7					69	91,5
-0,9				54		
-1			29,5			
-1,1	11,6	13,2				
-1,2					69,7	92
-1,4				54,3		
-1,5			29,8			
-1,6	11,2	13,1				
-1,7					69,6	92,6
-1,9				54,4		

Pokračování tabulky						
-2			29,8			
-2,1	11,1	13,1				
-2,2					69,7	92
-2,5			29,8			
-2,6	11	13,1				
-3					69,5	
-3,1	10,9	13				
-3,3			29,8			
-3,6	10,9	13,1				
-3,7				54,6		
-4,1	10,9	13,1				

Tab.3 Tabulka naměřených hodnot