

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Program na výpočet parametrů vlhkého vzduchu  
Vlastimil Flegl

Bakalářská práce

2009

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vlastimil FLEGL**

Studijní program: **B2646 Informační technologie**

Studijní obor: **Informační technologie**

Název tématu: **Software pro výpočet parametrů vlhkého vzduchu**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je vytvoření programu na výpočet parametrů vlhkého vzduchu. Parametry vzduchu jsou: tlak vzduchu, teplota vzduchu, teplota mokrého teploměru, teplota rosného bodu, relativní vlhkost, měrná vlhkost a entalpie. Po zadání tří z těchto parametrů program do počítá zbytek a navíc měrnou hmotnost vzduchu, absolutní vlhkost, tlak vodních par, tlak nasycených par, tlak nasyc. par při mokré teplotě, výparné teplo při mokré teplotě, entalpii vzduchu při mokré teplotě, plynovou konstantu vlhkého vzduchu. Teoretická část: \* popis parametrů vzduchu \* popis algoritmu na výpočet vzduchu \* využití současných softwarů pro vizualizaci výsledků Aplikační část \* program s výstupem použitelným v jiném vizualizačním softwaru.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Jaroslav Chyský: Vlhký vzduch, SNTL 1977 Oldřich Šifner, Jaroslav Klomfar: Mezinárodní standardy termofyzikálních vlastností vody a vodní páry , ACADEMIA studie 1/1996**

Vedoucí bakalářské práce:

**RNDr. Josef Rak**

Katedra informačních technologií

Datum zadání bakalářské práce: **15. ledna 2009**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15. května 2009**



doc. Ing. Simeon Karamazov, Dr.

děkan



Ing. Lukáš Čegan  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2009

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 7. 5. 2009

Vlastimil Flegl

## **Souhrn**

Tato práce v krátkosti seznamuje s problematikou vlhkého vzduchu, navrhuje soubor algoritmů pro výpočet sady parametrů vlhkého vzduchu z kombinace zadaných hodnot, popisuje vytvoření softwaru a implementuje v něm tyto algoritmy, dále popisuje postup a program vytváření Moliérova diagramu vlhkého vzduchu a grafického znázornění vypočteného stavu vlhkého vzduchu v uvedeném diagramu. Jako nástroj pro tvorbu programu i grafického znázornění byl zvolen Excel 2003 a programovací jazyk VBA.

## **Klíčová slova**

vlhký vzduch, i-x diagram, VBA, Excel

## **Title**

Program for calculation parameters of moist air

## **Abstract**

This work acquainting in shortness with problems of moist air, suggests algorithm group for calculation parameter group of moist air from combination of dated up values, describe creating software and implement in it this algorithms, next this work describe consecution creating Molier diagram of moist air and graphic illustration calculated stage of moist air in diagram. As tool for program creating and graphic illustration was chosen Excel 2003 and programing language VBA.

## **Keywords**

moist air, i-x diagram, VBA, Excel

## Seznam použitých zkratk

- $A_{ad}$  – psychometrický součinitel [1/K]
- $c_D$  – měrné teplo vodních par [J/kg K]
- $c_E$  – měrné teplo ledu [J/kg K]
- $c_L$  – měrné teplo suchého vzduchu [J/kg K]
- $c_w$  – měrné teplo vody [J/kg K]
- $i$  – entalpie vzduchu [J/kg]
- $i''$  – entalpie nasyceného vzduchu [J/kg]
- $i''_m$  – entalpie nasyceného vzduchu při mokré teplotě [J/kg]
- $l_E$  – sublimační teplo při mokré teplotě [J/kg]
- $l_m$  – výparné teplo při mokré teplotě [J/kg]
- $m_n$  – střední molekulová hmotnost vlhkého vzduchu [kg/kmol]
- $p$  – celkový (barometrický) tlak vzduchu [Pa, KPa]
- $p_D$  – parciální tlak vodní páry [Pa]
- $p''_D$  – tlak nasycených vodních par [Pa]
- $p''_{Dm}$  – tlak nasycených vodních par při mokré teplotě [Pa]
- $p_L$  – parciální tlak suchého vzduchu [Pa]
- $p_X$  – pixel
- $R$  – univerzální plynová konstanta (8314,3) [J/kmol K]
- $r$  – plynová konstanta vlhkého vzduchu [J/kg K]
- $r_D$  – plynová konstanta pro vodní páru [J/kg K]
- $r_L$  – plynová konstanta pro suchý vzduch [J/kg K]
- $T$  – termodynamická teplota [K]
- $t_{ad}$  – teplota mezního adiabatického ochlazení [°C]
- $t_m$  – teplota mokrého teploměru [°C]
- $t_r$  – teplota rosného bodu [°C]
- $t_s$  – teplota vzduchu (nebo pouze t) [°C]
- $vtv$  – výparné teplo vody
- $X$  – souřadnice pravouhlého souřadného systému [cm]
- $x$  – měrná vlhkost vzduchu [kg/kg s.v., g/kg s.v.]
- $x''$  – měrná vlhkost nasyceného vzduchu [kg/kg s.v., g/kg s.v.]
- $x''_m$  – měrná vlhkost nasyceného vzduchu při teplotě  $t_m$  [kg/kg s.v., g/kg s.v.]
- $Y$  – souřadnice pravouhlého souřadného systému [cm]

- $\alpha$  – modul pro vynesení souřadnicové sítě  $x=\text{konst.}$  [cm/(kg/kg s.v.)]  
 $\beta$  – modul pro vynesení souřadnicové sítě  $i=\text{konst.}$  [cm/(J/kg s.v.)]  
 $\gamma$  – úhel kosoúhlé sítě [°]  
 $\rho$  – měrná hmotnost vzduchu [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_D$  – absolutní vlhkost vzduchu neboli měrná hmotnost vodních par [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\varphi$  – relativní vlhkost vzduchu [-,%]  
 $\omega$  – úhel souřadných os „i“ a „x“ (180°-  $\gamma$ ) [°]

## Seznam obrázků a tabulek

<b>TAB. 1: SLOŽENÍ VZDUCHU VE SPODNÍCH VRSTVÁCH ATMOSFÉRY .....</b>	<b>11</b>
<b>OBR. 1: STRUKTURA FORMULÁŘŮ A MODULŮ.....</b>	<b>45</b>
<b>OBR. 2: NASTAVENÍ PROGRAMU .....</b>	<b>46</b>
<b>OBR. 3: VYKRESLENÝ I-X DIAGRAM.....</b>	<b>50</b>
<b>OBR. 4: VYKRESLENÝ I-X DIAGRAM A VYKRESLENÉ STAVY .....</b>	<b>50</b>
<b>OBR. 5: VÝŘEZ Z HLAVNÍHO PROGRAMU .....</b>	<b>51</b>
<b>OBR. 6: NASTAVENÍ PARAMETRŮ GRAFU .....</b>	<b>54</b>



## Obsah

<b>1.</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>2.</b>	<b>FYZIKA VLHKÉHO VZDUCHU .....</b>	<b>11</b>
2.1.	VLHKÝ VZDUCH A JEHO PARAMETRY .....	11
2.2.	DEFINICE POUŽITÝCH PARAMETRŮ VLHKÉHO VZDUCHU A DŮLEŽITÉ VZTAHY .....	13
2.3.	MOLLIERŮV I-X DIAGRAM VLHKÉHO VZDUCHU .....	16
2.4.	TERMODYNAMICKÉ VLASTNOSTI VODNÍ PÁRY NA MEZI SYTOSTI .....	18
<b>3.</b>	<b>ALGORIMY VÝPOČTU PARAMETRŮ VLHKÉHO VZDUCHU .....</b>	<b>18</b>
3.1.	POZNÁMKY K ALGORITMŮM .....	18
3.2.	ALGORITMUS PRO ZADANÉ HODNOTY $P$ , $T_S$ , $T_M$ .....	19
3.3.	ALGORITMUS PRO ZADANÉ HODNOTY $P$ , $T_S$ , $T_R$ .....	20
3.4.	ALGORITMUS PRO ZADANÉ HODNOTY $P$ , $T_S$ , $\Phi$ .....	22
3.5.	ALGORITMUS PRO ZADANÉ HODNOTY $P$ , $T_S$ , $X$ .....	23
3.6.	ALGORITMUS PRO ZADANÉ HODNOTY $P$ , $T_S$ , $I$ .....	25
3.7.	ALGORITMUS PRO ZADANÉ HODNOTY $P$ , $T_M$ , $T_R$ .....	27
3.8.	ALGORITMUS PRO ZADANÉ HODNOTY $P$ , $T_M$ , $\Phi$ .....	28
3.9.	ALGORITMUS PRO ZADANÉ HODNOTY $P$ , $T_M$ , $X$ .....	30
3.10.	ALGORITMUS PRO ZADANÉ HODNOTY $P$ , $T_M$ , $I$ .....	31
3.11.	ALGORITMUS PRO ZADANÉ HODNOTY $P$ , $T_R$ , $\Phi$ .....	33
3.12.	ALGORITMUS PRO ZADANÉ HODNOTY $P$ , $T_R$ , $I$ .....	34
3.13.	ALGORITMUS PRO ZADANÉ HODNOTY $P$ , $\Phi$ , $X$ .....	36
3.14.	ALGORITMUS PRO ZADANÉ HODNOTY $P$ , $\Phi$ , $I$ .....	38
3.15.	ALGORITMUS PRO ZADANÉ HODNOTY $P$ , $X$ , $I$ .....	40
3.16.	PŘÍKLAD VÝPOČTU DLE ALGORITMU $P$ , $T_S$ , $\Phi$ .....	42
<b>4.</b>	<b>PROGRAM VLHKÝ VZDUCH .....</b>	<b>45</b>
4.1.	STRUKTURA APLIKACE .....	45
4.2.	POPIS APLIKACE .....	47
4.2.1.	List Parní tabulky .....	48
4.2.2.	List graf .....	49
4.2.3.	Výpočtový program .....	51
4.2.4.	Graf .....	54
<b>5.</b>	<b>VYTVOŘENÍ I-X DIAGRAMU .....</b>	<b>55</b>
5.1.	PRINCIP VYTVÁŘENÍ GRAFU V EXCELU .....	55
5.2.	POSTUP PŘI VYTVÁŘENÍ GRAFU V EXCELU .....	57
<b>6.</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>64</b>
6.1.	ZHODNOCENÍ .....	64
6.2.	MOŽNÉ ROZŠÍŘENÍ .....	64
<b>7.</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>66</b>

## 1. Úvod

Vlhký vzduch je směs tzv. suchého vzduchu a vodních par. Tato směs plynů tvoří životně důležitý plynný obal Země. S projevy měnícího se obsahu vodních par ve vzduchu se setkává každý člověk denně například v podobě mlhy, rosy, deště, námrazy či naopak třeba při sušení prádla. Fyzika vlhkého vzduchu tvoří teoretický základ některých technických oborů jako například klimatizace či sušení. Parametry vlhkého vzduchu ovlivňují nejen klima v přírodě, ale počítá se s nimi v oborech jako jsou energetická zařízení, větrání, chlazení, v chemickém a potravinářském průmyslu, v textilním průmyslu, v technologii materiálu, v biologii a v řadě dalších technických oborech a průmyslových odvětví.

Tato práce uvádí fyzikální základy vlhkého vzduchu, algoritmy výpočtů parametrů vlhkého vzduchu, popisuje postup a způsob tvorby programu na výpočet parametrů vlhkého vzduchu, postup a způsob tvorby programu na vykreslení Molierova  $i$ - $x$  diagramu a zakreslení vypočítaného stavu vzduchu.

V současné době existuje řada programů, které více nebo méně přesně parametry vlhkého vzduchu dovedou spočítat, ale bez diagramu. Pokud se diagram v programu objeví, jedná se jen o ilustrativní znázornění stavu vzduchu bez praktického použití. V programu vytvořeném v této práci lze operativně vykreslit Molierův  $i$ - $x$  diagram pro zvolený celkový tlak, pro zvolený rozsah teplot a zvolený rozsah měrných vlhkostí. Jinými slovy uživatel si může vytisknout vhodný diagram, bude-li řešit problematiku sušení při sušících teplotách kolem  $100^{\circ}\text{C}$  a nebo si vytiskne detailní diagram vhodný pro řešení například problematiky vysněžování. Jelikož se v technické praxi  $i$ - $x$  diagramy hojně užívají pro svoji přehlednost, názornost a operativnost, může vytvořený program nalézt uplatnění v již uvedených oborech.

Program včetně diagramu byl vytvořen v Excelu 2003 a programovacím jazyku VBA. Výpočet a grafické znázornění tak bylo nasměrováno do jedné aplikace což je uživatelsky příjemné. Součástí programu jsou i parní tabulky, kterých se v některých algoritmech využívá. Při vytváření byl kladen důraz na uživatelsky jednoduché ovládání a patřičné opatření programu chybovými hláškami v případě zadávání nesmyslných hodnot nebo hodnot překračující stanovené limity.

## 2. Fyzika vlhkého vzduchu

### 2.1. Vlhký vzduch a jeho parametry

V této kapitole jsou ve stručnosti uvedeny fyzikální základy vlhkého vzduchu a definice použitých parametrů i používané matematické vztahy. V této práci je důsledně používaná symbolika z doporučené literatury, přestože značení některých veličin je v současnosti odlišné. Následující informace v této kapitole jsou čerpány z literatury č.[1].

Jak již bylo uvedeno vlhký vzduch je směsí suchého vzduchu a vodních par.

Suchý vzduch je směs přehřátých plynů s malou hustotou molekul při běžných atmosférických tlacích. Svými vlastnostmi se blíží ideálnímu plynu (řídícímu se jednoduchou stavovou rovnicí). Složení suchého vzduchu ve spodních vrstvách atmosféry je v tab. 1.

		<i>Molekulová</i>	<i>Složení</i>	<i>Složení</i>	<i>Kritická</i>	<b>Kritický</b>
Prvek		hmotnost	podle	podle	teplota	tlak
		[kg/kmol]	objemu	hmotnosti	[°C]	[kPa]
			[%]	[%]		
N <sub>2</sub>	dusík	28,016	78,09	75,5	-147	3393
O <sub>2</sub>	kyslík	32	20,95	23,2	-118,8	4903
Ar	argon	39,944	0,93	1,286	-122	4766
CO <sub>2</sub>	kysličník uhličitý	44,01	0,03	0,046	31,04	7384
Ne	neón	20,183	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	-228,7	2726
He	hélium	4,003	$5,24 \cdot 10^{-4}$	$7,0 \cdot 10^{-5}$	-267,9	228
Kr	krypton	83,8	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	-63,8	5501
Xe	xenon	131,3	$5,0 \cdot 10^{-5}$		-239,9	1274
H <sub>2</sub>	vodík	2,016	$8,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	16,6	5874
O <sub>3</sub>	ozón	48	$1,0 \cdot 10^{-6}$			
<b>Vzduch</b>		29,98			-140,7	3750

Tab. 1: Složení vzduchu ve spodních vrstvách atmosféry

Atmosférický vzduch obsahuje jisté množství vody ve formě syté nebo přehřáté vodní páry, mlhy nebo jinovatky. Jestliže stav páry ve vzduchu odpovídá stavu sytosti, je vzduch vodní párou nasycen (nasycený vzduch, v diagramu „křivka nasycení“).

Všechny základní vztahy se odvozují ze stavové rovnice ideálního plynu a Daltonova zákona.

#### Stavová rovnice ideálního plynu:

Pro 1kg vlhkého vzduchu platí:

$$p = \frac{R}{m_m} \cdot \rho \cdot T$$

Plynová konstanta vlhkého vzduchu o molekulové hmotnosti  $m_m$  je určena poměrem

$$\frac{R}{m_m} = r$$

Střední molekulová hmotnost směsi plynů se určí ze vztahu:

$$\frac{1}{m_m} = \sum \frac{M_i}{m_i}$$

### **Daltonův zákon:**

Celkový tlak směsi plynů  $p$  je dán součtem parciálních (dílkých) tlaků jednotlivých složek  $p_i$ .

$$p = \sum p_i$$

Odchytky parametrů suchého vzduchu od stavové rovnice pro ideální plyny jsou nepatrné. V rozmezí teplot 200 až 500 K a tlaků 0,1 až 1 MPa max. 3%. Pro vodní páru do tlaku 1 kPa (obvyklé parciální tlaky páry v atmosféře) jsou odchytky ještě menší. Proto není nutné při praktických výpočtech s vlhkým vzduchem (v oboru klimatizace, chladicí věže, většinou i sušení) používat jakýchkoli úprav.

Stav vzduchu je určen :

- celkovým tlakem (například barometrickým) [kPa]
- údajem o teplotě vzduchu [°C]
- údajem o vlhkosti vzduchu

Vlhkost vzduchu je určena jednou z následujících hodnot:

- teplota mokrého teploměru [°C]
- teplota rosného bodu [°C]
- relativní vlhkost [%]

Všech pět veličin (tj. tlak, teplota, teplota mokrého teploměru, teplota rosného bodu, relativní vlhkost) se v technické praxi přímo měří. Pro výpočetní praxi je účelná možnost zadání i následujících parametrů:

- měrná vlhkost (např. pro výpočty sušení, klimatizace atd.) [g/kg]
- entalpie vzduchu (např. při řešení izoentalpických procesů). [J/kg]

K výpočtu všech parametrů vlhkého vzduchu stačí mít zadané 3 veličiny, z nichž jednou musí být vždy celkový tlak vzduchu. Dál stačí k zadání kombinace 2 veličin

ze zbývajících šesti (výjimkou je kombinace teploty rosného bodu a měrné vlhkosti). Ostatní lze vypočítat. V programu se vypočítávají další parametry a to:

- měrná hmotnost vzduchu  $[\text{kg}/\text{m}^3]$
- absolutní vlhkost  $[\text{g}/\text{m}^3]$
- parciální tlak vodních par ve vzduchu  $[\text{Pa}]$
- tlak nasycených vodních par při teplotě mokrého teploměru  $[\text{Pa}]$
- výparné či sublimační teplo při teplotě mokrého teploměru  $[\text{kJ}/\text{kg}]$
- entalpie vzduchu při teplotě mokrého teploměru  $[\text{J}/\text{kg}]$
- plynová konstanta vlhkého vzduchu  $[\text{J}/\text{kgK}]$

## 2.2. Definice použitých parametrů vlhkého vzduchu a důležité vztahy

### Celkový tlak vzduchu $p$ $[\text{kPa}]$

Celkový tlak vzduchu  $p$  je podle Daltonova zákona dán součtem parciálních (dílčích) tlaků jednotlivých složek  $p_i$ . U vlhkého vzduchu se počítá se dvěma složkami a to suchým vzduchem (který je sám o sobě směsí již uvedených plynů) a vodní párou.

$$p = p_L + p_D$$

### Teplota vzduchu $t$ $[\text{°C}]$

Teplota obecně charakterizuje tepelný stav hmoty, v našem případě vzduchu. V oboru vlhkého vzduchu se často užívá pojmu teplota suchého teploměru, suchá teplota. Měří se různými druhy teploměrů.

### Teplota mokrého teploměru $t_m$ $[\text{°C}]$

Někdy se v praxi užívá názvu mokrá teplota. Je to teplota, kterou má v rovnovážném stavu teploměr obalený mokrou punčoškou při nuceném proudění vzduchu a dostatečně chráněný proti přestupu tepla sáláním. Tato teplota se blíží fyzikálně definované teplotě mezního adiabatického ochlazení  $t_{ad}$ . Je to teplota vodní lázně, při níž všechno teplo při izobarickém odpařování vody z hladiny je dodáno konvekcí ze vzduchu.

### Teplota rosného bodu $t_r$ $[\text{°C}]$ .

Je to teplota, při níž jsou páry ve vzduchu při izobarickém ochlazení právě syté (vzduch je nasycen). Na povrchu zrcátka, které má přibližně tuto teplotu, nastává kondenzace par. V diagramu  $i$ - $x$  se nalezne teplota rosného bodu v průsečíku příslušné čáry  $x$  pro sledovaný stav vzduchu s křivkou nasycení.

### **Relativní (poměrná) vlhkost vzduchu $\varphi$ [-, %]**

udává, do jaké míry je vzduch nasycen vodními parami. Je definována vztahem

$$\varphi = \frac{\rho_D}{\rho_D''} \doteq \frac{p_D}{p_D''}$$

Na relativní vlhkosti například závisejí rovnovážné vlhkosti navlhavých materiálů, a tím i jejich mechanické vlastnosti. Je to proto rozhodující parametr např. v textilním průmyslu. Této vlastnosti se užívalo i k přímému měření vlhkosti vzduchu, např. vlasovými vlhkoměry.

### **Měrná vlhkost vzduchu (vodní obsah) $x$ [g/kg s.v.].**

Tato veličina udává hmotnost vodní páry v g nebo kg, připadající na hmotnost 1 kg suchého vzduchu (g/kg s.v. nebo kg/kg s.v.). Tato veličina je ve vzduchotechnických výpočtech nejběžnější.

### **Entalpie vzduchu $i$ [J/kg s.v., kJ/kg s.v.]**

Tato fyzikální veličina vyjadřuje tepelnou energii uloženou v 1 kg hmoty, v případě vlhkého vzduchu je tato energie vztažena na 1 kg suchého vzduchu. Tedy stejně jako u měrné vlhkosti se jedná o měrnou jednotku a užívá se to výhodně při vzduchotechnických výpočtech, kde se sleduje 1 kg suchého vzduchu, který obsahuje  $x$  kg vodní páry. Hmotnost suchého vzduchu zůstává totiž při všech úpravách stejná.

Entalpie vlhkého vzduchu se spočte dle vztahu

$$i = 1,01 \cdot t + (2500 + 1,84 \cdot t) \cdot x$$

### **Měrná hmotnost vzduchu $\rho$ [kg/m<sup>3</sup>]**

Tato veličina udává hmotnost 1 m<sup>3</sup> vlhkého vzduchu, pro jehož výpočet se užívá vztahů:

$$\rho = \frac{1,317 \cdot 10^{-3}}{T} \cdot (2,65 \cdot p - \varphi \cdot p_D'')$$

$$\rho = \frac{(1+x) \cdot p}{r_D \cdot T \cdot (0,622 + x)}$$

V programu se výhradně používá právě ten druhý.

### **Absolutní vlhkost vzduchu $\rho_D$ [kg/m<sup>3</sup>]**

Je to hmotnost vodních par v 1 m<sup>3</sup> prostoru neboli měrná hmotnost par  $\rho_D$ . Měří se absorpcí vodních par z přesně určeného objemu vzduchu a jejich vážením. V programu se výhradně vypočítává ze stavové rovnice dle vztahu:

$$\rho_D = \frac{p_D}{r_D \cdot T}$$

### Parciální tlak vodních par ve vzduchu $p_D$ [Pa]

Je vázán s absolutní vlhkostí stavovou rovnicí. Pokud se nemění tlak vzduchu, zůstává při změně teploty stálý. Určuje se nejčastěji nepřímo výpočtem z psychrometrických měření. V programu se počítá různým způsobem, vztahy jsou uvedeny v jednotlivých algoritmech.

### Tlak nasycených vodních par $p''_D$ [Pa]

Je to tlak sytých vodních par pro danou teplotu. V programu je definován na intervalu teplot  $<-83,15; 0>$  funkcí

$$p''_D = 611,657 \cdot e^{\left( b_1 \left( 1 - \frac{T}{273,15} \right)^{-1,5} + b_2 \left( 1 - \frac{T}{273,15} \right)^{-1,25} \right)} \quad (1)$$

kde je  $T=t+273,15$ ,  $b_1=-13,928169$ ,  $b_2=34,7078238$ .

a na intervalu teplot  $<0; 373,946>$  funkcí

$$p''_D = p_0 \cdot e^{\left( \frac{T_C}{T} \left( a_1 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right) + a_2 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right)^{1,5} + a_3 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right)^3 + a_4 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right)^{3,5} + a_5 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right)^4 + a_6 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right)^{7,5} \right) \right)} \quad (2)$$

kde  $p_0=22064000$ ,  $T_C=647,096$ ,  $T=t+273,15$ ,  $a_1=-7,85951783$ ,  $a_2=1,84408259$ ,  $a_3=-11,7866497$ ,  $a_4=22,6807411$ ,  $a_5=-15,9618719$ ,  $a_6=1,80122502$ . Parciální tlak sytých vodních par pro obor teplot  $(-273,15; -83,15)$  nebyl z časových důvodů vyhledán. Pro účely této práce je volen vztah

$$p''_D = 9.15315625476954 \cdot 10^{-7} \cdot (273,15 + t)^2 \quad (3)$$

tak, aby byla zachována přibližně parabolický charakter závislosti.

### Tlak nasycených vodních par při mokré teplotě $p''_{Dm}$ [Pa]

Je to tlak sytých vodních par při teplotě mokrého teploměru a počítá se podle stejných vztahů, jako v předcházejícím bodě.

### Výparné teplo při mokré teplotě $l_m$ [kJ/kg]

Je definováno jako množství tepla, které třeba k odpaření 1 kg vody. V programu se tato hodnota počítá z parních tabulek, kde se odečítá entalpie vody na horní mezní křivce sytosti od entalpie vody na dolní mezní křivce sytosti.

### Sublimační teplo při mokré teplotě $l_E$ [kJ/kg]

Je definováno množstvím tepla potřebného aby se přeměnilo 1 kg vody ze skupenství tuhého na skupenství plynné. Je počítáno (pro minusové teploty) dle vztahu

$$l_E = 2500 + 1,84 \cdot t - l_{13} + c_E \cdot t$$

kde měrné teplo ledu je též funkcí teploty, ale pro účely této práce to bylo zanedbáno.

### **Entalpie vzduchu při mokré teplotě $i''_m$ [J/kg s.v., kJ/kg s.v.]**

Fyzikální význam je stejný jako u již uvedené entalpie vzduchu. Spočte se dle vztahu.

$$i''_m = 1,01 \cdot t_m + (2500 + 1,84 \cdot t_m) \cdot x''_m$$

### **Plynová konstanta vlhkého vzduchu $r$ [J/kgK]**

V programu se počítá podle vztahu:

$$r = \frac{r_L + x \cdot r_D}{1 + x}$$

Ostatní vztahy a závislosti mezi jednotlivými parametry vlhkého vzduchu jsou uvedeny v jednotlivých algoritmech, které byly pro tento program vytvořeny a které jsou uvedeny v kapitole 3.

## **2.3. Mollierův i-x diagram vlhkého vzduchu**

Pro znázorňování změn stavu vzduchu při izobarických dějích se v technické praxi používá diagramů vlhkého vzduchu. Diagramů je celá řada, v našich zemích je nejpoužívanější Mollierův i-x diagram, na který bude v této práci soustředěna pozornost. V těchto diagramech jsou v základních souřadnicích  $i$  a  $x$  vyneseny ostatní veličiny, které charakterizují stav vzduchu (teplota, relativní vlhkost, popř. ještě další veličiny).

Mollierův  $i$ - $x$  diagram bývá konstruován tak, aby v kosoúhlé souřadnicové síti  $i$ - $x$  měla izoterma  $t_{\max}$  směr kolmý k čarám  $x = \text{konst}$ . Diagram se konstruoval dosud převážně v kosoúhlé síti s úhlem  $135^\circ$ . V této práci je sice volba úhlu souřadnicové sítě připravena, ale vzhledem k vykreslování diagramu v Excelu se úhel automaticky nastavuje podle zvoleného rozsahu teplot a měrných vlhkostí.

### **Sestrojení i-x diagramu**

Pro sestavení diagramu jsou důležité tyto parametry: modul  $\alpha$  pro vnesení souřadnicové sítě čar  $x = \text{konst}$ , modul  $\beta$  pro vynášení souřadnicové sítě čar  $i = \text{konst}$  a úhel kosoúhlé sítě  $\gamma$ . Všechny tyto veličiny je možno volit, obvykle však tak, že se



volí  $\alpha$  (např.  $0,001 \text{ kg/kg} = 2 \text{ cm}$ , tedy  $\alpha = 2000$ ), dále úhel  $\gamma = 135^\circ$ . Modul pro izoentalpy se získává z jiné podmínky, např., aby zvolená izoterma (v našem případě  $t_{\max}$ ) měla určitý směr. I volba modulu  $\alpha$  je v této práci připravena, ale z důvodů stejných jako v případě úhlu kosohlé sítě se nevyužije.

Směr v kosohlé síti  $i$ - $x$  udává poměr

$$\delta = \frac{di}{dx}$$

který odpovídá tangentě převedené do kosohlých souřadnic Směr přímky lze psát

$$\delta = \frac{\Delta i}{\Delta x}$$

kde  $\Delta i$  a  $\Delta x$  jsou konečné vzdálenosti dvou bodů ležících na přímce, která má směr  $\delta$ . Směry  $\delta$  se označují jako směrové měřítko, někdy také jako okrajové měřítko, vzhledem k tomu, že jsou vyneseny na okraji diagramů. V této práci se směrové měřítko nevykresluje, protože při použití výpočtů parametrů vzduchu na PC se oslabuje jeho potřeba.

Izotermy se vynášejí do diagramu podle rovnice pro entalpii vzduchu. Jejich směr se určí derivací

$$\delta = \frac{di}{dx} = i_D = (2500 + 1,84 \cdot t) \cdot 10^3$$

Jak je zřejmé z rovnice nejsou izotermy rovnoběžné, ale mírně se rozbíhají (se vzrůstajícím  $t$  vzrůstá  $i$  a  $\delta$ ). Toto rozbíhání je však v oblasti teplot do  $50^\circ\text{C}$  jen nepatrné. Podstatné je až při teplotách nad  $100^\circ\text{C}$ . Na křivce nasycení se izotermy lámou a mají směr přibližně  $i = \text{konst.}$  V této práci se pro izotermy směrové měřítko nepoužívá, ale spočítají se souřadnice krajních bodů úsečky izotermy (tj. pro  $x=0$  a pro  $x = x''$ ).

Křivka nasycení vzduchu a křivky stálých relativních vlhkostí se do  $i$ - $x$  diagramu vynášejí bod po bodu podle vztahu

$$p_D = p \cdot \frac{x}{0,622 + x}$$

Ze vztahu je zřejmé, že pro konstrukci je třeba volit celkový tlak vzduchu  $p$ , který se mění jednak s povětrnostními podmínkami, jednak s nadmořskou výškou. Poloha křivky nasycení vzduchu se tedy mění s celkovým tlakem.

Při stejné měrné vlhkosti před změnou tlaku a po ní musí být  $x_1 = x_2$ , tedy

$$0,622 \cdot \frac{\varphi_1 \cdot p_D''}{p_1 - \varphi_1 \cdot p_D''} = 0,622 \cdot \frac{\varphi_2 \cdot p_D''}{p_2 - \varphi_2 \cdot p_D''}$$

a po úpravě

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

Se zvyšujícím se tlakem při zachování stálé hodnoty  $x$  relativní vlhkost vzduchu stoupá. Pro určení křivky nasycení  $\varphi_2=1$  při tlaku  $p_2$  dostáváme z rovnice

$$\varphi_1 = \frac{p_1}{p_2}$$

Je-li tedy např. pro konstrukci  $i-x$  diagramu vzato  $p_1 = 100$  kPa, bude  $\varphi_1 \cdot p_1 = 100$ . Pro tlak  $p_2=500$ kPa je tedy křivkou nasycení  $\varphi_1 = 0,2$ .

## 2.4. Termodynamické vlastnosti vodní páry na mezi sytosti

Při výpočtu vlhkého vzduchu se používají hodnoty tlaku sytých vodních par a výparného tepla. Tyto hodnoty se vyhledávají běžně v parních tabulkách. V této práci byly použity výpočtové vztahy uvedené v literatuře č. [2]. Kromě stanovení tlaku sytých vodních par jsou zde uvedeny výpočtové vztahy pro výpočet hustoty, entalpie a entropie syté kapaliny a syté páry. Všechny tyto fyzikální veličiny jsou v této práci uvedeny v parních tabulkách.

## 3. Algoritmy výpočtu parametrů vlhkého vzduchu

### 3.1. Poznámky k algoritmům

Každý algoritmus je vytvořen pro určité tři parametry vlhkého vzduchu z nichž jedna je vždy hodnota celkového tlaku. Tyto tři parametry (které např. uživatel naměřil) slouží k výpočtu zbývajících parametrů. V programu jsou postupy při výpočtech dané právě těmito algoritmy.

Výpočtové vztahy mezi fyzikálními veličinami vlhkého vzduchu jsou jak již bylo uvedeno převzaty z literatury č.[1] a stejné vztahy v každém algoritmu jsou znovu uváděny.

Omezující podmínky fyzikálních veličin jsou dané rozsahem teplot od  $-83^\circ\text{C}$  do  $120^\circ\text{C}$ , pro které existují dostatečně přesné výpočtové vztahy a v kterém se fyzikální konstanty (např. měrné teplo) v závislosti na teplotě příliš nemění. Horní hranice měrné vlhkosti  $x$  byla volena 100g/kg s.v.

### 3.2. Algoritmus pro zadané hodnoty $p$ , $t_s$ , $t_m$

**Podmínky:  $p$ ,  $t_s$ ,  $t_m$  musí být v daných mezích**

- 1) Pro  $t_s$  se spočte tlak nasycených par  $p_D$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

**Podmínky:  $p_D$  nesmí být vyšší než zadaný tlak  $p$ .**

- 2) Vytvoří se tabulka měrných vlhkostí  $x''$  a entalpií  $i''$  nasyceného vzduchu pro teploty  $t$  přicházející v úvahu při výpočtu vlhkého vzduchu. Vztahy jsou následující:

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{p_D''}{p - p_D''}$$

$$i'' = 1,01 \cdot t + (2500 + 1,84 \cdot t) \cdot x''$$

- 3) Tlak nasycených parciálních par  $p_D$  se spočte pro volenou teplotu  $t$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.
- 4) Parciální tlak vodních par ve vzduchu  $p_D$  se spočte ze Sprungrovy rovnice

$$p_D = p_{Dm}'' - A_{ad} \cdot p \cdot (t - t_m)$$

kde

$$A_{ad} = \frac{c_L + x_m'' \cdot c_D}{(c_D - 1,61 \cdot c_L) \cdot (0,622 + x_m'') \cdot (t_s - t_m) + l_m \cdot (0,622 + 2 \cdot x_m'' + 1,61 \cdot x_m''^2)}$$

$x_m''$  se najde v tabulce,  $l_m$  se najde v tabulce pro teplotu  $t_m$ .

**Podmínky:  $p_D$  nesmí být vyšší než zadaný tlak  $p$ ,  $p_D$  nesmí být menší než 0.**

- 5) Relativní vlhkost vzduchu  $\varphi$  se spočte:

$$\varphi = \frac{p_D}{p_D''}$$

- 6) Měrná vlhkost vzduchu  $x$  se spočte:

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_D}{p - p_D}$$

- 7) Měrná hmotnost vlhkého vzduchu  $\rho$ :

$$\rho = \frac{(1 + x) \cdot p}{r_D \cdot T_s \cdot (0,622 + x)}$$

- 8) Pro  $p_D$  se spočte teplota rosného bodu  $t_r$  podle algoritmu znázorněném v příloze B.

- 9) Spočte se entalpie vzduchu  $i$ :

$$i = 1,01 \cdot t_s + (2500 + 1,84 \cdot t_s) \cdot x$$

10) Absolutní vlhkost neboli měrná hmotnost vodních par  $\rho_D$ :

$$\rho_D = \frac{p_D}{r_D \cdot T_s}$$

11) Entalpie  $i''_m$  při mokré teplotě vzduchu  $t_m$  se spočte dle vztahu

$$i''_m = 1,01 \cdot t_m + (2500 + 1,84 \cdot t_m) \cdot x''_m$$

12) Plynová konstanta se spočte dle vztahu

$$r = \frac{r_L + x \cdot r_D}{1 + x}$$

### 3.3. Algoritmus pro zadané hodnoty $p$ , $t_s$ , $t_r$

**Podmínky:  $p$ ,  $t_s$ ,  $t_r$  musí být v daných mezích.**

- 1) Pro  $t_s$  se spočte tlak nasycených par  $p_D''$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.
- 2) Pro teplotu  $t_r$  se spočte parciální tlak vodních par ve vzduchu  $p_D$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

**Podmínky:  $p_D$  nesmí být vyšší než zadaný tlak  $p$ .**

3) Relativní vlhkost vzduchu  $\varphi$  se spočte:

$$\varphi = \frac{p_D}{p_D''}$$

4) Měrná vlhkost vzduchu  $x$  se spočte

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_D}{p - p_D}$$

5) Měrná hmotnost vlhkého vzduchu  $\rho$ :

$$\rho = \frac{(1 + x) \cdot p}{r_D \cdot T_s \cdot (0,622 + x)}$$

6) Spočte se entalpie vzduchu  $i$ :

$$i = 1,01 \cdot t_s + (2500 + 1,84 \cdot t_s) \cdot x$$

7) Absolutní vlhkost neboli měrná hmotnost vodních par  $\rho_D$ :

$$\rho_D = \frac{p_D}{r_D \cdot T_s}$$

8) Vytvoří se tabulka měrných vlhkostí  $x''$  a entalpií  $i''$  nasyceného vzduchu pro teploty  $t$  přicházející v úvahu při výpočtu vlhkého vzduchu. Vztahy jsou následující:

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{P_D''}{P - P_D''}$$

$$i'' = 1,01 \cdot t + (2500 + 1,84 \cdot t) \cdot x''$$

9) Tlak nasycených parciálních par  $p''_D$  se spočte podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

10) Pro entalpii  $i''=i$  se najde z právě vytvořené tabulky teplota  $t_{ad}$ . Pro tuto  $t_{ad}$  se spočte parciální tlak  $p''_D$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2, ze kterého se vypočte měrná vlhkost podle vzorce

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{P_D''}{P - P_D''}$$

Nově se vypočte entalpie nasyceného vzduchu  $i''$  podle vzorce

$$i'' = i - c_w \cdot t_{ad} \cdot (x - x'')$$

Pro tuto entalpii  $i''$  se najde nová teplota  $t_{ad}$ , která se porovná s touto teplotou předcházející. Je-li rozdíl mezi nimi menší než stanovená hranice (v programu 0,000001°C), položí se  $t_{ad} = t_m$ . Je-li rozdíl mezi novou a starou  $t_{ad}$  větší než tato hranice znovu se opakuje poslední bod. Tento cyklu se opakuje tak dlouho, dokud není rozdíl posledních dvou teplot  $t_{ad}$  menší než stanovená hranice. Potom se položí  $t_{ad} = t_m$ . Výsledkem je teplota mokrého teploměru  $t_m$ .

11) Pro teplotu  $t_m$  se najde v parních tabulkách výparné teplo vody  $l_m$  při mokré teplotě. Je-li  $t_m < 0^\circ\text{C}$  kapalná fáze vody neexistuje, tudíž se výparné teplo nehledá, ale uvede se teplo sublimační podle vztahu

$$l_E = 2500 + 1,84 \cdot t - l_{13} + c_E \cdot t$$

12) Pro  $t_m$  se spočte tlak nasycených vodních par při mokré teplotě  $p''_{Dm}$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2. a vypočte  $x''_m$  dle vzorce:

$$x''_m = 0,622 \cdot \frac{P''_{Dm}}{P - P''_{Dm}}$$

13) Entalpie  $i''_m$  při mokré teplotě vzduchu  $t_m$  se spočte dle vztahu

$$i''_m = 1,01 \cdot t_m + (2500 + 1,84 \cdot t_m) \cdot x''_m$$

14) Plynová konstanta se spočte dle vztahu

$$r = \frac{r_L + x \cdot r_D}{1 + x}$$

### 3.4. Algoritmus pro zadané hodnoty $p$ , $t_s$ , $\varphi$

**Podmínky:  $p$ ,  $t_s$ ,  $\varphi$  musí být v daných mezích**

- 1) Pro  $t_s$  se spočte tlak nasycených par  $p_D$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

**Podmínky:  $p_D$  nesmí být větší než zadaný tlak**

- 2) Parciální tlak vodních par ve vzduchu  $p_D$  se spočte:

$$p_D = \varphi \cdot p_D''$$

**Podmínky:  $p_D$  nesmí být větší než zadaný tlak**

- 3) Měrná vlhkost vzduchu  $x$  se spočte

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_D}{p - p_D}$$

- 4) Měrná hmotnost vlhkého vzduchu  $\rho$ :

$$\rho = \frac{(1+x) \cdot p}{r_D \cdot T_s \cdot (0,622+x)}$$

- 5) Pro  $p_D$  se spočte teplota rosného bodu  $t_r$  podle algoritmu znázorněném v příloze B.

- 6) Spočte se entalpie vzduchu  $i$ :

$$i = 1,01 \cdot t_s + (2500 + 1,84 \cdot t_s) \cdot x$$

- 7) Absolutní vlhkost neboli měrná hmotnost vodních par  $\rho_D$ :

$$\rho_D = \frac{p_D}{r_D \cdot T_s}$$

- 8) Vytvoří se tabulka měrných vlhkostí  $x''$  a entalpií  $i''$  nasyceného vzduchu pro teploty  $t$  přicházející v úvahu při výpočtu vlhkého vzduchu. Vztahy jsou následující:

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{p_D''}{p - p_D''}$$

$$i'' = 1,01 \cdot t + (2500 + 1,84 \cdot t) \cdot x''$$

Tlak nasycených parciálních par  $p_D$  se spočte pro volenou teplotu  $t$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

- 9) Pro entalpii  $i'' = i$  se najde z právě vytvořené tabulky nasyceného vzduchu teplota  $t_{ad}$ . Pro tuto  $t_{ad}$  se spočte parciální tlak  $p_D$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2., z kterého se vypočte měrná vlhkost podle vzorce

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{p_D''}{p - p_D''}$$

Nově se vypočte entalpie nasyceného vzduchu  $i''$  podle vzorce

$$i'' = i - c_w \cdot t_{ad} \cdot (x - x'')$$

Pro tuto entalpii  $i''$  se najde nová teplota  $t_{ad}$ , která se porovná s touto teplotou předcházející. Je-li rozdíl mezi nimi menší než stanovená hranice (v programu  $0,000001^\circ\text{C}$ ), položí se  $t_{ad} = t_m$ . Je-li rozdíl mezi novou a starou  $t_{ad}$  větší než tato hranice znovu se opakuje poslední bod. Tento cyklu se opakuje tak dlouho, dokud není rozdíl posledních dvou teplot  $t_{ad}$  menší než stanovená hranice. Potom se položí  $t_{ad} = t_m$ . Výsledkem je teplota mokrého teploměru  $t_m$ .

- 10) Pro teplotu  $t_m$  se najde v parních tabulkách výparné teplo vody  $l_m$  při mokré teplotě. Je-li  $t_m < 0^\circ\text{C}$  kapalná fáze vody neexistuje, tudíž se výparné teplo nehledá, ale uvede se teplo sublimační podle vztahu

$$l_E = 2500 + 1,84 \cdot t - l_{13} + c_E \cdot t$$

- 11) Pro  $t_m$  se spočte tlak nasycených vodních par při mokré teplotě  $p_{Dm}''$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2. a vypočte se  $x''_m$  dle vzorce:

$$x''_m = 0,622 \cdot \frac{p_{Dm}''}{p - p_{Dm}''}$$

- 12) Entalpie  $i''_m$  při mokré teplotě vzduchu  $t_m$  se spočte dle vztahu

$$i''_m = 1,01 \cdot t_m + (2500 + 1,84 \cdot t_m) \cdot x''_m$$

- 13) Plynová konstanta se spočte dle vztahu

$$r = \frac{r_L + x \cdot r_D}{1 + x}$$

### 3.5. Algoritmus pro zadané hodnoty $p$ , $t_s$ , $x$

**Podmínky:  $p$ ,  $t_s$ ,  $x$  musí být v daných mezích**

- 1) Pro  $t_s$  se spočte tlak nasycených par  $p_D''$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

Parciální tlak vodních par ve vzduchu  $p_D$  se spočte dle vztahu

$$p_D = p \cdot \frac{x}{0,622 + x}$$

**Podmínky:  $p_D$  nesmí být vyšší než zadaný tlak  $p$ .**

- 2) Relativní vlhkost vzduchu  $\phi$  se spočte dle vztahu

$$\varphi = \frac{p_D}{p_D''}$$

**Podmínky: Vyjde-li  $\varphi > 1$ , zadaná měrná vlhkost  $x$  je příliš velká.**

3) Pro  $p_D$  se spočte teplota rosného bodu  $t_r$  podle algoritmu znázorněném v příloze B.

4) Měrná hmotnost vlhkého vzduchu  $\rho$ :

$$\rho = \frac{(1+x) \cdot p}{r_D \cdot T_s \cdot (0,622+x)}$$

5) Spočte se entalpie vzduchu  $i$ :

$$i = 1,01 \cdot t_s + (2500 + 1,84 \cdot t_s) \cdot x$$

6) Absolutní vlhkost neboli měrná hmotnost vodních par  $\rho_D$ :

$$\rho_D = \frac{p_D}{r_D \cdot T_s}$$

7) Vytvoří se tabulka měrných vlhkostí  $x''$  a entalpií  $i''$  nasyceného vzduchu pro teploty  $t$  přicházející v úvahu při výpočtu vlhkého vzduchu. Vztahy jsou následující:

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{p_D''}{p - p_D''}$$

$$i'' = 1,01 \cdot t + (2500 + 1,84 \cdot t) \cdot x''$$

8) Tlak nasycených parciálních par  $p_D''$  se spočte pro volenou teplotu  $t$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

9) Pro entalpii  $i'' = i$  se najde z právě vytvořené tabulky nasyceného vzduchu teplota  $t_{ad}$ . Pro tuto  $t_{ad}$  se spočte parciální tlak  $p_D''$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2, z kterého se vypočte měrná vlhkost podle vzorce

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{p_D''}{p - p_D''}$$

Nově se vypočte entalpie nasyceného vzduchu  $i''$  podle vzorce

$$i'' = i - c_w \cdot t_{ad} \cdot (x - x'')$$

Pro tuto entalpii  $i''$  se najde nová teplota  $t_{ad}$ , která se porovná s touto teplotou předcházející. Je-li rozdíl mezi nimi menší než stanovená hranice (v programu 0,000001°C), položí se  $t_{ad} = t_m$ . Je-li rozdíl mezi novou a starou  $t_{ad}$  větší než tato hranice znovu se opakuje poslední bod. Tento cyklu se opakuje tak dlouho, dokud



není rozdíl posledních dvou teplot  $t_{ad}$  menší než stanovená hranice. Potom se položí  $t_{ad} = t_m$ . Výsledkem je teplota mokrého teploměru  $t_m$ .

- 10) Pro teplotu  $t_m$  se najde v parních tabulkách výparné teplo vody  $l_m$  při mokré teplotě. Je-li  $t_m < 0^\circ\text{C}$  kapalná fáze vody neexistuje, tudíž se výparné teplo nehledá, ale uvede se teplo sublimační podle vztahu

$$l_E = 2500 + 1,84 \cdot t - l_{13} + c_E \cdot t$$

- 11) Pro  $t_m$  se spočte tlak nasycených vodních par při mokré teplotě  $p''_{Dm}$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2 a vypočte se  $x''_m$  dle vzorce:

$$x''_m = 0,622 \cdot \frac{p''_{Dm}}{p - p''_{Dm}}$$

- 12) Entalpie  $i''_m$  při mokré teplotě vzduchu  $t_m$  se spočte dle vztahu

$$i''_m = 1,01 \cdot t_m + (2500 + 1,84 \cdot t_m) \cdot x''_m$$

- 13) Plynová konstanta se spočte dle vztahu

$$r = \frac{r_L + x \cdot r_D}{1 + x}$$

### 3.6. Algoritmus pro zadané hodnoty $p$ , $t_s$ , $i$

**Podmínky:  $p$ ,  $t_s$ ,  $i$  musí být v daných mezích.**

- 1) Pro  $t_s$  se spočte tlak nasycených par  $p_D''$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

**Podmínky:  $p_D''$  nesmí být větší než zadaný tlak  $p$ .**

- 2) Spočte se měrná vlhkost nasycených par při teplotě  $t_s$  podle vztahu

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{p_D''}{p - p_D''}$$

- 3) Měrná vlhkost  $x$  se spočte dle vztahu

$$x = \frac{i - 1,01 \cdot t_s}{2500 + 1,84 \cdot t_s}$$

**Podmínky: měrná vlhkost  $x$  musí být v daných mezích.**

- 4) Parciální tlak vodních par ve vzduchu  $p_D$  se spočte dle vztahu

$$p_D = p \cdot \frac{x}{0,622 + x}$$

**Podmínky:  $p_D$  nesmí být větší než zadaný tlak  $p$ .**

- 5) Relativní vlhkost vzduchu  $\phi$  se spočte dle vztahu

$$\varphi = \frac{p_D}{p_D''}$$

**Podmínky: Relativní vlhkost vzduchu nesmí být větší než 1.**

6) Pro  $p_D$  se spočte teplota rosného bodu  $t_r$  podle algoritmu znázorněném v příloze B.

7) Měrná hmotnost vlhkého vzduchu  $\rho$  :

$$\rho = \frac{(1+x) \cdot p}{r_D \cdot T_s \cdot (0,622+x)}$$

8) Absolutní vlhkost neboli měrná hmotnost vodních par  $\rho_D$ :

$$\rho_D = \frac{p_D}{r_D \cdot T_s}$$

9) Vytvoří se tabulka měrných vlhkostí  $x''$  a entalpií  $i''$  nasyceného vzduchu pro teploty  $t$  přicházející v úvahu při výpočtu vlhkého vzduchu. Vztahy jsou následující:

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{p_D''}{p - p_D''}$$

$$i'' = 1,01 \cdot t + (2500 + 1,84 \cdot t) \cdot x''$$

10) Tlak nasycených parciálních par  $p_D''$  se spočte pro volenou teplotu  $t$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

11) Pro entalpii  $i'' = i$  se najde z právě vytvořené tabulky nasyceného vzduchu teplota  $t_{ad}$ . Pro tuto  $t_{ad}$  se spočte parciální tlak  $p_D''$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2, z kterého se vypočte měrná vlhkost podle vzorce

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{p_D''}{p - p_D''}$$

Nově se vypočte entalpie nasyceného vzduchu  $i''$  podle vzorce

$$i'' = i - c_w \cdot t_{ad} \cdot (x - x'')$$

Pro tuto entalpii  $i''$  se najde nová teplota  $t_{ad}$ , která se porovná s touto teplotou předcházející. Je-li rozdíl mezi nimi menší než stanovená hranice (v programu 0,000001°C), položí se  $t_{ad} = t_m$ . Je-li rozdíl mezi novou a starou  $t_{ad}$  větší než tato hranice znovu se opakuje poslední bod. Tento cyklu se opakuje tak dlouho, dokud není rozdíl posledních dvou teplot  $t_{ad}$  menší než stanovená hranice. Potom se položí  $t_{ad} = t_m$ . Výsledkem je teplota mokrého teploměru  $t_m$ .

- 12) Pro teplotu  $t_m$  se najde v parních tabulkách výparné teplo vody  $l_m$  při mokré teplotě. Je-li  $t_m < 0^\circ\text{C}$  kapalná fáze vody neexistuje, tudíž se výparné teplo nehledá, ale uvede se teplo sublimační podle vztahu

$$l_E = 2500 + 1,84 \cdot t - l_{13} + c_E \cdot t$$

- 13) Pro  $t_m$  se spočte tlak nasycených vodních par při mokré teplotě  $p''_{Dm}$  podle vztahů (1), (2), (3) znázorněných v kapitole 2.2 a vypočte se  $x''_m$  dle vzorce:

$$x''_m = 0,622 \cdot \frac{p''_{Dm}}{p - p''_{Dm}}$$

- 14) Entalpie  $i''_m$  při mokré teplotě vzduchu  $t_m$  se spočte dle vztahu

$$i''_m = 1,01 \cdot t_m + (2500 + 1,84 \cdot t_m) \cdot x''_m$$

- 15) Plynová konstanta se spočte dle vztahu

$$r = \frac{r_L + x \cdot r_D}{1 + x}$$

### 3.7. Algoritmus pro zadané hodnoty $p$ , $t_m$ , $t_r$

**Podmínky:  $p$ ,  $t_m$ ,  $t_r$  musí být v daných mezích.**

- 1) Pro mokrou teplotu  $t_m$  se najde v parních tabulkách tlak výparné teplo  $l_m$ . Je-li  $t_m < 0^\circ\text{C}$  kapalná fáze vody neexistuje, tudíž se výparné teplo nehledá, ale uvede se teplo sublimační podle vztahu

$$l_E = 2500 + 1,84 \cdot t - l_{13} + c_E \cdot t$$

- 2) Pro mokrou teplotu  $t_m$  se spočte tlak nasycených par  $p''_{Dm}$  při mokré teplotě podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

**Podmínky:  $p''_{Dm}$  nesmí být vyšší než zadaný tlak  $p$ .**

- 3) Měrná vlhkost vzduchu  $x''_m$  při mokré teplotě se spočte dle vztahu

$$x''_m = 0,622 \cdot \frac{p''_{Dm}}{p - p''_{Dm}}$$

- 4) Pro teplotu rosného bodu  $t_r$  se spočte parciální tlak vodních par ve vzduchu  $p_D$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2..

**Podmínky:  $p_D$  nesmí být vyšší než zadaný tlak  $p$ .**

- 5) Měrná vlhkost vzduchu  $x$  se spočte dle vzorce

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_D}{p - p_D}$$

- 6) Entalpie  $i''_m$  při mokré teplotě vzduchu  $t_m$  se spočte dle vztahu

$$i_m'' = 1,01 \cdot t_m + (2500 + 1,84 \cdot t_m) \cdot x_m''$$

- 7) Entalpie vzduchu  $i$  se spočte dle vzorce pro výpočet mezního adiabatického ochlazení

$$i = i_m'' + c_w \cdot t_m \cdot (x - x_m'')$$

- 8) Teplota vzduchu  $t_s$  se spočte ze vzorce pro výpočet entalpie

$$t_s = \frac{i - 2500 \cdot x}{1,01 + 1,84 \cdot x}$$

**Podmínky: Vyjde-li  $t_s > 373,9^\circ\text{C}$  zadaná hodnota  $t_m$  je příliš velká nebo  $t_r$  je příliš malá.**

- 9) Pro teplotu  $t_s$  se spočte tlak nasycených par  $p_D$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

- 10) Relativní vlhkost vzduchu  $\varphi$  se spočte dle vztahu

$$\varphi = \frac{p_D}{p_D''}$$

**Podmínky: Relativní vlhkost nesmí být vyšší než 1.**

- 11) Měrná hmotnost vlhkého vzduchu  $\rho$  :

$$\rho = \frac{(1+x) \cdot p}{r_D \cdot T_s \cdot (0,622+x)}$$

- 12) Absolutní vlhkost neboli měrná hmotnost vodních par  $\rho_D$ :

$$\rho_D = \frac{p_D}{r_D \cdot T_s}$$

- 13) Plynová konstanta se spočte dle vztahu

$$r = \frac{r_L + x \cdot r_D}{1+x}$$

### 3.8. Algoritmus pro zadané hodnoty $p$ , $t_m$ , $\varphi$

**Podmínky:  $p$ ,  $t_m$ ,  $\varphi$  musí být v daných mezích.**

- 1) Pro mokrou teplotu  $t_m$  se najde v parních tabulkách tlak výparné teplo  $l_m$ . Je-li  $t_m < 0^\circ\text{C}$  kapalná fáze vody neexistuje, tudíž se výparné teplo nehledá, ale uvede se teplo sublimační podle vztahu

$$l_E = 2500 + 1,84 \cdot t - l_{13} + c_E \cdot t$$

- 2) Pro mokrou teplotu  $t_m$  se spočte tlak nasycených par  $p_D$  při mokré teplotě podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

**Podmínky: tlak nasycených par nesmí být větší než zadaný tlak p.**

- 3) Měrná vlhkost vzduchu  $x''_m$  při mokré teplotě se spočte dle vztahu

$$x''_m = 0,622 \cdot \frac{p''_{Dm}}{p - p''_{Dm}}$$

- 4) Entalpie  $i''_m$  při mokré teplotě vzduchu  $t_m$  se spočte dle vztahu

$$i''_m = 1,01 \cdot t_m + (2500 + 1,84 \cdot t_m) \cdot x''_m$$

- 5) Vytvoří se tabulka, kde se pro měrné vlhkosti  $0 \leq x \leq x''_m$  rozdělené po určitém kroku (v programu 0,00001 g/kg s.v.) spočte parciální tlak  $p_D$  dle vztahu

$$p_D = \frac{p \cdot x}{0,622 + x}$$

teplota  $t$  dle vztahu

$$t = \frac{i''_m + c_w \cdot t_m \cdot (x - x''_m) - 2500 \cdot x}{1,01 + 1,84 \cdot x}$$

(pokud teplota  $t < -83,15^\circ\text{C}$  nebo  $t > 373,9^\circ\text{C}$  zadané hodnoty je třeba revidovat) a pro teplotu  $t$  tlak nasycených vodních par  $p''_D$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2. V posledním sloupci je relativní vlhkost  $\varphi$  spočtená dle vztahu

$$\varphi = \frac{p_D}{p''_D}$$

- 6) Porovná se spočtená  $\varphi$  se zadanou relativní vlhkostí  $\varphi$ . Tam kde se obě hodnoty shodují (případně se provede interpolace) se zjistí z právě vytvořené tabulky měrná vlhkost vzduchu  $x$ , parciální tlak vodních par ve vzduchu  $p_D$ , suchá teplota vzduchu  $t_s$  a  $p_{Dm}$

**Podmínky:  $p_D$  nesmí být větší než zadaný tlak p, teplota nesmí být menší než -83,15 nebo větší než 373,9 stupňů.**

- 7) V parních tabulkách se spočte pro tlak nasycených par  $p_D$  teplota rosného bodu vzduchu  $t_r$  podle algoritmu znázorněném v příloze B.

Spočte se entalpie vzduchu  $i$ :

$$i = 1,01 \cdot t_s + (2500 + 1,84 \cdot t_s) \cdot x$$

- 8) Měrná hmotnost vlhkého vzduchu  $\rho$ :

$$\rho = \frac{(1+x) \cdot p}{r_D \cdot T_s \cdot (0,622+x)}$$

- 9) Absolutní vlhkost neboli měrná hmotnost vodních par  $\rho_D$ :

$$\rho_D = \frac{p_D}{r_D \cdot T_s}$$

10) Plynová konstanta se spočte dle vztahu

$$r = \frac{r_L + x \cdot r_D}{1 + x}$$

### 3.9. Algoritmus pro zadané hodnoty p, t<sub>m</sub>, x

**Podmínky: p, t<sub>m</sub>, x musí být v daných mezích.**

1) Pro mokrou teplotu t<sub>m</sub> se najde v parních tabulkách tlak výparné teplo l<sub>m</sub>. Je-li t<sub>m</sub> < 0°C kapalná fáze vody neexistuje, tudíž se výparné teplo nehledá, ale uvede se teplo sublimační podle vztahu

$$l_E = 2500 + 1,84 \cdot t - l_{13} + c_E \cdot t$$

2) Pro mokrou teplotu t<sub>m</sub> se spočte tlak nasycených par p<sub>Dm</sub> při mokré teplotě podle vztahů (1), (2), (3) znázorněných v kapitole 2.2.

**Podmínky: tlak nasycených par nesmí být větší než zadaný tlak p.**

3) Měrná vlhkost vzduchu x<sub>m</sub> při mokré teplotě se spočte dle vztahu

$$x_m'' = 0,622 \cdot \frac{p_{Dm}''}{p - p_{Dm}''}$$

4) Tlak nasycených par p<sub>D</sub> ve vzduchu se spočte dle vztahu

$$p_D = \frac{p \cdot x}{0,622 + x}$$

**Podmínky: p<sub>D</sub> nesmí být vyšší než zadaný tlak p.**

5) Pro tlak nasycených par p<sub>D</sub> se spočte teplota rosného bodu t<sub>r</sub> podle algoritmu znázorněném v příloze B.

6) Entalpie i<sub>m</sub>'' při mokré teplotě vzduchu t<sub>m</sub> se spočte dle vztahu

$$i_m'' = 1,01 \cdot t_m + (2500 + 1,84 \cdot t_m) \cdot x_m''$$

7) Entalpie vzduchu i se spočte dle vzorce pro výpočet mezního adiabatického ochlazení.

$$i = i_m'' + c_w \cdot t_m \cdot (x - x_m'')$$

8) Suchá teplota vzduchu t<sub>s</sub> se spočte ze vzorce pro výpočet entalpie

$$t_s = \frac{i - 2500 \cdot x}{1,01 + 1,84 \cdot x}$$

**Podmínky: Vyjde-li  $t_s > 373,9^\circ\text{C}$  zadaná hodnota  $t_m$  je velká nebo  $x$  je příliš malá.**

9) Pro teplotu  $t_s$  se spočte tlak nasycených par  $p''_D$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

10) Relativní vlhkost vzduchu  $\varphi$  se spočte dle vztahu

$$\varphi = \frac{p_D}{p''_D}$$

**Podmínky: Vyjde-li  $\varphi > 1$ , zadaná měrná vlhkost  $x$  je příliš velká.**

11) Měrná hmotnost vlhkého vzduchu  $\rho$  :

$$\rho = \frac{(1+x) \cdot p}{r_D \cdot T_s \cdot (0,622+x)}$$

12) Absolutní vlhkost neboli měrná hmotnost vodních par  $\rho_D$ :

$$\rho_D = \frac{p_D}{r_D \cdot T_s}$$

13) Plynová konstanta se spočte dle vztahu

$$r = \frac{r_L + x \cdot r_D}{1+x}$$

### 3.10. Algoritmus pro zadané hodnoty $p$ , $t_m$ , $i$

**Podmínky:  $p$ ,  $t_m$ ,  $i$  musí být v daných mezích.**

1) Pro teplotu  $t_m$  se spočte tlak nasycených par  $p''_{Dm}$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

**Podmínky: Tlak nasycených par nesmí být vyšší než zadaný tlak  $p$ .**

2) Spočte se měrná vlhkost  $x''_m$  při teplotě  $t_m$  na mezi sytosti vodních par dle vztahu

$$x''_m = 0,622 \cdot \frac{p''_{Dm}}{p - p''_{Dm}}$$

3) Spočte se entalpie  $i''_m$  při mokré teplotě  $t_m$  na mezi sytosti vodních par dle vztahu

$$i''_m = 1,01 \cdot t_m + (2500 + 1,84 \cdot t_m) \cdot x''_m$$

4) Spočte se pomocná hodnota entalpie pro  $x=0$  podle vztahu

$$i_{pom} = i''_m - c_w \cdot t_m \cdot x''_m$$

**Podmínky: absolutní hodnota  $i_{\text{pom}}$  nesmí být vyšší než entalpie, absolutní hodnota entalpie nesmí být vyšší než absolutní hodnota entalpie při mokré teplotě.**

5) Spočte se měrná vlhkost vzduchu  $x$  dle vztahu

$$x = \frac{i + c_w \cdot t_m \cdot x_m'' - i_m''}{c_w \cdot t_m}$$

**Podmínky:  $x$  nesmí být menší než 0 a větší než  $x_m''$ .**

6) Parciální tlak vodních par ve vzduchu  $p_D$  se spočte dle vztahu

$$p_D = p \cdot \frac{x}{0,622 + x}$$

7) Suchá teplota vzduchu  $t_s$  se spočte dle vztahu

$$t_s = \frac{i - 2500 \cdot x}{1,01 + 1,84 \cdot x}$$

**Podmínky: teplota nesmí být vyšší než 373,9 stupňů.**

8) Pro  $p_D$  se spočte teplota rosného bodu  $t_r$  podle algoritmu znázorněném v příloze B.

9) Pro  $t_s$  se spočte tlak nasycených par  $p_D''$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

10) Relativní vlhkost vzduchu  $\varphi$  se spočte:

$$\varphi = \frac{p_D}{p_D''}$$

**Podmínky:  $\varphi$  nesmí být větší než 1.**

11) Měrná hmotnost vlhkého vzduchu  $\rho$  :

$$\rho = \frac{(1+x) \cdot p}{r_D \cdot T_s \cdot (0,622+x)}$$

12) Absolutní vlhkost neboli měrná hmotnost vodních par  $\rho_D$ :

$$\rho_D = \frac{p_D}{r_D \cdot T_s}$$

13) Pro mokrou teplotu  $t_m$  se najde v parních tabulkách tlak výparné teplo  $l_m$  . Je-li  $t_m < 0^\circ\text{C}$  kapalná fáze vody neexistuje, tudíž se výparné teplo nehledá, ale uvede se teplo sublimační podle vztahu

$$l_E = 2500 + 1,84 \cdot t - l_{13} + c_E \cdot t$$

14) Plynová konstanta se spočte dle vztahu



$$r = \frac{r_L + x \cdot r_D}{1 + x}$$

### 3.11. Algoritmus pro zadané hodnoty p, t<sub>r</sub>, φ

**Podmínky: p, t<sub>r</sub>, φ musí být v daných mezích.**

- 1) Pro teplotu rosného bodu t<sub>r</sub> se spočte tlak vodních par ve vzduchu p<sub>D</sub> podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

**Podmínky: p<sub>D</sub> nesmí být větší než zadaný tlak p.**

- 2) Tlak nasycených par p<sup>“</sup><sub>D</sub> se spočte dle vztahu

$$p_D^{\prime\prime} = \frac{p_D}{\varphi}$$

**Podmínky: p<sup>“</sup><sub>D</sub> nesmí být větší nebo rovno 22064000Pa.**

- 3) Pro tlak nasycených par p<sup>“</sup><sub>D</sub> se spočte teplota t<sub>s</sub> podle algoritmu znázorněném v příloze B.
- 4) Měrná vlhkost vzduchu x se spočte dle vztahu

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_D}{p - p_D}$$

- 5) Měrná hmotnost vlhkého vzduchu ρ :

$$\rho = \frac{(1 + x) \cdot p}{r_D \cdot T_s \cdot (0,622 + x)}$$

- 6) Spočte se entalpie vzduchu i:

$$i = 1,01 \cdot t_s + (2500 + 1,84 \cdot t_s) \cdot x$$

- 7) Absolutní vlhkost neboli měrná hmotnost vodních par ρ<sub>D</sub>:

$$\rho_D = \frac{p_D}{r_D \cdot T_s}$$

- 8) Vytvoří se tabulka měrných vlhkostí x<sup>“</sup> a entalpií i<sup>“</sup> nasyceného vzduchu pro teploty t přicházející v úvahu při výpočtu vlhkého vzduchu. Vztahy jsou následující:

$$x^{\prime\prime} = 0,622 \cdot \frac{p_D^{\prime\prime}}{p - p_D^{\prime\prime}}$$

$$i^{\prime\prime} = 1,01 \cdot t + (2500 + 1,84 \cdot t) \cdot x^{\prime\prime}$$

- 9) Tlak nasycených parciálních par p<sup>“</sup><sub>D</sub> se spočte pro volenou teplotu t podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2. Pro entalpii i<sup>“</sup> = i se najde z právě

vytvořené tabulky nasyceného vzduchu teplota  $t_{ad}$ . Pro tuto  $t_{ad}$  se spočte parciální tlak  $p''_D$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2, z kterého se vypočte měrná vlhkost podle vzorce

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{p''_D}{p - p''_D}$$

Nově se vypočte entalpie nasyceného vzduchu  $i''$  podle vzorce

$$i'' = i - c_w \cdot t_{ad} \cdot (x - x'')$$

Pro tuto entalpii  $i''$  se najde nová teplota  $t_{ad}$ , která se porovná s touto teplotou předcházející. Je-li rozdíl mezi nimi menší než stanovená hranice (v programu 0,000001°C), položí se  $t_{ad} = t_m$ . Je-li rozdíl mezi novou a starou  $t_{ad}$  větší než tato hranice znovu se opakuje poslední bod. Tento cyklu se opakuje tak dlouho, dokud není rozdíl posledních dvou teplot  $t_{ad}$  menší než stanovená hranice. Potom se položí  $t_{ad} = t_m$ . Výsledkem je teplota mokrého teploměru  $t_m$ .

10) Pro teplotu  $t_m$  se najde v parních tabulkách výparné teplo vody  $l_m$  při mokré teplotě. Je-li  $t_m < 0^\circ\text{C}$  kapalná fáze vody neexistuje, tudíž se výparné teplo nehledá, ale uvede se teplo sublimační podle vztahu

11) Pro  $t_m$  se spočte tlak nasycených vodních par při mokré teplotě  $p''_{Dm}$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2 a vypočte se  $x''_m$  dle vzorce:

$$x''_m = 0,622 \cdot \frac{p''_{Dm}}{p - p''_{Dm}}$$

12) Entalpie  $i''_m$  při mokré teplotě vzduchu  $t_m$  se spočte dle vztahu

$$i''_m = 1,01 \cdot t_m + (2500 + 1,84 \cdot t_m) \cdot x''_m$$

13) Plynová konstanta se spočte dle vztahu

$$r = \frac{r_L + x \cdot r_D}{1 + x}$$

### 3.12. Algoritmus pro zadané hodnoty $p$ , $t_r$ , $i$

**Podmínky:  $p$ ,  $t_r$ ,  $i$  musí být v daných mezích.**

1) Pro teplotu rosného bodu  $t_r$  se spočte tlak vodních par ve vzduchu  $p_D$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

**Podmínky:  $p_D$  nesmí být vyšší než zadaný tlak  $p$ .**

2) Měrná vlhkost vzduchu  $x$  se spočte dle vztahu

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_D}{p - p_D}$$

- 3) Suchá teplota vzduchu  $t_s$  se spočte dle vztahu

$$t_s = \frac{i - 2500 \cdot x}{1,01 + 1,84 \cdot x}$$

**Podmínky: teplota nesmí být vyšší než 373,9 stupňů nebo nižší než -83 stupňů.**

- 4) Pro  $t_s$  se spočte tlak nasycených par  $p_D$ “ podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

**Podmínky:  $p_D$  nesmí být vyšší než  $p_D$ “.**

- 5) Relativní vlhkost vzduchu  $\varphi$  se spočte:

$$\varphi = \frac{p_D}{p_D''}$$

- 6) Měrná hmotnost vlhkého vzduchu  $\rho$  :

$$\rho = \frac{(1+x) \cdot p}{r_D \cdot T_s \cdot (0,622+x)}$$

- 7) Absolutní vlhkost neboli měrná hmotnost vodních par  $\rho_D$ :

$$\rho_D = \frac{p_D}{r_D \cdot T_s}$$

- 8) Vytvoří se tabulka měrných vlhkostí  $x''$  a entalpií  $i''$  nasyceného vzduchu pro teploty  $t$  přicházející v úvahu při výpočtu vlhkého vzduchu. Vztahy jsou následující:

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{p_D''}{p - p_D''}$$

$$i'' = 1,01 \cdot t + (2500 + 1,84 \cdot t) \cdot x''$$

Tlak nasycených parciálních par  $p_D$ “ se spočte pro volenou teplotu  $t$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

- 9) Pro entalpii  $i'' = i$  se najde z právě vytvořené tabulky nasyceného vzduchu teplota  $t_{ad}$ . Pro tuto  $t_{ad}$  se spočte parciální tlak  $p_D$ “ podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2, z kterého se vypočte měrná vlhkost podle vzorce

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{p_D''}{p - p_D''}$$

Nově se vypočte entalpie nasyceného vzduchu  $i''$  podle vzorce

$$i'' = i - c_w \cdot t_{ad} \cdot (x - x'')$$

Pro tuto entalpii  $i''$  se najde nová teplota  $t_{ad}$ , která se porovná s touto teplotou předcházející. Je-li rozdíl mezi nimi menší než stanovená hranice (v programu

0,000001°C), položí se  $t_{ad} = t_m$ . Je-li rozdíl mezi novou a starou  $t_{ad}$  větší než tato hranice znovu se opakuje poslední bod. Tento cyklus se opakuje tak dlouho, dokud není rozdíl posledních dvou teplot  $t_{ad}$  menší než stanovená hranice. Potom se položí  $t_{ad} = t_m$ . Výsledkem je teplota mokrého teploměru  $t_m$ .

10) Pro teplotu  $t_m$  se najde v parních tabulkách výparné teplo vody  $l_m$  při mokré teplotě. Je-li  $t_m < 0^\circ\text{C}$  kapalná fáze vody neexistuje, tudíž se výparné teplo nehledá, ale uvede se teplo sublimační podle vztahu

$$l_E = 2500 + 1,84 \cdot t - l_{13} + c_E \cdot t$$

11) Pro  $t_m$  se spočte tlak nasycených vodních par při mokré teplotě  $p''_{Dm}$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2 a vypočte se  $x''_m$  dle vzorce:

$$x''_m = 0,622 \cdot \frac{p''_{Dm}}{p - p''_{Dm}}$$

12) Entalpie  $i''_m$  při mokré teplotě vzduchu  $t_m$  se spočte dle vztahu

$$i''_m = 1,01 \cdot t_m + (2500 + 1,84 \cdot t_m) \cdot x''_m$$

13) Plynová konstanta se spočte dle vztahu

$$r = \frac{r_L + x \cdot r_D}{1 + x}$$

### 3.13. Algoritmus pro zadané hodnoty $p$ , $\phi$ , $x$

**Podmínky:  $p$ ,  $\phi$ ,  $x$  musí být v daných mezích, pokud  $\phi=0$  a  $x=0$  tak stav nelze nalézt.**

1) Tlak vodních par  $p_D$  ve vzduchu se spočte dle vztahu

$$p_D = \frac{p \cdot x}{0,622 + x}$$

2) Tlak nasycených par  $p''_D$  se spočte dle vztahu

$$p''_D = \frac{p_D}{\phi}$$

**Podmínky:  $p''_D$  nesmí být větší nebo rovno 22064000Pa.**

3) Pro tlak nasycených par  $p''_D$  se spočte teplota  $t_s$  podle algoritmu znázorněném v příloze B.

4) Měrná hmotnost vlhkého vzduchu  $\rho$  :

$$\rho = \frac{(1 + x) \cdot p}{r_D \cdot T_s \cdot (0,622 + x)}$$

5) Pro  $p_D$  se spočte teplota rosného bodu  $t_r$  podle algoritmu znázorněném v příloze B.

6) Spočte se entalpie vzduchu  $i$ :

$$i = 1,01 \cdot t_s + (2500 + 1,84 \cdot t_s) \cdot x$$

7) Absolutní vlhkost neboli měrná hmotnost vodních par  $\rho_D$ :

$$\rho_D = \frac{p_D}{r_D \cdot T_s}$$

8) Vytvoří se tabulka měrných vlhkostí  $x''$  a entalpií  $i''$  nasyceného vzduchu pro teploty  $t$  přicházející v úvahu při výpočtu vlhkého vzduchu. Vztahy jsou následující:

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{p_D''}{p - p_D''}$$

$$i'' = 1,01 \cdot t + (2500 + 1,84 \cdot t) \cdot x''$$

Tlak nasycených parciálních par  $p''_D$  se spočte pro volenou teplotu  $t$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

9) Pro entalpii  $i'' = i$  se najde z právě vytvořené tabulky nasyceného vzduchu teplota  $t_{ad}$ . Pro tuto  $t_{ad}$  se spočte parciální tlak  $p''_D$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2, z kterého se vypočte měrná vlhkost podle vzorce

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{p_D''}{p - p_D''}$$

Nově se vypočte entalpie nasyceného vzduchu  $i''$  podle vzorce

$$i'' = i - c_w \cdot t_{ad} \cdot (x - x'')$$

Pro tuto entalpii  $i''$  se najde nová teplota  $t_{ad}$ , která se porovná s touto teplotou předcházející. Je-li rozdíl mezi nimi menší než stanovená hranice (v programu 0,000001°C), položí se  $t_{ad} = t_m$ . Je-li rozdíl mezi novou a starou  $t_{ad}$  větší než tato hranice znovu se opakuje poslední bod. Tento cyklu se opakuje tak dlouho, dokud není rozdíl posledních dvou teplot  $t_{ad}$  menší než stanovená hranice. Potom se položí  $t_{ad} = t_m$ . Výsledkem je teplota mokrého teploměru  $t_m$ .

10) Pro teplotu  $t_m$  se najde v parních tabulkách výparné teplo vody  $l_m$  při mokré teplotě. Je-li  $t_m < 0^\circ\text{C}$  kapalná fáze vody neexistuje, tudíž se výparné teplo nehledá, ale uvede se teplo sublimační podle vztahu

$$l_E = 2500 + 1,84 \cdot t - l_{13} + c_E \cdot t$$

- 11) Pro  $t_m$  se spočte tlak nasycených vodních par při mokré teplotě  $p_{Dm}$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2 a vypočte se  $x_m$  dle vzorce:

$$x_m'' = 0,622 \cdot \frac{p_{Dm}''}{p - p_{Dm}''}$$

- 12) Entalpie  $i_m$  při mokré teplotě vzduchu  $t_m$  se spočte dle vztahu

$$i_m'' = 1,01 \cdot t_m + (2500 + 1,84 \cdot t_m) \cdot x_m''$$

- 13) Plynová konstanta se spočte dle vztahu

$$r = \frac{r_L + x \cdot r_D}{1 + x}$$

### 3.14. Algoritmus pro zadané hodnoty $p$ , $\varphi$ , $i$

**Podmínky:  $p$ ,  $\varphi$ ,  $i$  musí být v daných mezích.**

- 1) Zvolí se  $t = 0$ . Pro toto  $t$  se spočte  $p_D$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

**Podmínky:  $p_D$  nesmí být větší nebo rovno zadanému tlaku.**

- 2) Spočte se rozdíl

$$\text{rozdíl} = i - (1,01 \cdot t + (2500 + 1,84 \cdot t) \cdot 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_D''}{p - \varphi \cdot p_D''})$$

Bude-li rozdíl  $>0$ , zvětší se  $t$  o 1 a výpočet rozdílu se opakuje až do doby, kdy bude rozdíl  $<0$ .

**Podmínky: teplota  $t$  nesmí přesáhnout 373 stupňů, hodnota**

$$p - \varphi \cdot p_D''$$

**nesmí být menší nebo rovna nule.**

Poté se zmenší  $t$  o 0,5 a spočítá se rozdíl. Podle výsledku rozdílu se bude  $t$  zvětšovat či zmenšovat o 0,25. Absolutní hodnota rozdílu se bude porovnávat s nastavenou chybou (byla zvolena chyba 0,001) a když absolutní hodnota posunu bude menší než nastavená chyba, cyklus se ukončí.

Bude-li rozdíl  $<0$ , zmenší se  $t$  o 1 a výpočet rozdílu se opakuje až do doby, kdy bude rozdíl  $>0$ .

**Podmínky: teplota  $t$  nesmí být nižší než -83 stupňů.**

Poté se zvětší  $t$  o 0,5 a spočítá se rozdíl. Podle výsledku rozdílu se bude zmenšovat či zvětšovat o 0,25. Absolutní hodnota rozdílu se bude porovnávat s nastavenou chybou (0,001) a když absolutní hodnota posunu bude menší než nastavená chyba, cyklus se ukončí.

Konečné  $t$  se bude rovnat suché teplotě vzduchu  $t_s$ .

- 3) Pro  $t_s$  se spočte tlak nasycených par  $p_D$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

- 4) Parciální tlak vodních par ve vzduchu  $p_D$  se spočte:

$$p_D = \varphi \cdot p_D''$$

- 5) Měrná vlhkost vzduchu  $x$  se spočte

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_D}{p - p_D}$$

- 6) Měrná hmotnost vlhkého vzduchu  $\rho$  :

$$\rho = \frac{(1+x) \cdot p}{r_D \cdot T_s \cdot (0,622+x)}$$

- 7) Pro  $p_D$  se spočte teplota rosného bodu  $t_r$  podle algoritmu znázorněném v příloze B.

- 8) Absolutní vlhkost neboli měrná hmotnost vodních par  $\rho_D$ :

$$\rho_D = \frac{p_D}{r_D \cdot T_s}$$

- 9) Vytvoří se tabulka měrných vlhkostí  $x''$  a entalpií  $i''$  nasyceného vzduchu pro teploty  $t$  přicházející v úvahu při výpočtu vlhkého vzduchu. Vztahy jsou následující:

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{p_D''}{p - p_D''}$$

$$i'' = 1,01 \cdot t + (2500 + 1,84 \cdot t) \cdot x''$$

Tlak nasycených parciálních par  $p_D$  se spočte pro volenou teplotu  $t$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

- 10) Pro entalpii  $i'' = i$  se najde z právě vytvořené tabulky nasyceného vzduchu teplota  $t_{ad}$ . Pro tuto  $t_{ad}$  se spočte parciální tlak  $p_D$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2, z kterého se vypočte měrná vlhkost podle vzorce

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{p_D''}{p - p_D''}$$

Nově se vypočte entalpie nasyceného vzduchu  $i''$  podle vzorce

$$i'' = i - c_w \cdot t_{ad} \cdot (x - x'')$$

Pro tuto entalpii  $i''$  se najde nová teplota  $t_{ad}$ , která se porovná s touto teplotou předcházející. Je-li rozdíl mezi nimi menší než stanovená hranice (v programu

0,000001°C), položí se  $t_{ad} = t_m$ . Je-li rozdíl mezi novou a starou  $t_{ad}$  větší než tato hranice znovu se opakuje poslední bod. Tento cyklus se opakuje tak dlouho, dokud není rozdíl posledních dvou teplot  $t_{ad}$  menší než stanovená hranice. Potom se položí  $t_{ad} = t_m$ . Výsledkem je teplota mokrého teploměru  $t_m$ .

11) Pro teplotu  $t_m$  se najde v parních tabulkách výparné teplo vody  $l_m$  při mokré teplotě. Je-li  $t_m < 0^\circ\text{C}$  kapalná fáze vody neexistuje, tudíž se výparné teplo nehledá, ale uvede se teplo sublimační podle vztahu

$$l_E = 2500 + 1,84 \cdot t - l_{13} + c_E \cdot t$$

12) Pro  $t_m$  se spočte tlak nasycených vodních par při mokré teplotě  $p_{Dm}$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2 a vypočte se  $x_m$  dle vzorce:

$$x_m'' = 0,622 \cdot \frac{p_{Dm}''}{p - p_{Dm}''}$$

13) Entalpie  $i_m$  při mokré teplotě vzduchu  $t_m$  se spočte dle vztahu

$$i_m'' = 1,01 \cdot t_m + (2500 + 1,84 \cdot t_m) \cdot x_m''$$

14) Plynová konstanta se spočte dle vztahu

$$r = \frac{r_L + x \cdot r_D}{1 + x}$$

### 3.15. Algoritmus pro zadané hodnoty p, x, i

**Podmínky: p, x, i musí být v daných mezích.**

1) Parciální tlak vodních par ve vzduchu  $p_D$  se spočte dle vztahu

$$p_D = p \cdot \frac{x}{0,622 + x}$$

2) Suchá teplotu vzduchu  $t_s$  se spočte dle vztahu

$$t_s = \frac{i - 2500 \cdot x}{1,01 + 1,84 \cdot x}$$

**Podmínky: Teplota  $t_s$  nesmí být vyšší než 373 stupňů a nesmí být nižší než -83 stupňů.**

3) Pro  $p_D$  se spočte teplota rosného bodu  $t_r$  podle algoritmu znázorněném v příloze B.

4) Pro  $t_s$  se spočte tlak nasycených par  $p_{Dm}$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

5) Relativní vlhkost vzduchu  $\phi$ :



$$\varphi = \frac{p_D}{p_D''}$$

**Podmínky: Relativní vlhkost nesmí být vyšší než 1.**

6) Měrná hmotnost vlhkého vzduchu  $\rho$  :

$$\rho = \frac{(1+x) \cdot p}{r_D \cdot T_s \cdot (0,622+x)}$$

7) Absolutní vlhkost neboli měrná hmotnost vodních par  $\rho_D$ :

$$\rho_D = \frac{p_D}{r_D \cdot T_s}$$

8) Vytvoří se tabulka měrných vlhkostí  $x''$  a entalpií  $i''$  nasyceného vzduchu pro teploty  $t$  přicházející v úvahu při výpočtu vlhkého vzduchu. Vztahy jsou následující:

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{p_D''}{p - p_D''}$$

$$i'' = 1,01 \cdot t + (2500 + 1,84 \cdot t) \cdot x''$$

Tlak nasycených parciálních par  $p_D''$  se spočte pro volenou teplotu  $t$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2.

9) Pro entalpii  $i'' = i$  se najde z právě vytvořené tabulky nasyceného vzduchu teplota  $t_{ad}$ . Pro tuto  $t_{ad}$  se spočte parciální tlak  $p_D''$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2, z kterého se vypočte měrná vlhkost podle vzorce

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{p_D''}{p - p_D''}$$

Nově se vypočte entalpie nasyceného vzduchu  $i''$  podle vzorce

$$i'' = i - c_w \cdot t_{ad} \cdot (x - x'')$$

Pro tuto entalpii  $i''$  se najde nová teplota  $t_{ad}$ , která se porovná s touto teplotou předcházející. Je-li rozdíl mezi nimi menší než stanovená hranice (v programu 0,000001°C), položí se  $t_{ad} = t_m$ . Je-li rozdíl mezi novou a starou  $t_{ad}$  větší než tato hranice znovu se opakuje poslední bod. Tento cyklu se opakuje tak dlouho, dokud není rozdíl posledních dvou teplot  $t_{ad}$  menší než stanovená hranice. Potom se položí  $t_{ad} = t_m$ . Výsledkem je teplota mokrého teploměru  $t_m$ .

10) Pro teplotu  $t_m$  se najde v parních tabulkách výparné teplo vody  $l_m$  při mokré teplotě. Je-li  $t_m < 0^\circ\text{C}$  kapalná fáze vody neexistuje, tudíž se výparné teplo nehledá, ale uvede se teplo sublimační podle vztahu

- 11) Pro  $t_m$  se spočte tlak nasycených vodních par při mokré teplotě  $p_{Dm}$  podle vztahů (1), (2), (3) uvedených v kapitole 2.2 a vypočte se  $x_m$  dle vzorce:

$$x_m'' = 0,622 \cdot \frac{p_{Dm}''}{p - p_{Dm}''}$$

- 12) Entalpie  $i_m$  při mokré teplotě vzduchu  $t_m$  se spočte dle vztahu

$$i_m'' = 1,01 \cdot t_m + (2500 + 1,84 \cdot t_m) \cdot x_m''$$

- 13) Plynová konstanta se spočte dle vztahu

$$r = \frac{r_L + x \cdot r_D}{1 + x}$$

### 3.16. Příklad výpočtu dle algoritmu $p$ , $t_s$ , $\phi$

- Uživatel zadá např. hodnoty  **$p=98\text{kPa}$ ,  $t_s=23^\circ\text{C}$ ,  $\phi=56\%$** .
- Zkontroluje se, zda jsou uživatelem zadané hodnoty v nastavených mezích, pokud ne, program vypíše chybu a dále se nepočítá.
- Převědou se jednotky  $p=98 \cdot 1000=98000$ ,  $\phi=56/100=0.56$  tak aby se s hodnotami mohlo dále počítat.
- Pro teplotu  $t_s$  se spočte  $p_D$  podle vztahu

$$p_D'' = p_0 \cdot e^{\left( \frac{T_C}{T} \left( a_1 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right) + a_2 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right)^{1,5} + a_3 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right)^3 + a_4 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right)^{3,5} + a_5 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right)^4 + a_6 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right)^{7,5} \right) \right)}$$

kde  $p_0=22064000$ ,  $T_C=647,096$ ,  $T=23+273,15$ ,  $a_1=-7,85951783$ ,  $a_2=1,84408259$ ,  $a_3=-11,7866497$ ,  $a_4=22,6807411$ ,  $a_5=-15,9618719$ ,  $a_6=1,80122502$ .

**$p_D''=2810.9554038 \text{ Pa}$**

- 5) Parciální tlak vodních par ve vzduchu  $p_D$  se spočte:

$$p_D = 0,56 \cdot 2810,9554038 = 1574.13502617 \text{ Pa}$$

**$p_D=1574.13502617 \text{ Pa}$**

- $p_D$  musí být vyšší než zadaný tlak, jinak program vypíše chybovou hlášku a algoritmus se ukončí. V tomto případě je podmínka splněna
- Měrná vlhkost vzduchu  $x$**  se spočte

$$x = 0,622 \cdot \frac{1574.13502617}{98000 - 1574.13502617} = 0,0101540389 \text{ kg/kg s.v.}$$

- 8) **Měrná hmotnost vlhkého vzduchu  $\rho$** :

$$\rho = \frac{(1 + 0,0101540389) \cdot 98000}{461,5 \cdot (23 + 273,15) \cdot (0,622 + 0,0101540389)} = 1.1457960505 \text{ kg/m}^3$$

9) Pro  $p_D$  se spočte teplota rosného bodu  $t_r$  podle algoritmu znázorněném v příloze B.

$$t_r = 13.7600374221^\circ\text{C}.$$

10) Spočte se entalpie vzduchu  $i$ :

$$i = 1010 \cdot 23 + (2500000 + 1840 \cdot 23) \cdot 0,0101540389 = 49044.8162387 \text{ J/kg s.v.}$$

11) Absolutní vlhkost neboli měrná hmotnost vodních par  $\rho_D$ :

$$\rho_D = \frac{1574.13502617}{461,5 \cdot (23 + 273,15)} = 0,011517508467 \text{ kg/m}^3$$

12) V Excelu je pevně daná tabulka, která má cca 4570 řádků a skládá se ze dvou sloupců. ve sloupci 1 je následující vztah:

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{p''_D}{98000 - p''_D} \text{ kg/kg s.v.}$$

kde  $p''_D$  [Pa] je tlak na stejném řádku v parních tabulkách (v nich jsou tlaky pro teplotu která je rozdělena po  $0,1^\circ\text{C}$ ).

Ve sloupci 2 je následující vztah:

$$i'' = 1010 \cdot 23 + (2500000 + 1840 \cdot 23) \cdot x'' \text{ J/kg s.v.}$$

13) Pomocí vytvořené funkce se najde v právě vytvořené tabulce  $i''$ , které se nejvíce blíží vypočítané entalpii  $i$  (hledá se posouváním po řádku dokud není  $i > i''$ ) a potom se pro toto  $i''$  najde v parních tabulkách na příslušném řádku teplota  $t$  a pomocí interpolace se spočítá teplota  $t_{ad}$ . V Excelu se pohybuje v buňkách pomocí např. *ActiveCell.Offset(-1, 0).Value*).

14) teplota  $t_{ad}$  se dosadí do pomocné proměnné  $t_{ad2}$ .

15) Následuje cyklus, ve kterém se do  $t_{ad}$  dosadí zpětně pomocná proměnná  $t_{ad2}$ .

16) tuto  $t_{ad}$  se spočte parciální tlak  $p''_D$  podle vztahu

$$p''_D = p_0 \cdot e^{\left( \frac{T_C}{T} \left( a_1 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right) + a_2 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right)^{1,5} + a_3 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right)^3 + a_4 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right)^{3,5} + a_5 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right)^4 + a_6 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right)^{7,5} \right) \right)}$$

kde  $p_0=22064000$ ,  $T_C=647,096$ ,  $T=23+273,15$ ,  $a_1=-7,85951783$ ,  
 $a_2=1,84408259$ ,  $a_3=-11,7866497$ ,  $a_4=22,6807411$ ,  $a_5=-15,9618719$ ,  
 $a_6=1,80122502$ .

17) Vypočítá se měrná vlhkost

$$x'' = 0,622 \cdot \frac{p''_D}{98000 - p''_D}$$

18) Vypočítá se entalpie

$$i'' = 0,0101540389 - 4187 \cdot t_{ad} \cdot (0,0101540389 - x'')$$

19) Pro tuto entalpii  $i''$  se stejně jako v bodě 13 najde nová teplota  $t_{ad2}$  která se porovná s teplotou  $t_{ad}$ . Je-li rozdíl mezi nimi menší než stanovená hranice (v programu  $0,000001^\circ\text{C}$ ), položí se  $t_{ad} = t_m$ . Je-li rozdíl mezi novou a starou  $t_{ad}$  větší než tato hranice znovu se opakuje cyklus od bodu 15. Tento cyklus se opakuje tak dlouho, dokud není rozdíl posledních dvou teplot  $t_{ad}$  menší než stanovená hranice. Potom se položí  $t_{ad} = t_m$ . Výsledkem je teplota mokrého teploměru  $t_m$ . V tomto případě  **$t_m = 17.09173838^\circ\text{C}$** .

20) Pro teplotu  $t_m$  se spočte výparné teplo. Pro tento účel je nejjednodušší nalézt ho v parních tabulkách, ale pro urychlení programu byly pod tabulkou v Excelu přidány dva řádky. Jeden řádek kopíruje řádek z parních tabulek a dosazují se do něho kladné teploty  $t_m$  a do druhého řádku se dosadí  $t_m$  v případě, že je záporná. V tomto případě se dosadí teplota  $t_m$  do prvního řádku a pro ni se ve sloupci výparné teplo spočte výparné teplo  $l_m$ . To se spočte pomocí jiných parametrů tabulky.

V tomto případě  **$l_m = 2460631.64465 \text{ J/kg}$** .

21) Pro  $t_m$  se spočte tlak nasycených vodních par při mokré teplotě  $p''_{Dm}$  podle vztahu

$$p''_{Dm} = p_0 \cdot e^{\left( \frac{T_C}{T} \left( a_1 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right) + a_2 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right)^{1.5} + a_3 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right)^3 + a_4 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right)^{3.5} + a_5 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right)^4 + a_6 \left( 1 - \frac{T}{T_C} \right)^{7.5} \right) \right)}$$

kde  $p_0 = 22064000$ ,  $T_C = 647,096$ ,  $T = 23 + 273,15$ ,  $a_1 = -7,85951783$ ,  
 $a_2 = 1,84408259$ ,  $a_3 = -11,7866497$ ,  $a_4 = 22,6807411$ ,  $a_5 = -15,9618719$ ,  $a_6 = 1,80122502$ .

V tomto případě  **$p''_{Dm} = 1919.53975370 \text{ Pa}$** .

22) a vypočte se  $x''_m$  dle vzorce:

$$x''_m = 0,622 \cdot \frac{1919.53975370}{98000 - 1919.53975370} = 0,0126247570 \text{ kg/kg s.v.}$$

23) **Entalpie  $i''_m$  při mokré teplotě** vzduchu  $t_m$  se spočte dle vztahu

$$i''_m = 1010 \cdot 17.09173838 + (2500000 + 1840 \cdot 17.09173838) \cdot 0.0126247570 \\ = 49221.58187655 \text{ J/kg s.v.}$$

24) **Plynová konstanta  $r$**  se spočte dle vztahu

$$r = \frac{287,11 + 0,0101540389 \cdot 461,5}{1 + 0,0101540389} \text{ J / kgK}$$

25) Převedou se jednotky u těchto parametrů:

$$\varphi=0,56*100=56\%$$

$$p=98000/1000=98\text{KPa}$$

$$x=0,0101540389 * 1000=10,1540389 \text{ g/kg s.v.}$$

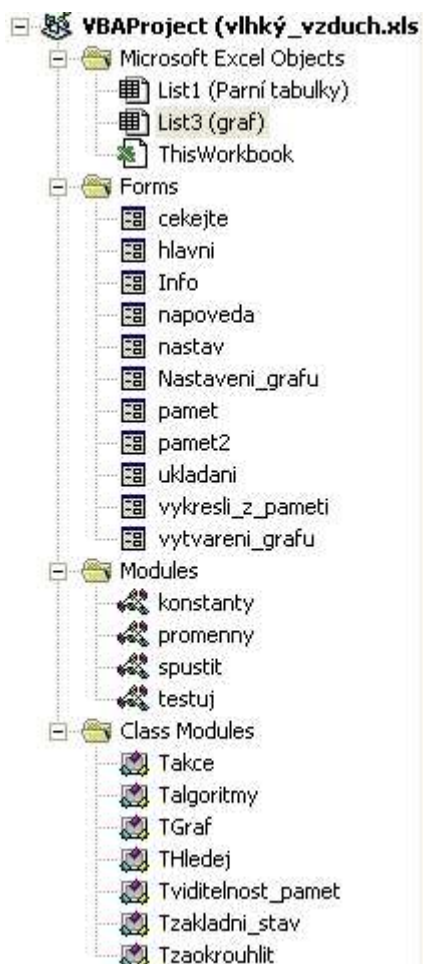
$$\rho_D= 0.011517508467*1000= 11.517508467 \text{ g/m}^3$$

$$I_m=2460631.64465/1000=2460.63164465 \text{ kJ/kg}$$

## 4. Program vlhký vzduch

### 4.1. struktura aplikace

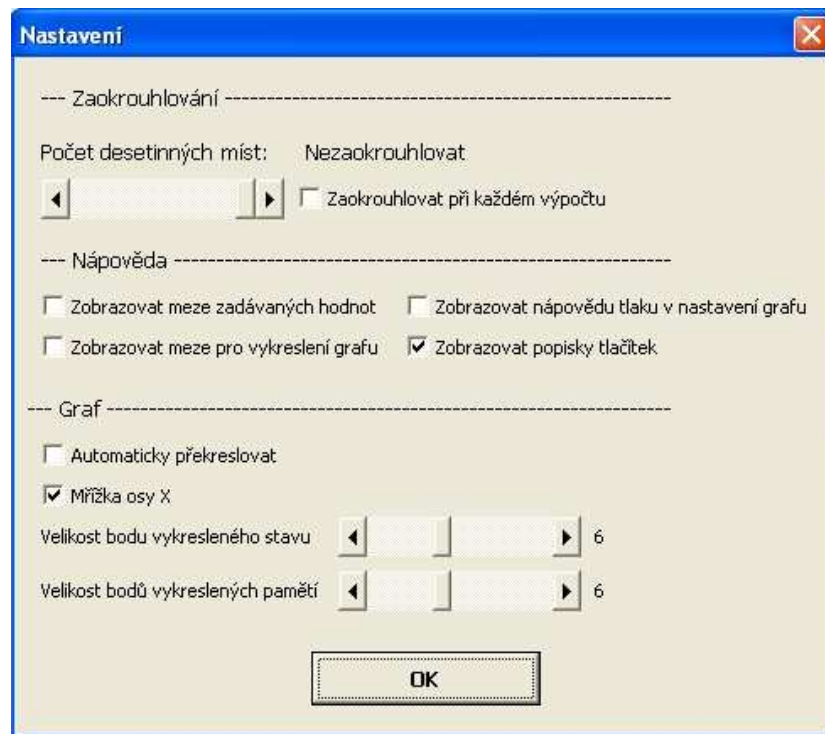
Program Vlhký vzduch byl vytvořen v Excelu 2003 české verzi a měl by být spustitelný v Excelu 2000, 2002, 2003 a Excelu 2007 jakékoliv jazykové lokace. Ve verzi 2007 je rychlost při výpočtech a při překreslování grafu z neznámého důvodu výrazně pomalejší.



Obr. 1: Struktura formulářů a modulů

Aplikace se skládá ze dvou listů Excelu:

- **Parní tabulky** – jsou zde parní tabulky, uložené stavy vzduchu a nastavení programu.
- **Graf** – zde jsou tabulky potřebné pro vykreslení grafu a samotný graf.  
Z formulářů:
- **Cekejte** – okno, které se zobrazí při spuštění výpočtu a skryje při ukončení výpočtu.
- **Hlavní** – Hlavní formulář pro zadávání a vypočítání parametrů, přes něj se lze dostat k ostatním formulářům.
- **Info** – zobrazuje krátké informace o programu.
- **Napoveda** – zobrazuje krátkou nápovědu pro uživatele programu.
- **Nastav** – formulář pro nastavení programu, např. zapínání a vypínání nápovědy, zaokrouhlování, atd.



*Obr. 2: Nastavení programu*

- **Nastaveni\_grafu** – formulář pro změnu parametrů grafu a pro celkové ovládání grafu. Pomocí něho lze i vykreslovat vypočítané stavy vzduchu do grafu.
- **Pamet** – pomocí tohoto formuláře uživatel může uložit data do paměti.
- **Pamet2** – slouží k načítání vypočtených stavů z paměti.
- **Ukladani** – zobrazí se uživateli při ukládání a ukončování programu.
- **Vykresli\_z\_pameti** – formulář pro vykreslení uložených stavů do grafu.

- **Vytvoreni\_grafu** – zobrazí se uživateli při vykreslování grafu.

Z modulů:

- **Konstanty** – modul, ve kterém se nacházejí konstanty používané při výpočtech a dále potom zvolené meze parametrů při zadávání pro výpočet a heslo pomocí kterého program odemyká a zamyká listy.
- **Promenny** – obsahuje dvě proměnné, kterým se přiřazují hlášky (chybové a informativní), dále proměnné které se předávají při ukládání do paměti.
- **Spustit** – modul, který obsahuje dvě makra, jedno které spouští hlavní formulář a druhé, které spouští formulář nastavení grafu. Tyto makra jsou přiřazena k tlačítkům na listech „Parní tabulky“ a „Graf“.
- **testuj** – modul obsahuje funkce *JeCislo* a *JePrazdne*, které se používají dále v programu.

Z modulů tříd:

- **Takce** – obsahuje metodu *pocitej()*, která na základě zadaných parametrů vybere příslušný algoritmus pro výpočet, popřípadě provede na konci výpočtu zaokrouhlení, pokud je v nastavení požadováno.
- **Talgoritmy** – Class modul, který má 15 metod, zahrnujících 15 různých algoritmů. Při výpočtu se vybere metoda, podle zadaných parametrů. Tento class modul je hlavní a nejdůležitější část celého programu.
- **TGraf** – obsahuje několik metod, jejichž postupným voláním se nastaví graf a přepíšou tabulky pro graf.
- **THledej** – obsahuje několik metod, např. numerický výpočet teploty pro tlak nebo tlaku pro teplotu, dále obsahuje i metody pro hledání určité hodnoty v parních tabulkách pro jinou hodnotu.
- **Tviditelnost\_pamet** – obsahuje metody, pro načítání hodnot z paměti.
- **Tzakladni\_stav** – obsahuje metodu, která uvede hlavní formulář do základního stavu (připraven pro nový výpočet) a dále obsahuje metody pro zobrazení a skrytí jednotlivých typů nápověd.
- **Tzaokrouhlit** – obsahuje metodu pro zaokrouhlení vypočítaných hodnot.

## 4.2. Popis aplikace

Aplikace je rozdělena na čtyři základní části a to list Parní tabulky, list Graf, výpočtový program a ovládání grafu.

#### 4.2.1. *List Parní tabulky*

Na tomto listu se nacházejí parní tabulky a další tabulky se kterými program pracuje. Sloupce A až L jsou vyplněny parními tabulkami.

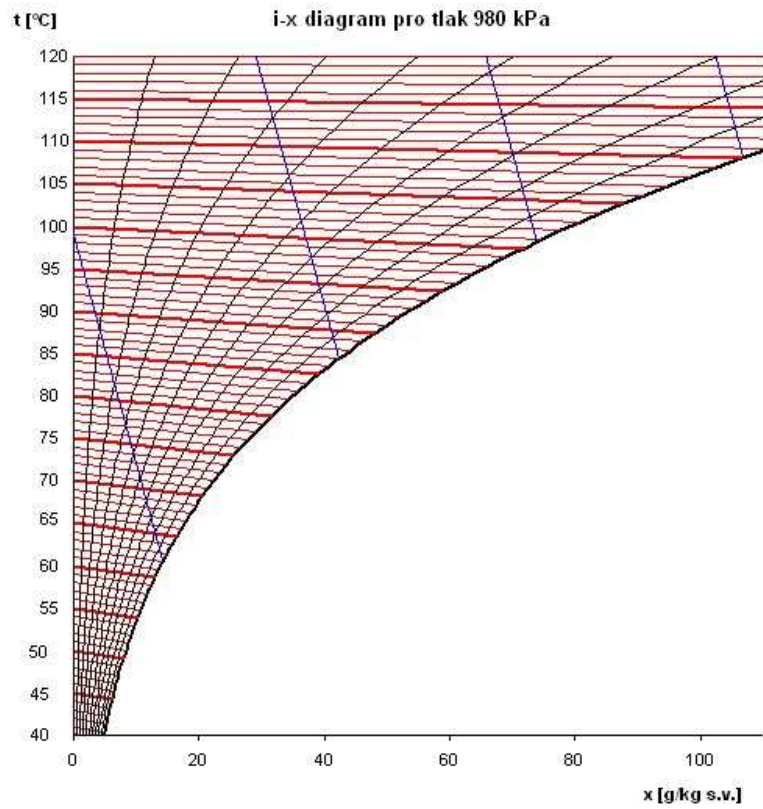
- Ve sloupci A se nachází teploty od  $-273,15^{\circ}\text{C}$  do  $373,946^{\circ}\text{C}$  stupňů po kroku 0,1. Teploty a ostatní hodnoty pro teploty mezi  $-83,15$  a  $-273,15$  stupňů tabulka nezaznamenává.
- Ve sloupci B se nachází tlak, který je určen vzorcem (1) v kapitole 2.2 pro minusové teploty a vzorcem (2) v kapitole 2.2. pro kladné teploty včetně nuly.
- Ve sloupci C je spočtená hustota syté kapaliny počítaná dle vztahu z literatury č.[2]. V programu vlhkého vzduchu není tento vztah využíván.
- Ve sloupci D je hustota syté páry počítaná dle vztahu z literatury č.[2]. V programu vlhkého vzduchu není tento vztah využíván.
- Ve sloupci E je derivace  $dp/dT$ . Hodnoty této derivace slouží jako pomocný výpočet.
- Hodnoty ze sloupce F jsou počítány podle pomocné rovnice z literatury č.[2].
- Hodnoty ze sloupce G jsou počítány podle pomocné rovnice z literatury č.[2].
- Sloupec H obsahuje měrnou entalpie syté kapaliny.
- Sloupec I obsahuje měrnou entalpii syté páry.
- Ve sloupci J je výparné teplo počítané jako rozdíl entalpie syté páry a entalpie syté kapaliny.
- Sloupec K obsahuje měrnou entropii syté kapaliny. Tato veličina není v programu využívána.
- Sloupec L obsahuje měrnou entropii syté páry, které taktéž není v programu využita.
- Hodnoty ve sloupcích M a N se mění při každém nově zadaném celkovém tlaku. V algoritmech slouží v cyklu hledání mokré teploty  $t_m$ .
- Ve sloupci M jsou hodnoty měrných vlhkostí nasyceného vzduchu pro danou teplotu při právě počítaném celkovém tlaku.
- Ve sloupci N jsou hodnoty měrných entalpií nasyceného vzduchu pro danou teplotu při právě počítaném celkovém tlaku.
- Ve sloupcích P až T se nachází pomocná tabulka pro výpočet v algoritmu  $p$ ,  $t_m$ ,  $\varphi$ , o její funkci byla zmínka právě v popisu algoritmů.



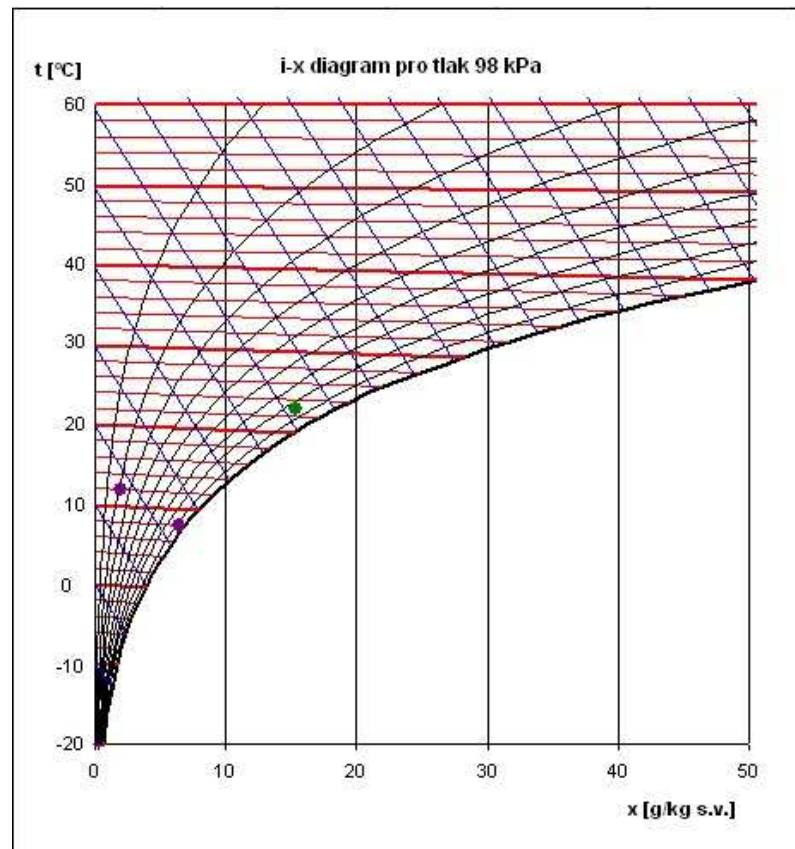
- Ve sloupci P jsou hodnoty měrných vlhkostí  $x$  po určitém kroku (zvolen krok 0,00001) o pevném počtu řádků do  $x=0,1619$ .
- Ve sloupci Q jsou z měrných vlhkostí ve sloupci P pro zadaný celkový tlak spočteny parciální tlaky.
- Ve sloupci R je spočtená teplota pro zadaný celkový tlak náležící příslušné měrné vlhkosti ve sloupci P.
- Ve sloupci S jsou spočteny tlaky nasycených par  $p_D$  pro teploty ve sloupci R.
- Ve sloupci T jsou relativní vlhkosti  $\varphi$  spočtené z podílu tlaku ve sloupci Q a tlaku nasycených par ve sloupci S.
- Ve sloupcích V a W se nachází pomocná tabulka do které jsou zkopírovány vypočtené hodnoty potřebné pro tvorbu tabulky ve sloupcích M, N a pro tvorbu tabulky ve sloupcích P až T.
- Sloupce Y až AI jsou obsazeny tabulkou pamětí, kam se programově ukládají vypočítaná data. Pod touto tabulkou se ve sloupcích AB a AC nachází ještě tabulka nastavení, pomocí níž si program uchovává některé uživatelsky přednastavené hodnoty.
- Celý list Parní tabulky je uzamčen a chráněn proti přepsání. V oblasti buňky A1 se nachází tlačítko, kterým lze celý program spustit.

#### **4.2.2. List graf**

List graf obsahuje programem vykreslený graf a několik tabulek, při jejichž změně se graf překresluje. Princip tvorby grafu bude vysvětlen v příslušné části práce a nyní jen krátký popis obsahu tohoto listu. Stejně jako na listu Parní tabulky i zde je v oblasti A1 tlačítko, tentokrát však nastavení grafu a po jeho stisku se otevře okno pro změnu parametrů grafu.



*Obr. 3: Vykreslený i-x diagram*



*Obr. 4: Vykreslený i-x diagram a vykreslené stavy*

- Ve sloupcích A až C, jež jsou grafem překryty se nachází několik položek pomocí kterých se mění obsah ostatních tabulek jsou to položky, které sem jsou zkopírovány z formuláře při změně parametrů grafu.
- Ve sloupcích E až M je původní tabulka, která ve výsledném programu již neplní žádnou funkci. O tom proč byla vytvořena je zmínka v části práce o tvorbě grafu.
- Ve sloupcích N až X je tabulka teplot, v které se počítají souřadnice krajních bodů izoterm v grafu.
- V tabulce tvořené sloupci Z až AS jsou vypočítané souřadnice bodů na izotermách odpovídající relativních vlhkostem  $\varphi=0,9$  až  $\varphi=0$  po kroku 0,1. (Souřadnice bodů na křivce nasycení pro  $\varphi=1$  jsou totožné s krajními body izoterm nacházejících se ve sloupcích W a X v tabulce izoterm).
- V tabulce ze sloupců AU až BC je proveden výpočet souřadnic krajních bodů izoentalp.
- Sloupce BE až BS už potom slouží pouze k vykreslení vypočítaného stavu do grafu nebo k vykreslení stavů v paměti do grafu.

#### 4.2.3. Výpočtový program

Program může uživatel spustit tlačítkem na listu „Parní tabulky“ a dostane se tak do formuláře pro zadávání hodnot k výpočtu.

Zadejte Tlak+ 2 další hodnoty	
Vypočítej	Nastavení
Nový výpočet	Graf
	Nápověda a tipy
Tlak vzduchu (p):	96 kPa
Teplota vzduchu (ts):	12 °C
Teplota mokrého teploměru (tm):	10,0797377309897 °C
Teplota rosného bodu (tr):	8,56868839263916 °C
Relativní vlhkost (φ):	79,5 %
Měrná vlhkost (x):	7,31038717516308 g/kg s.v.
Entalpie vzduchu (i):	30557,3812867353 J/kg s.v.
Měrná hmotnost vzduchu (ρ):	1,16768194198908 kg/m <sup>3</sup>

Obr. 5: Výřez z hlavního programu

Tento formulář je rozdělen na dvě části. První (horní) část je určena pro zadávání hodnot a druhá část jsou pouze údaje, které budou vypočteny a tyto údaje nelze měnit (šedá pole jsou pouze pro zobrazování). V horní části je zeleně vyznačen tlak  $p$ , který musí uživatel zadávat při každém výpočtu. Po zadání tlaku, musí uživatel zadat další dvě libovolné hodnoty z horní části formuláře. Výpočet se provádí výhradně se třemi zadanými hodnotami, při více nebo méně zadaných hodnotách nelze výpočet provést (tlačítko „Vypočítej“ zůstane vyšedlé). Zadané hodnoty se stejně jako tlak vyznačí při zadávání zeleně. Pokud se uživatel rozhodne zadat jiné hodnoty, musí stávající hodnoty smazat, tím zmizí i zelené vyznačení a může zadávat jiné. Když po zadání tří hodnot uživatel provede výpočet, vyplní se zbylé hodnoty jak v horní, tak v dolní části formuláře. Zadané tři hodnoty zůstanou stále zeleně vyznačené. Jestliže chce uživatel v této fázi provést nový výpočet, má několik možností:

- Kliknout na tlačítko „Nový výpočet“ a zadat jiné hodnoty pro výpočet
- Změnit jednu nebo více vyznačených hodnot a kliknout na tlačítko „Výpočet“ (jiné hodnoty než zeleně vyznačené nemají na výpočet vliv). Formulář tedy nemusí být prázdný. Toto ušetří uživateli práci pokud provádí více výpočtů v řadě s podobnými hodnotami. Nemusí zadávat stále stejné hodnoty znova.
- Pokud uživatel vypočítá stav vzduchu např. pro tlak, teplotu a teplotu mokrého teploměru a chce provést nový výpočet a ponechat první dvě hodnoty stejné a zadat jinou třetí hodnotu, stačí když smaže např. políčko teplota mokrého teploměru (zruší se zelené zvýraznění) a vybere si jinou hodnotu, např. relativní vlhkost, kde přepíše vypočítaná data těmi, které chce zadat (zadávané pole se zvýrazní) a klikne na tlačítko „Výpočet“.

Výpočty se provádí rychlostí závislou na tom, které hodnoty se zadávají (typu algoritmu) a přímo na zadaných hodnotách. V některých algoritmech není použito hledání v tabulkách a tím je rychlost značně vyšší oproti algoritmům jiným.

Hodnoty pro výpočet lze zadávat v určitých mezích, jaké byly zvoleny při tvorbě programu a testování výpočtů. Pokud uživatel jednu nebo více hodnot zadá mimo stanovený limit, program to dá vědět příslušnou hláškou a uživatel musí znovu zadat správnou hodnotu. Pod tlačítkem „Nastavení“ lze uživatelsky nastavit několik druhů nápovědy. Jednou z nich je „Zobrazovat meze zadávaných hodnot“. Když uživatel zaškrtně toto políčko a klikne na OK, po najetí myši nad určité pole (tlak, teplota, atd.) se zobrazí popisek dolní a horní hranice zadávaných hodnot. Program je ošetřen i dalšími chybovými hláškami, takže by nemělo dojít k žádné kolizi.

Pokud uživatel zadá do některého z polí údaj, který není hodnotou (obsahuje, písmeno nebo jiný nepovolený znak), výpočet nelze provést. Výjimkou je písmeno „E“ ve správném formátu. Např. číslo „1.2E2“ znamená  $1,2 \cdot 10^2$  a takový zápis program akceptuje. Číslo s desetinnými místy může uživatel zadat s desetinnou čárkou nebo tečkou, program si sám převádí čárku v napsaném čísle na desetinnou tečku.

Hodnoty vypočítaného stavu vzduchu může uživatel zaokrouhlit. Po kliknutí na tlačítko „Nastavení“ lze nastavit zaokrouhlování na 0 až 6 desetinných míst, popřípadě vypočítané hodnoty nezaokrouhlovat. Zaokrouhlování lze nastavit při každém výpočtu. Vypočítané hodnoty se potom po každém výpočtu zaokrouhlí na uživatelsky nastavený počet desetinných míst.

Uživatel si může vypočítané údaje uložit do paměti. Po vypočítání stavu vzduchu se zpřístupní tlačítko „Ulož do paměti“. Po kliknutí na něj se otevře formulář ve kterém je 10 pamětí. Volné paměti jsou vyznačeny zeleně, obsazené jsou bílé, popř. je v příslušné paměti zadán nějaký popis. Vypočítané hodnoty lze uložit do paměti tak, že se příslušná paměť vybere přepínacím tlačítkem, v tuto chvíli může ještě uživatel přidat popis k vypočítaným hodnotám do pole vpravo od vybraného přepínacího tlačítka. Po kliknutí na tlačítko „Uložit“ se hodnoty uloží do vybrané paměti.

Uživatel může ukládat hodnoty do volné paměti nebo do paměti již obsazené, přičemž v druhém případě se tato paměť přepíše novými hodnotami, popř. novým popisem. Paměti lze mazat po jedné jedním z tlačítek vpravo nebo vymazat všechny paměti najednou tlačítkem „Vymazat vše“.

Hodnoty se uloží po kliknutí na tlačítko „Uložit“. Do té doby lze všechny změny vrátit kliknutím na tlačítko „Storno“.

Uloženou paměť lze načíst několika způsoby.

- Kliknutím na tlačítko „Načíst z paměti“ se otevře formulář s rozbalovacím menu, ze kterého lze příslušnou paměť vybrat. Ta se zobrazí v pravé části hlavního formuláře.
- Pod tlačítkem „Načíst z paměti“ se nachází dvě tlačítka. První „Zobraz>>“ zpřístupní pole pro načítání z paměti. Dále lze už listovat pomocí zobrazených šipek mezi paměťmi. Druhé tlačítko „Vymazat“ vymaže data z pravé části formuláře, nikoliv z paměti!

Hlavní program má ještě několik tlačítek o kterých je třeba se zmínit. Pod tlačítkem „Nápověda a tipy“ se skrývá krátký popis programu. Pod tlačítkem „O programu“ se nachází informace o autorovi a rok vytvoření programu. Dále je zde tlačítko „Nastavení“ pod kterým je formulář s nastavením programu. Mimo jiné se zde nachází i políčko „Zobrazovat popisky tlačítek“, po jehož označení se zapne zobrazování nápovědy k tlačítkům (po najetí myši nad kterékoliv tlačítko v celém programu se zobrazí plovoucí nápověda).

#### 4.2.4. Graf

Do hlavního nastavení grafu se lze dostat pomocí tlačítka „Graf“ v hlavním programu nebo pomocí tlačítka „Nastavení grafu“ na listu „graf“.

Obr. 6: Nastavení parametrů grafu

Zde je potřeba zmínit několik informací. V nastavení hlavního programu lze taky nastavit několik parametrů grafu. Mimo jiné i pole „Automaticky překreslovat“. Po jeho zaškrtnutí se bude automaticky graf překreslovat pro každý výpočet. Stav vzduchu s nějakým tlakem lze totiž zobrazit pouze v grafu pro tento tlak vytvořeném. Pokud uživatel často mění barometrický tlak, je vhodné mít tuto funkci zaškrtnutou a při vypočteném stavu vzduchu se tak po kliknutí na tlačítko graf provede překreslení. Překreslení se neprovede pokud je již graf pro tento tlak vykreslen nebo je pole tlak prázdné (popř. hodnota v něm menší než stanovená hranice). Nutno ještě zmínit, že graf se pro tlak překreslí, ale ostatní nastavené hodnoty grafu (minimální teplota, maximální teplota, atd.) zůstávají stejné. Můžou

nastat situace že pro vysoké teploty a nízký tlak nelze graf vykreslit. Toto je ošetřeno potřebnou hláškou.

Pod tlačítkem „Nastavení“ v hlavním programu je dále možno nastavit několik dalších vlastností. Lze zde zapnout mřížku osy X grafu, nastavit velikost vykreslovaných bodů z paměti a velikost vykreslovaného bodu vypočítaného stavu a dále taky nápovědu. Políčko „Zobrazovat meze pro vykreslení grafu“ zobrazí nápovědu (meze zadávaných hodnot v nastavení grafu) podobně jako v hlavním programu, políčko „Zobrazit nápovědu tlaku v nastavení grafu“ Zobrazí při najetí myši nad popisek tlak v nastavení grafu nápovědu, jaký tlak se zadával při právě vypočítaném stavu. Tato funkce se hodí, pokud nemá uživatel zapnuté automatické překreslování grafu. Rychle tak zjistí pro jaký tlak je potřeba graf překreslit aby bylo možno vypočítaný stav zobrazit a překreslení provede ručně.

Nyní už popis samotného okna nastavení grafu. Samotné listy i graf jsou uživatelům uzamčeny, aby nedošlo k nechtěné změně tabulek nebo grafu a tím k poškození programu. Manipulace s grafem se tak směřuje do okna nastavení grafu. Je zde umístěn vertikální i horizontální posuvník podobně jako v Excelu, uživatel se tak může pohybovat v listu bez nutnosti toto okno zavírat. Dále je zde k dispozici čtveřice šipek, která slouží ke změně velikosti grafu. Velikost grafu lze měnit od určité minimální, do určité maximální hodnoty. Protože je graf uzamčen, nelze toto provádět přímo v listu Excelu. Graf lze zmenšit, či zvětšit dostatečně, podle potřeb uživatele.

## **5. Vytvoření i-x diagramu**

### **5.1. Princip vytváření grafu v Excelu**

V Molliérově i-x diagramu vlhkého vzduchu, jak již bylo řečeno, se používají kosoúhlé souřadné osy. Úhel těchto os je v této práci označen  $\omega$  V tomto kosoúhlém souřadném systému jsou zobrazeny izotermy, izoentalpy, křivky konstantních relativních vlhkostí a čáry konstantních měrných vlhkostí. Čáry konstantní měrných hmotností a směrová měřítka tato práce neřeší.

Při konstrukci i-x diagramu v Excelu se postupuje tak, že poloha každé bodu daného kosoúhlými souřadnicemi i, x se přepočítává do pravoúhlého souřadnicového systému, v kterém jsou souřadnice y a x uvedeny v centimetrech. Protože izotermy resp. izoentalpy jsou v Molliérově diagramu úsečky, jsou počítány souřadnice

krajních bodů těchto úseček a přímková spojnice (zvolením XY bodového typu grafu v Excelu) těchto bodů znázorňuje přímo požadovanou izotermu resp. izoentalpu. Křivek konstantních relativních vlhkostí je 11, přičemž křivka  $\varphi = 0$  je totožná s osou y, na které leží i všechny první krajní body izoterm.

Druhé krajní body izoterm tvoří zase křivku nasyceného vzduchu tj když je  $\varphi = 1$ . Ostatní křivky konstantních relativních vlhkostí jsou tvořeny hladkými spojnicemi bodů, jejichž pravoúhlé souřadnice jsou počítány na všech izotermách pro příslušnou relativní vlhkost.

Pro čáry konstantních měrných vlhkostí je využita hlavní mřížka, která se v Excelu zobrazuje automaticky a která v drtivé většině případů postačí.

Pro výpočet souřadnic se vychází z uživatelem navoleného teplotního rozsahu od  $t_{\min}$  do  $t_{\max}$ , kroku teplot, maximální měrné vlhkosti  $x_{\max}$ , kroku entalpie a zvoleného celkového tlaku p. Nejdříve se volí modul  $\alpha$  [cm/(kg/kg s.v.)] a úhel  $\omega$ . Modul  $\beta$  [cm/(J/kg s.v.)] získáme z podmínky, aby izoterma  $t_{\max}$  byla kolmá k čarám stálé měrné vlhkosti. Matematicky je podmínka vyjádřena vztahem

$$\operatorname{tg}(90 - \omega) = \frac{\beta \cdot \Delta i}{\alpha \cdot \Delta x} = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{di}{dx} = \frac{\beta}{\alpha} (2500 + 1,84 \cdot t_{\max}) \cdot 10^3$$

Z čehož vyplývá

$$\beta = \frac{\alpha \cdot \operatorname{tg}(90 - \omega)}{(2500 + 1,84 \cdot t_{\max}) \cdot 10^3}$$

Minimální hodnota měrné vlhkosti je vždy rovna nule  $x_{\min}=0$  a je umístěna do počátku pravoúhlých souřadnic

Teplota  $t_{\min}$  pro  $x=0$  je umístěna do počátku pravoúhlých souřadnic a proto maximální vzdálenost  $y_{\max}$  v centimetrech od počátku je dána vztahem

$$Y_{\max} = 1010 \cdot (t_{\max} - t_{\min}) \cdot \beta = 1010 \cdot t_{\max} \cdot \beta$$

Pravoúhlé souřadnice X a Y (v cm) jakéhokoliv bodu dané kosoúhlými souřadnicemi x a i se spočítají dle vztahů

$$X = \alpha \cdot x$$

$$Y = 1010 \cdot \left( \frac{i}{1010} - t_{\min} \right) \cdot \beta - \alpha \cdot x \cdot \operatorname{tg}(90 - \omega)$$

Souřadnice bodů na izotermách (v cm), ze kterých se kreslí křivky konstantních relativních vlhkostí se spočítají dle následujících vztahů

$$X = X_1 + (X_2 - X_1) \cdot \frac{\varphi \cdot (p - p_D'')}{p - \varphi \cdot p_D''}$$



$$Y = Y_1 + (Y_2 - Y_1) \cdot \frac{\varphi \cdot (p - p_D'')}{p - \varphi \cdot p_D''}$$

X1 , Y1 jsou pravoúhlé souřadnice prvního bodu izotermy (x=0)

X2 , Y2 jsou pravoúhlé souřadnice prvního bodu izotermy (x=x“)

Izotermy, izoentalpy, křivky konstantních relativních vlhkostí a čáry konstantních měrných vlhkostí jsou v diagramu Excelu automaticky ukončeny zprava čarou X=X<sub>max</sub> a ze shora čarou t=t<sub>max</sub> a proto se nemusí souřadnice těchto koncových bodů počítat.

## 5.2. Postup při vytváření grafu v Excelu

- Vytvářením grafu se myslí překreslení grafu a to je vyvoláno buď automaticky nebo po stisku tlačítka „Překreslit graf“ v okně nastavení parametrů grafu. V této chvíli je už zkontrolováno, zda jsou rozsahy teplot, entalpie, kroků atd. ve stanovených mezích. To je prováděno u každé položky při události opuštění zadávacího pole. Nyní následuje sled dalších akcí, nezbytných ke správnému vytvoření grafu.
- Kvůli problému s maximálním počtem řad v grafu, který Excel poskytuje (tj. 255 řad) bylo nutno udělat některá další opatření, aby nedošlo k chybě. Byl zvolen maximální počet řad teplot na 100 řad, maximální počet entalpií na 50 řad, dalších 11 řad tvoří relativní vlhkost  $\varphi$  od 0 do 1 a dalších maximálně 11 řad tvoří vykreslené stavy (1 vypočítaný stav a 10 stavů v paměti). Při součtu všech zmíněných řad vychází počet 172, jež se s rezervou do limitu Excelu vejde.
- Graf je tvořen z pevně vybraných oblastí, které jsou nebo nejsou vyplněny tabulkou. Tyto tabulky se vyplňují programově (bude zmíněno dále). Oblast, která není vyplněna hodnotami se v grafu nijak nezobrazuje.
- Jako první krok při samotném zahájení vytváření grafu je kontrola, jestli (t<sub>max</sub>-t<sub>min</sub>/počet kroků teploty) nepřesahuje hodnotu 100. Při zadání rozsahu např. 0 až 60 stupňů a kroku teploty 0,5 by došlo k vytvoření 120 řádků, což spadá mimo možnosti programu a je nutno změnit hranice teplot nebo krok teploty.
- Jsou stavy, pro které nelze graf vykreslit a právě toto omezení řeší další podmínka a to taková, že tlak vodních par pro zadanou maximální teplotu nesmí být vyšší nebo roven celkovému tlaku, pro který se graf vykresluje. Nelze tedy např. vykreslit graf pro tlak 90KPa a pro teploty od 50 do 110 stupňů!

- Pokud zadané hodnoty projdou těmito podmínkami, nic už nebrání k samotnému vytváření grafu. Na formuláři pro nastavování parametrů grafu je i pole „Překreslit zákl. hodnotami“ v případě zaškrtnutí tohoto pole, se graf překreslí pro hodnoty, které byly definovány jako základní a to jsou tyto: Tlak 96KPa, minimální teplota -20°C, maximální teplota 50°C, maximální hodnota x 20g/kg s.v., krok teploty 2°C a krok entalpie 5000J/kg. Dále se nastaví pevná šířka grafu na 350px a výška na 420px. Všechny tyto hodnoty jsou zadány do buněk B5 až B15 na listu graf. Tyto buňky jsou uživateli skryté pod grafem. Pro správné zobrazení se zpět z těchto buněk nahrají hodnoty do formuláře nastavení parametrů grafu. V případě, že není zaškrtnuté pole pro překreslení základními hodnotami se do výše zmíněné oblasti zkopírují hodnoty zadané uživatelem z formuláře pro nastavení parametrů grafu. V tomto formuláři jsou tři pole šedé barvy, které nelze měnit. Je to modul  $\alpha$ , úhel  $\omega$ , a krok vlhkosti. Je to z toho důvodu, že tyto zmíněné položky nemají vliv na výsledný vzhled grafu v Excelu. Tyto hodnoty by se musely zadávat v jiném grafickém prostředí, proto je s nimi počítáno jako s nastavitelnými hodnotami. Další pole šedé barvy je modul  $\beta$ . Ten je počítán v závislosti na modulu  $\alpha$  úhlu  $\omega$ . Má pouze informativní charakter. Krok vlhkosti byl původně nastavitelný, nakonec však byl zvolen krok který se automaticky zobrazuje v Excelu, který pro praktické účely stačí. Hodnoty jsou zde uváděny pouze z informačního hlediska a pro úplnost. Tyto moduly jsou popsány v teoretické části práce o i-x diagramu.
- V programu je vytvořena třída TGraf, která obsahuje metody pro vytváření jednotlivých částí grafu.
- Jako první se zavolá metoda *NastavOsy()*, která provede minimální a maximální nastavení hodnot os X a Y. Po odemčení listu s definovaným heslem se programově vybere graf a pomocí funkcí jako je např. *ActiveChart.Axes(xlCategory).MinimumScale* se nastaví minimální hodnota osy X a Y na 0. Maximální hodnota osy X na hodnotu zadanou uživatelem (maximální hodnota x [g/kg]) a maximální hodnota osy Y na hodnotu určenou vzorcem

$$1010 \cdot (t_{\max} - t_{\min}) \cdot \beta$$

Tímto jsou nastaveny hranice os grafu. V tomto ohledu je výhoda Excelu v tom, že se nemusí počítat hranice izoentalp, izoterm a křivek relativních vlhkostí, ale tyto čáry se v grafu Excelu omezují automaticky.

- Jako první vykreslená křivka měla být původně relativní vlhkost  $\varphi=1$  a pro tu byla taky vytvořena tabulka a metoda ve třídě TGRAF. Od vytváření této tabulky se však později ustoupilo a to při zjištění, že křivku  $\varphi=1$  lze vykreslit ze souřadnic X2 a Y2 z tabulky konstantních teplot a tato funkce se bude lépe zobrazovat než by tomu bylo u funkce z původně vytvářené tabulky. Při jejím vykreslení totiž bylo v oblasti nízkých měrných vlhkostí málo bodů a vytvářela se nechtěná lomená čára. První tři řádky tabulky  $\varphi=1$  byly v listu ponechány kvůli možnosti případného budoucího využití.
- První vytvářenou tabulkou se tak stává tabulka teplot. Tato tabulka se vytváří pomocí metody *Vytvor\_tabulku\_teplo*(*t*) ve třídě TGRAF.

Ve sloupci O se nachází teploty, přičemž v prvním řádku je teplota rovna zadané minimální teplotě, ve druhém a každém dalším řádku je teplota rovna teplotě předchozí plus zadanému kroku teploty.

Ve sloupci N jsou vyznačeny popisky teplot. Je zde vybraná každá pátá hodnota teploty. Tato hodnota je vypsána jako popisek osy Y u příslušné teploty a zároveň je tato teplota v diagramu vyznačena silnější čarou.

Ve sloupci P je zobrazen tlak  $k$  teplotě nacházející-se na stejném řádku ve sloupci O. Tento tlak je určen vzorcem (1) uvedeném v kapitole 2.2 pro záporné teploty, resp. vzorcem (2) uvedeném v kapitole 2.2 pro kladné teploty, tzn., že buňka obsahuje funkci *KDYŽ* pomocí níž vyhodnotí jestli je teplota kladná nebo záporná a použije se příslušný vzorec.

Ve sloupci Q se nachází měrná vlhkost nasyceného vzduchu pro příslušný tlak, která je spočítána dle vzorce

$$x'' = \frac{0,622 \cdot p_D''}{p - p_D''}$$

Ve sloupci R se nachází entalpie nasyceného vzduchu, která se počítá podle vzorce

$$i'' = 1010 \cdot t + (2500000 + 1840 \cdot t) \cdot x''$$

Ve sloupci S se počítá teplota  $t_0$ . Tato teplota se později využívá k výpočtu souřadnice Y2. Teplota  $t_0$  se vypočítá podle vzorce

$$t_0 = \frac{i''}{1010}$$

Ve sloupci T je spočítána vzdálenost  $t_0$ , tato hodnota nakonec není nikde dále využita.

Výše zmíněné hodnoty stačí už k tomu, aby se vypočítali souřadnice X1, Y1, X2 a Y2 a mohla se tak vykreslit úsečka příslušné izotermy.

Souřadnice X1 bude vždy 0 (krajní bod izotermy je na ose Y).

Souřadnice Y1 se spočítá podle vzorce

$$Y1 = 1010 \cdot (t - t_{\min}) \cdot \beta$$

Souřadnice X2 se spočítá podle vzorce

$$X2 = \alpha \cdot x''$$

Souřadnici Y2 určuje vzorec

$$Y2 = 1010 \cdot (t_0 - t_{\min}) \cdot \beta - \operatorname{tg}(\pi / 2 - \omega) \cdot \alpha \cdot x''$$

Nyní je určen počáteční bod izotermy (X1, Y1) a koncový bod (X2, Y2).

- Před každým překreslením se nejprve smaže celá tabulka pomocí *Range("O7:X7").Select*

*Range(Selection, Selection.End(xlDown)).ClearContents*

Ponechají se pouze první tři řádky a potom se pomocí cyklu pro i od 3 do počtu

$$(t_{\max} - t_{\min}) / \operatorname{krok\_teploty}$$

vytváří pomocí *AutoFill* řádek po řádku, přičemž po každém vytvořeném řádku se kontroluje, jestli na právě vytvořeném řádku není tlak nasycených par větší než tlak barometrický a jestli na právě vytvořeném řádku není teplota vyšší než zadaná maximální teplota. Pokud nastane jeden z těchto případů ukončí se vytváření tabulky, pokud žádný z těchto případů nenastane, vytvoří se tabulka o maximálním počtu 100 řádků, což je dané omezením počtu cyklů.

- Jako další se vytváří tabulka relativních vlhkostí  $\varphi$ . Křivka relativní vlhkosti  $\varphi=1$  je již určena a nakreslena pomocí bodů se souřadnicemi X2 a Y2 s tabulky konstantních teplot. Kromě této křivky se vytvoří další a to pro  $\varphi=0,9$  až  $\varphi=0$  po kroku 0,1.

Souřadnice bodu X pro  $\varphi=0,9$  se spočte podle vzorce

$$X = X1 + (X2 - X1) \cdot \left( \frac{0,9 \cdot (p - p_D'')}{p - 0,9 \cdot p_D''} \right)$$

kde  $X_1$  a  $X_2$  jsou souřadnice na příslušném řádku v tabulce teplot,  $p$  je barometrický tlak pro který je graf vykreslen a  $p_D$  je tlak pro teplotu na příslušném řádku v tabulce teplot.

Souřadnice bodu  $Y$  pro  $\varphi=0,9$  se spočte podle vzorce

$$Y = Y_1 + (Y_2 - Y_1) \cdot \left( \frac{0,9 \cdot (p - p_D)}{p - 0,9 \cdot p_D} \right)$$

což je stejný vzorec jako v případě souřadnice  $X$  s tím rozdílem, že místo  $X_1$  a  $X_2$  se v něm počítá se souřadnicemi  $Y_1$  a  $Y_2$  s tabulky teplot.

Souřadnice pro  $\varphi=0,8$ ,  $\varphi=0,7$ ... atd. se vypočítají podle stejného vzorce, jen je ve vzorci nahrazeno číslo 0,9 číslem 0,8, 0,7... atd. Souřadnice  $X$  např. pro  $\varphi=0,5$  se potom spočítá takto:

$$X = X_1 + (X_2 - X_1) \cdot \left( \frac{0,5 \cdot (p - p_D)}{p - 0,5 \cdot p_D} \right)$$

Tabulka relativních vlhkostí  $\varphi$  je vytvořena podobným způsobem jako tabulka konstantních teplot. Pro její tvorbu je použit jednoduchý cyklus a vytvoří se tolik řádků tabulky  $\varphi$ , kolik je vytvořeno řádků v tabulce konstantních teplot. Při vytváření tabulky teplot se při průchodu každým cyklem inkrementuje proměnná *pocet\_radku\_teplo* a ta potom určuje maximální množství vytvořených řádků v tabulce relativních vlhkostí.

- Poslední vytvářenou tabulkou pro samotné vykreslení grafu je tabulka entalpií.

V prvním sloupci této tabulky je vypsána entalpie  $i$ . První řádek entalpie se určí pomocí funkce *KDYŽ*. Zjišťuje se jestli je hodnota

$$1010 \cdot t_{\max} < 0$$

Pokud ano, zaokrouhlí se tato hodnota dolů na hodnotu kroku entalpie (pokud je krok entalpie 10000, zaokrouhlí se hodnota na desetitisíce), pokud ne, zaokrouhlí se hodnota nahoru na hodnotu kroku entalpie. Každý další řádek se potom určí jako hodnota řádku předchozího plus krok entalpie.

Teplota  $t_0$  ve druhém sloupci se určí pomocí vzorce

$$t_0 = \frac{i}{1010}$$

V dalším sloupci ( $x_1$ ) jsou zobrazeny měrné vlhkosti prvního krajního bodu izoentalpy. Všechny krajní body izoentalp jsou na ose  $Y$ , proto je  $x_1=0$  pro celý rozsah izoentalp. Nulovou hodnotu měrné vlhkosti prvního krajního bodu lze použít v Excelu. V některých jiných programech by se musely první krajní body počítat.

Následující dva sloupce  $x''$  a  $t$  se vypočítají až po vytvoření tabulky, bude o nich zmínka dále.

Následují už pouze souřadnice. Souřadnice X1 má vždy hodnotu 0.

Souřadnice Y1 se určí podle vzorce

$$Y1 = 1010 \cdot (t_0 - t_{\min}) \cdot \beta - \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \omega\right) \cdot \alpha \cdot x''$$

přičemž  $x''=0$ .

Souřadnice X2 je vyjádřena vztahem

$$X2 = \alpha \cdot x''$$

Souřadnice Y2 se určí dle vzorce

$$Y2 = 1010 \cdot (t_0 - t_{\min}) \cdot \beta - \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \omega\right) \cdot \alpha \cdot x''$$

Nejdříve se vytvoří tabulka výše zmíněných hodnot. Tabulka má maximálně cca 50 řádků, což je určeno již zmíněným limitem počtu řad v grafu Excelu. Pokud se vytvoří řádků více, na výsledný vzhled grafu to nebude mít vliv. Graf je určen max. padesáti řadami entalpií. Tabulka se vytváří podobným způsobem jako tabulky předchozí, přičemž se v každém z padesáti cyklů sleduje podmínka jestli entalpie v právě vytvořeném řádku není větší než entalpie  $i''$  pro maximální teplotu v tabulce konstantních teplot. Pokud ano, cyklus se ukončí. V každém cyklu se inkrementuje proměnná „radek“ a po skončení cyklu se proměnná „radek“ přiřadí do proměnné „pocet\_radku\_entalpie“. Tato proměnná je dále využita v cyklu pro dopočítání hodnot  $x''$  a  $t$  do tabulky entalpií. Ten se provede právě tolikrát, kolik řádků je již vytvořeno a tím vznikne kompletní tabulka.

- Pro kompletní tabulku tedy chybí už pouze dva sloupce. Algoritmus vyplnění posledních dvou sloupců bude nejlépe patrný na diagramu, viz. příloha A.

V tomto diagramu je použito několik zkratk. První z nich je  $\text{doc}_t$ , jež značí dočasnou teplotu,  $\text{pd2}(\text{doc}_t)$  znamená, že se pro dočasnou teplotu se najde tlak  $p_D$ ,  $\text{rozdil}=v^*$  znamená, že do proměnné rozdílu se dosadí následující vzorec Excelu:  $\text{rozdil} = \text{Cells}(\text{radek}, 47).\text{Value} - (c_L * \text{docasna\_teplota} + (v_{tv} + c_D * \text{docasna\_teplota}) * 0.622 * ((1 * \text{pd2}) / (\text{Cells}(5, 2).\text{Value} - 1 * \text{pd2})))$ .

Ve vzorci  $\text{Cells}(\text{radek}, 47).\text{Value}$  znamená entalpie pro aktuální řádek,

$\text{Cells}(5, 2).\text{Value}$  je barometrický tlak vzduchu,  $c_L$ ,  $c_D$  a  $v_{tv}$  jsou konstanty.

Na konci hlavního cyklu se (jak je z diagramu patrné) dosadí do proměnné  $p_D$ , tlak

$$1 \cdot p_D''$$

do proměnné teplota se dosadí  $doc\_t$  (tedy dočasná teplota). Do dvou prázdných sloupců se pak na příslušný řádek vloží  $x''$ , které se spočítá dle vzorce

$$x'' = 0,622 \cdot \left( \frac{p_D}{p - p_D} \right)$$

a do druhého sloupce se vloží přímo vypočítaná teplota  $t$ . Toto se provede pro každý řádek tabulky.

- Nyní je graf hotový, mění se pouze přepisováním výše uvedených tabulek. Jeho řady jsou pevně dány. Do grafu lze vykreslit celkem 11 stavů vzduchu. Z toho je 10 stavů z paměti a jeden vypočítaný stav. Pro zobrazení těchto stavů slouží poslední tabulka „Body v grafu“.
- Tato tabulka obsahuje první sloupec teplotu, sem se na příslušný řádek dosadí vypočítaná teplota nebo teplota z paměti. Tvorba dalších sloupců je totožná s tvorbou tabulky konstantních teplot. Pro teplotu se vypočítá tlak,  $x''$ ,  $i''$ ,  $t_0$ , vzdálenost  $t_0$ , dále se spočítají souřadnice X1, Y1, X2, Y2. Těmito body vznikne pomyslná úsečka, na které bude výsledný stav ležet. Pro určení přesné polohy stavu se z paměti, popř. z vypočítaného stavu dosadí do nového sloupce vypočítaná relativní vlhkost  $\varphi$ .

Výsledná souřadnice X se potom spočítá podle vzorce:

$$X = X1 + (X2 - X1) \cdot \frac{\frac{f_i}{100} \cdot p - p_D''}{p - \frac{f_i}{100} \cdot p_D''}$$

Výsledná souřadnice Y se spočítá podle vzorce:

$$Y = Y1 + (Y2 - Y1) \cdot \frac{\frac{f_i}{100} \cdot p - p_D''}{p - \frac{f_i}{100} \cdot p_D''}$$

- Pokud je vykreslený bod zobrazen, graf odkazuje na příslušné souřadnice v tabulce, pokud není zobrazen, jako souřadnice bodu se nastaví 0,0 (viz. řádky pod tabulkou) a styl zobrazení se nastaví na „žádný“. Tím není vykreslený bod na souřadnicích 0,0 vidět.

## 6. Závěr

### 6.1. Zhodnocení

Výsledkem této práce je popis fyzikální problematiky vlhkého vzduchu, řešení algoritmů výpočtu parametrů vlhkého vzduchu, způsob tvorby programu pro výpočet v Excelu, způsob tvorby Molliérova i-x diagramu v Excelu a zobrazování vypočteného stavu.

Dalším výsledkem práce je plně funkční program v Excelu, který pro 3 zadané parametry vlhkého vzduchu ze sedmi možných dopočítává nejen 4 zbylé parametry, ale i 8 dalších. Jeden ze zadávaných parametrů musí být vždy celkový tlak. Zadány mohou být následující parametry vlhkého vzduchu: celkový tlak, teplota, teplota mokrého teploměru, teplota rosného bodu, relativní vlhkost, měrná vlhkost a entalpie. Dalšími parametry vlhkého vzduchu, které program počítá jsou: měrná hmotnost, absolutní vlhkost, tlak par, tlak nasycených par, tlak nasycených par při mokré teplotě, výparné resp. sublimační teplo při mokré teplotě, entalpie při mokré teplotě a plynová konstanta vlhkého vzduchu.

Výsledkem je i program na vykreslení Molliérova i-x diagramu v Excelu. Program umožňuje pružné nastavení rozsahu teplot, měrné vlhkosti a pružnou volbu kroku zobrazovaných teplot a entalpií. Vykreslovány jsou izotermy, izoentalpy, křivky konstantních relativních a čáry konstantních měrných vlhkostí. Program zabezpečuje i vykreslení spočítaných stavů vlhkého vzduchu do diagramu.

Program provádí výpočty v oblasti nenasyceného a nasyceného vzduchu v rozsahu teplot od  $-83^{\circ}\text{C}$  do  $120^{\circ}\text{C}$ , měrných vlhkostí do  $100\text{ g/kg s.v.}$  a celkového tlaku od  $10\text{ kPa}$  do  $1000\text{ kPa}$ . Správnost výpočtu a grafického zobrazení byla prověřena, tím se podařilo cíl práce splnit.

### 6.2. Možné rozšíření

Výpočet a grafické zobrazení je možno rozšířit do oblasti přesyceného vzduchu, lze počítat další parametry jako například měrné vlhkosti a měrné hmotnosti nasyceného vzduchu, nasyceného vzduchu při mokré teplotě, měrnou hmotnost suchého vzduchu atd. v zadání by se mohla alternativně objevit místo celkového tlaku nadmořská výška. Použitím dalších fyzikálních zákonů a náročnějších algoritmů lze posunout hranice teplot, měrných vlhkostí a tlaků. Grafickou část by bylo možné rozšířit o čáry konstantních měrných vlhkostí, směrové měřítko, o

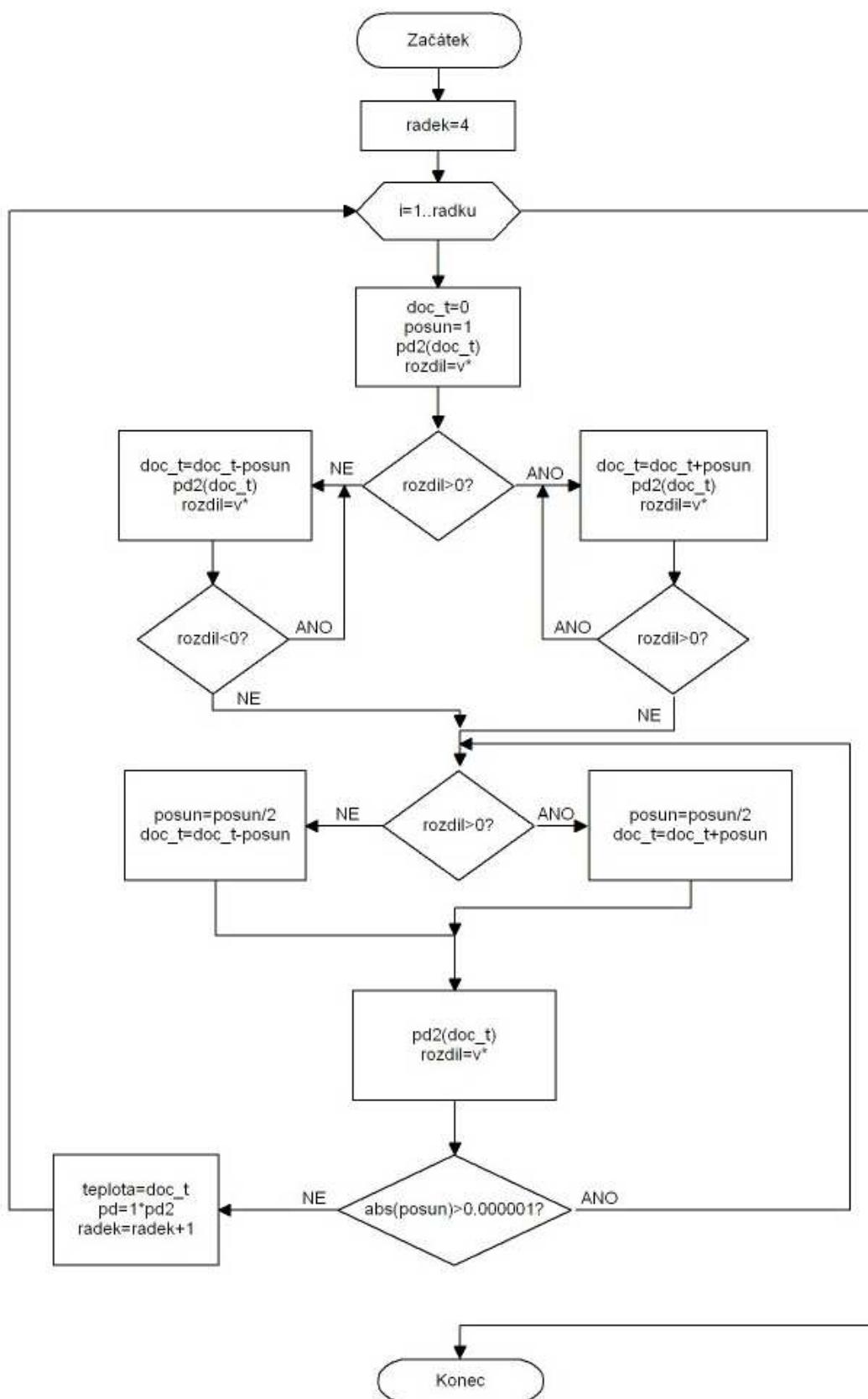


popisky entalpií a relativních vlhkostí a mohly by být zobrazeny i parciální tlaky vodních par, vykreslovány čáry změn stavu vzduchu s podílem vázaného a citelného tepla apod. List parní tabulky umožňuje i zhotovení výpočtového programu parametrů stavu samostatné vody a páry i grafické vykreslení T-s diagramu. Samotný program lze urychlit nejen efektivnějším vyhledáváním v tabulkách ale i vytvořením programu numerického řešení soustav rovnic, které by právě uvedené vyhledávání v tabulkách nahradilo. Toto může být tématem jiné práce.

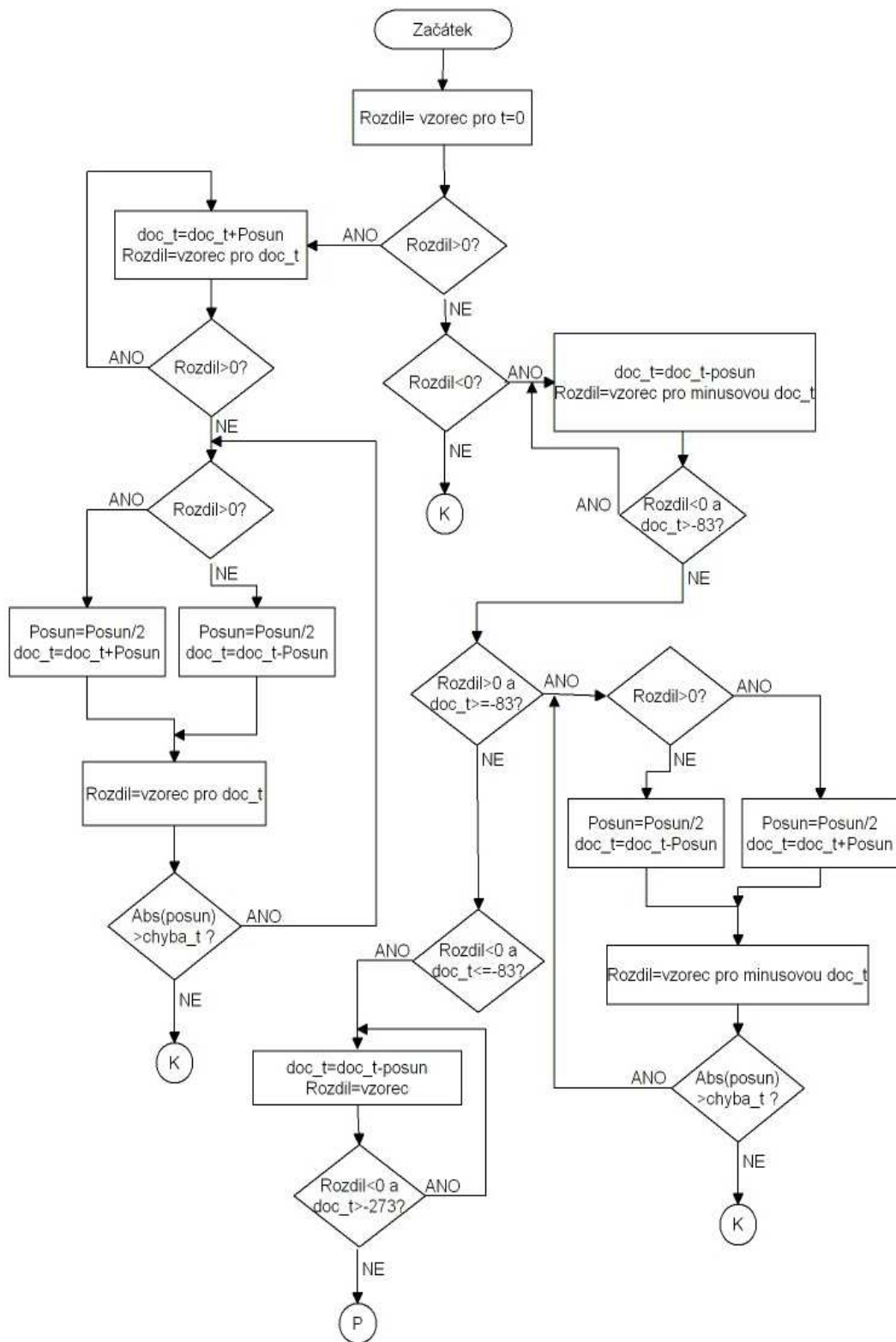
## 7. Použitá literatura

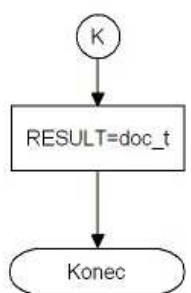
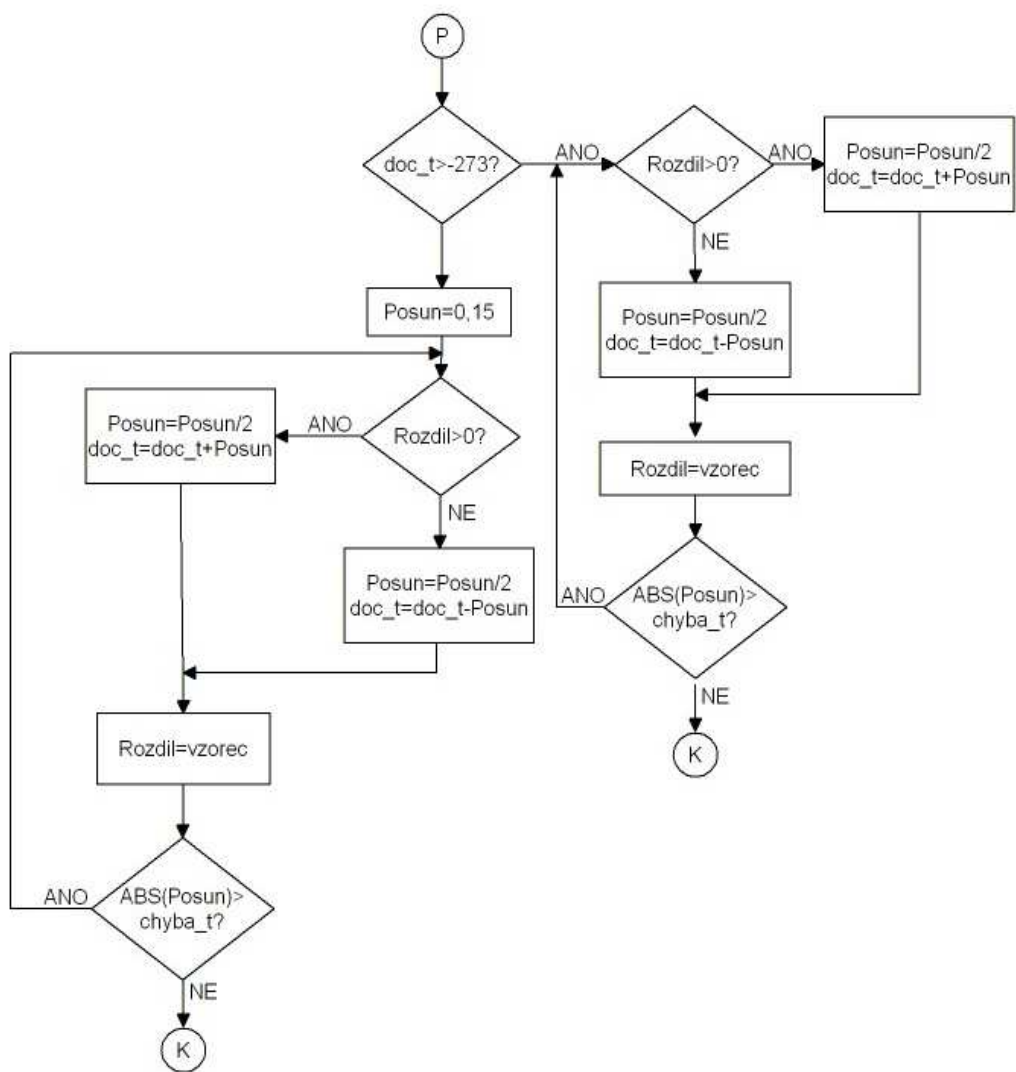
- [1] CHYSKÝ, Jaroslav. *Vlhký vzduch*. Praha : SNTL, 1977. 156 s.
- [2] ŠIFNER, Oldřich, KLOMFAR, Jaroslav. *Mezinárodní standardy termofyzikálních vlastností vody a vodní páry*. 1. vyd. Praha : Academia, 1996. 174 s. ISBN 80-200-0596-X.
- [3] *Excel - tipy a triky* [online]. c2007-2009 [cit. 2009-03-20]. Dostupný z WWW: <<http://lorenc.info/3MA381/excel-tipy-a-triky.htm>>.
- [4] *VBA - Jak začít* [online]. 2006 [cit. 2009-03-20]. Dostupný z WWW: <[http://www.slezak-petr.cz/VBA/VBA\\_web.htm](http://www.slezak-petr.cz/VBA/VBA_web.htm)>.
- [5] *Classes in VBA* [online]. c1997-2009 [cit. 2009-03-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.cpearson.com/excel/Classes.aspx>>.

Příloha A – postup dopočítání hodnot ve sloupcích x“, t v tabulce entalpií



## Příloha B – Algoritmus pro vypočítání teploty pro tlak





## Příloha C – ukázky zdrojových kódů

### Část zdrojového kódu při vytváření grafu

```
Dim Graf As TGraf
Set Graf = New TGraf
' Vytvoření grafu
Graf.NastavOsy
'Graf.VytvorTabulkuFi1
Graf.Vytvor_tabulku_teplo
Graf.Vytvor_tabulku_fi
Graf.Vytvor_tabulku_entalpie
Graf.PocitejXaT
Range("A1").Select
If Sheets("graf").Cells(5, 2).Value = Val(hlavni.tlak) * 1000 Then
    Nastaveni_grafu.Vykreslit.Enabled = True
Else
    Nastaveni_grafu.Vykreslit.Enabled = False
```

### Zdrojový kód pro vykreslení stavu vzduchu z paměti

```
If CheckBox1.Value = True Then
    ActiveSheet.Unprotect password:=heslo_listu
    ActiveSheet.ChartObjects("diagram").Activate
    ActiveChart.SeriesCollection(164).XValues = "=graf!R5C68"
    ActiveChart.SeriesCollection(164).Values = "=graf!R5C69"
    With ActiveChart.SeriesCollection(164)
        .MarkerBackgroundColorIndex = 13
        .MarkerForegroundColorIndex = 13
        .MarkerStyle = xlCircle
        .Smooth = True
        .MarkerSize = Sheets("Parní tabulky").Cells(33, 29).Value
        .Shadow = False
    End With
    ActiveSheet.Protect password:=heslo_listu, DrawingObjects:=True,
Contents:=True, Scenarios:=True
    Range("A1").Select
Else
    ActiveSheet.Unprotect password:=heslo_listu
    ActiveSheet.ChartObjects("diagram").Activate
    ActiveChart.SeriesCollection(164).XValues = "=graf!R16C68"
    ActiveChart.SeriesCollection(164).Values = "=graf!R16C69"
    With ActiveChart.SeriesCollection(164)
        .MarkerStyle = xlNone
    End With
    ActiveSheet.Protect password:=heslo_listu, DrawingObjects:=True,
Contents:=True, Scenarios:=True
    Range("A1").Select
End If
```

## Hledání hodnoty v parních tabulkách pro hodnotu ve sloupci entalpie

```
Public Sub sloupec_entalpie(ByVal Z As Double)
Cells(6, 14).Activate
Do Until ActiveCell.Value > CDBl(Z)
ActiveCell.Offset(1, 0).Activate
Loop
End Sub
```

## Vytváření tabulky konstantních teplot

```
Range("O7:X7").Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).ClearContents

Dim i As Integer
Dim radek As Integer

radek = 6
pocet_radku_teplo = 6

For i = 3 To CInt((Cells(11, 2).Value - Cells(10, 2).Value) / Cells(13, 2).Value)

If (CDBl(Cells(radek, 16)) < CDBl(Cells(5, 2))) And (CDBl(Cells(radek,
15)) <= CDBl(Cells(11, 2))) Then

Range("O5:X" & radek).Select
Selection.AutoFill Destination:=Range("O5:X" & radek + 1), Type:=xlFillDefault
radek = radek + 1
pocet_radku_teplo = pocet_radku_teplo + 1
End If

Next i
```

## Mazání hodnot uložených v paměti

```
varovani = MsgBox("Opravdu chcete vymazat paměť 4 ?", vbYesNo +
vbQuestion, "Upozornění")

If varovani = vbYes Then

For Each bunka In Range("AC6:AC21")
bunka.Value = ""
Next

TextBox4.BackColor = &HC0FFC0
TextBox4.Value = ""
OptionButton4.BackColor = &HC0FFC0
Else

End If
```