



Bakalářská práce

Konstrukce Mollierova diagramu vlhkého vzduchu pro různé hodnoty tlaků

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

Matěj Chytra

Vedoucí práce:

Ing. Magda Vestfálová, Ph.D.

Katedra energetických zařízení

Liberec 2024



Zadání bakalářské práce

Konstrukce Mollierova diagramu vlhkého vzduchu pro různé hodnoty tlaků

<i>Jméno a příjmení:</i>	Matěj Chytra
<i>Osobní číslo:</i>	S20000284
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra energetických zařízení
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je zkonstruovat přehledný Mollierův diagram vlhkého vzduchu pro běžný rozsah vlastností atmosférického vzduchu

1. Proveďte rešerši dostupných (používaných) Mollierových diagramů vlhkého vzduchu.
2. Na základě teorie směsí plynů a vlhkostí proveďte výpočet bodů soustavy křivek konstantních teplot a konstantních relativních vlhkostí v souřadné soustavě "měrná vlhkost" – "entalpie".
3. Vypočtené parametry křivek zakreslete přehledným způsobem do diagramu "měrná vlhkost" – "entalpie".
4. Mollierův diagram vlhkého vzduchu zkonstruujte pro několik vhodně vybraných celkových tlaků vlhkého vzduchu.

Rozsah grafických prací: grafické přílohy dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: 30-50 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: čeština

Seznam odborné literatury:

1. Středa, I.: Základy rovnovážné termodynamiky, TUL, 2018
2. Šafařík, P., Vestfálová, M.: Termodynamika vlhkého vzduchu, vydavatelství ČVUT, Praha, 2016
3. Chyský, J., Hemzal, K. a kol.: Větrání a klimatizace, BOLIT, Brno, 1993

Vedoucí práce: Ing. Magda Vestfálová, Ph.D.
Katedra energetických zařízení

Datum zadání práce: 1. listopadu 2022

Předpokládaný termín odevzdání: 22. května 2024

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
garant studijního programu

V Liberci dne 1. listopadu 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Konstrukce Mollierova diagramu vlhkého vzduchu pro různé hodnoty tlaků

Abstrakt

Bakalářská práce se v úvodní části zabývá teoretickým základem pro pochopení a určení stavu vlhkého vzduchu. Dále popisuje postup výpočtů jednotlivých veličin potřebných pro vytvoření Mollierova diagramu. V závěrečné části je popsána vlastní konstrukce křivek – izochar teplot a relativních vlhkostí v Mollieorvě diagramu

Klíčová slova

Vlhký vzduch, Mollierův diagram, h-x diagram, izobarický děj

The construction of the Mollier diagram of moist air for various pressures values

Abstract

The bachelor thesis deals in the introductory part with the theoretical basis for understanding and determining the state of humid air. It also describes the procedure of calculations of the individual variables needed to create a Mollier diagram. In the final part, the actual construction of the curves – isochars of temperature and relative humidity in the Molliere diagram is described.

Keywords

Moist air, Mollier's diagram, h-x diagram, isobaric process

Poděkování

Velice bych chtěl poděkovat své vedoucí práce, paní Ing. Magdě Vestfálové, Ph.D., její cenné připomínky k práci byly vždy věcné, a i když se v mé práci našly faktické chyby vždy mě na ně dokázala upozornit a navedla mě na jejich korektní formulaci.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině, která při mně vždy stála a podporovala mě v úspěšném dokončení vysoké školy, i když studium zde trvalo o chlup déle, než je libo.

Rád bych také poděkoval své přítelkyni, která mě také velice podporovala a také za konečnou korekturu této práce.

V neposlední řadě bych chtěl také poděkovat kolegům ve své práci a své práci celkově, jelikož díky ní nyní vím, co bych ve své budoucí kariéře chtěl dělat.

Obsah

1	Úvod	13
2	Rešerše	14
3	Termodynamické pojmy a veličiny	18
3.1	Rovnovážný – fázový diagram	18
3.2	Ideální plyn	18
3.3	Ideální směs plynů	20
3.3.1	Daltonův model.....	20
4	Teorie vlhkého vzduchu	21
4.1	Vlhký vzduch a jeho složky.....	21
4.1.1	Suchý vzduch a jeho vlastnosti	21
4.1.2	Voda a její vlastnosti	22
4.2	Parciální tlak syté vodní páry p_p''	23
4.3	Vlhkost vzduchu	24
4.3.1	Absolutní vlhkost	24
4.3.2	Relativní vlhkost	24
4.3.3	Měrná vlhkost	25
4.4	Entalpie vlhkého vzduchu.....	25
5	Mollierův diagram vlhkého vzduchu	28
6	Praktická část (konstrukce h-x diagramu)	30
6.1	Konstrukce diagramu v programu Excel	31
6.2	Konstrukce izoterem.....	31
6.3	Křivky konstantních relativních vlhkostí.....	33
6.4	Osa parciálního tlaku par	35
6.5	Diagramy pro různé hodnoty celkového tlaku.....	36
7	Vyhodnocení a diskuse výsledků	38
8	Závěr	39

Seznam symbolů

a	absolutní vlhkost	[kg/m ³]
c _p	měrná tepelná kapacita při stálém tlaku	[J/ (kg · K)]
c _v	měrná tepelná kapacita při stálém objemu	[J/ (kg · K)]
h	měrná entalpie	[J/kg]
H	entalpie	[J]
h	nadmořská výška	[km]
h _{1+x}	entalpie (1+x) kg vlhkého vzduchu	[J/ kg]
k	skutečná velikost mřížky měrné vlhkosti	[cm]
l _{l,g}	výparné teplo	[J/kg]
l _{s,g}	sublimační teplo	[J/kg]
l _{s,l}	skupenské teplo tání	[J/kg]
M	molová hmotnost	[kg/kmol]
m _p	hmotnost páry	[kg _p]
m _{sv}	hmotnost suchého vzduchu	[kg _{sv}]
m _{vv}	hmotnost vlhkého vzduchu	[kg _{vv}]
p	tlak	[Pa]
p _b	barometrický tlak	[Pa]
p _{kr}	kritický tlak	[Pa]
p _n	normální tlak	[Pa]
p _p	parciální tlak páry	[Pa]
p _p "	parciální tlak sytých par	[Pa]
p _{sv}	parciální tlak suchého vzduchu	[Pa]
p _{vv}	parciální tlak vlhkého vzduchu	[Pa]
r	měrná plynová konstanta	[J/ (kg · K)]
R	molová (univerzální) plynová konstanta	[J/ (kmol · K)]
r _p	měrná plynová konstanta páry	[J/ (kg · K)]
r _{sv}	měrná plynová konstanta suchého vzduchu	[J/ (kg · K)]
t	teplota	[°C]
T	termodynamická teplota	[K]
t _{kr}	kritická teplota	[°C]
t _n	normální teplota	[°C]
u	měrná vnitřní energie	[J/kg]
v	měrný objem	[m ³ /kg]
V	objem	[m ³]
x	měrná vlhkost vlhkého vzduchu	[kg _p /kg _{sv}]
x'	přebytek vlhkosti ve formě kapalné fáze	[kg _p /kg _{sv}]
x''	měrná vlhkost nasyceného vzduchu	[kg _p /kg _{sv}]
x'''	přebytek vlhkosti ve formě tuhé fáze	[kg _p /kg _{sv}]
γ	úhel sklonu mřížky entalpie h _{1+x} od svislé roviny	[°]
κ	poissonova konstanta	[-]
ρ	hustota	[kg/m ³]
φ	relativní vlhkost	[-]
ω	úhel sklonu mřížky entalpie h _{1+x} od vodorovné roviny	[°]

Seznam indexů

k	kapalná fáze
p	pára
t	tuhá fáze
sv	suchý vzduch
vv	vlhký vzduch
tr	trojný bod
kr	kritický bod
n	normální
i	složka ve směsi
V	izochorický
p	izobarický
"	stav sytosti

Seznam obrázků

Obrázek 1: Mollierův diagram využívaný na ČVUT	14
Obrázek 2: Mollierův diagram využívaný na VŠB-TUO	14
Obrázek 3: Mollierův diagram využívaný na TUL	15
Obrázek 4: Mollierův diagram využívaný na ZCU	15
Obrázek 5: Mollierův diagram využívaný na KIT pro tlak 0,2 MPa.....	16
Obrázek 6: Mollierův diagram využívaný na KIT pro tlak 0,3 MPa.....	16
Obrázek 7: Psychometrický diagram	17
Obrázek 8: Fázový (rovnovážný) diagram	18
Obrázek 9: Schéma Mollierova diagramu [1]	28
Obrázek 10: h-x diagram – izotermy v oblasti nenasyceného vzduchu	31
Obrázek 11: h-x diagram – izotermy v oblasti mlhového vzduchu.....	32
Obrázek 12: h-x diagram – izotermy v oblasti mrazivého vzduchu	33
Obrázek 13: h-x diagram – křivky konstantních relativních vlhkostí	34
Obrázek 14: Mollierův h-x diagram	34
Obrázek 15: Mollierův diagram – osa parciálního tlaku par	35
Obrázek 16: Mollierův diagram – křivky nasycení pro různé tlaky	36
Obrázek 17: Mollierův digram – křivky nasycení pro tlaky blízké $p = 100$ kPa	37

Seznam grafů

Graf 1: Závislost parciálního tlaku par p_p na měrné vlhkosti x	35
--	----

Seznam tabulek

Tabulka 4.1: Tabulka složení suchého atmosférického vzduchu [8].....	21
Tabulka 4.2: Stanovení maximálního tlaku s platností stavové rovnice ideálního plynu	23
Tabulka 4.3: Tabulka hodnot konstant C_1 až C_{13} pro výpočet parciálního tlaku par [9]	24
Tabulka 6.1: Tabulka tlaků vzduchu na určitých místech planety	30
Tabulka 6.2: Hodnoty měrné vlhkosti sytého vzduchu odpovídající teplotě a tlaku.....	36

1 Úvod

Plynný obal Země je tvořen směsí plynů, jež dohromady tvoří suchý vzduch. Ten zpravidla vždy obsahuje i určité množství vody ve formě vodní páry, mlhy či ledových krystalů. V důsledku měnících se teplot a vlhkosti se denně setkáváme s projevy obsahu vodních par ve vzduchu, ať už se jedná o déšť, mlhu, rosu, sníh či námrazu, nebo v opačném případě o vypařování. Při studiu vlhkého vzduchu je klíčovým nástrojem Mollierův diagram vlhkého vzduchu, který zobrazuje vztahy mezi tlakem, teplotou a obsahem vlhkosti vzduchu. Je neocenitelným prostředkem pro inženýry a vědce v oblastech klimatizace, energetiky, meteorologie či v nově vznikajícím odvětví získávání vody ze vzduchu v oblastech, které v důsledku klimatické změny přicházejí o zdroje pitné vody.

Tato práce se zabývá tvorbou Molliera diagramu pro různé tlaky s hlavním důrazem kladeným na jeho jednoduchost a přehlednost. K tvorbě diagramu je třeba znát vztahy mezi jednotlivými veličinami, a proto se práce bude z velké části zaměřovat na teoretický základ vlhkého vzduchu.

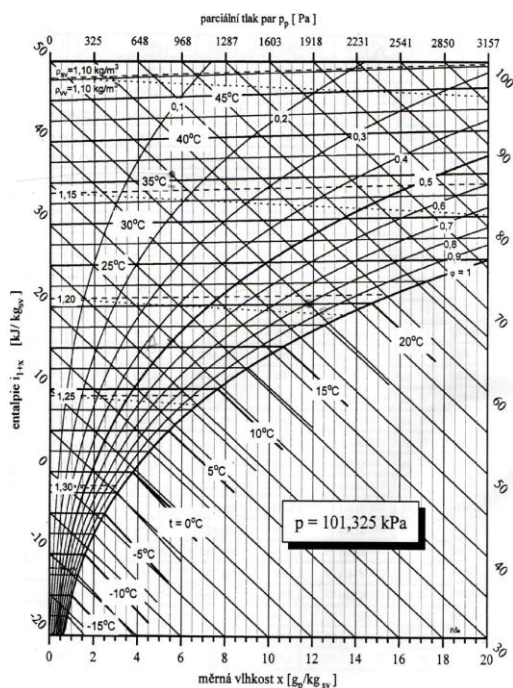
2 Rešerše

Mollierův diagram je velice užitečný nástroj v oblasti klimatizace a vytápění budov, meteorologie a klimatologie, zemědělství, průmyslové výroby a zpracování. Kdekoli, kde potřebujeme určit stav vlhkého vzduchu.

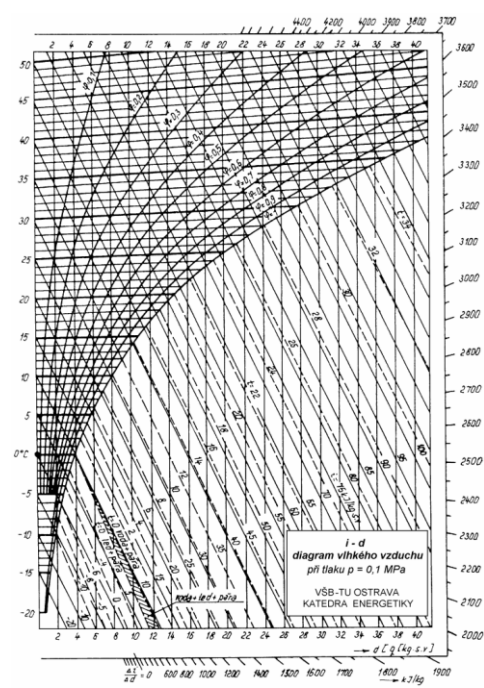
V dnešní době se k určování stavu vlhkého vzduchu převážně využívají softwary k tomu určené. Fyzické diagramy jsou ovšem stále neodmyslitelnou součástí praxe z důvodu jednoduchosti a rychlosti odečítání. Jejich nevýhodou je ovšem úzká využitelnost a v mnoha případech také nepřehlednost.

Mollierovy diagramy používané na českých technických vysokých školách jsou konstruovány hlavně pro normální atmosférický tlak a jemu blízké tlaky. Mollierův diagram využívaný na ČVUT **Obrázek 1** [1] v Praze je jeden z vůbec nepřehlednějších, které lze nalézt. Je to hlavně díky vhodné volbě měřítka, pozici popisů jednotlivých křivek ale také díky tomu že křivky konstantních izoterm v oblasti přesycení končí s malým přesahem za křivkou nasycení. Další výhodou je osa parciálního tlaku par, která je v horní části diagramu. Osa by ovšem mohla být vytvořena tak, aby stupnice byla lineární a ne tak, že uvádí hodnotu odpovídající jednotlivým měrným vlhkostem. Největší výhodou, kterou zde ovšem můžeme nelézt je, že na pravé straně diagramu máme stupnici s popisem entalpie vlhkého vzduchu. Pro ještě lepší přehlednost by ovšem mohla být číslována po přírůstcích pěti.

Oproti tomu diagram využívaný na VŠB-TUO **Obrázek 2** [2] je dost nepřehledný například díky měřítku průmětu osy měrné vlhkosti, které je dvojnásobné oproti diagramu z ČVUT. Křivky konstantních izoterm v přesycené oblasti jsou přes celý diagram což na přehlednosti také nepřidává. Dále zde chybí osa parciálního tlaku par a na pravé straně diagramu je vynášena stupnice teploty. Jedinou jeho výhodou je, že křivky relativních vlhkostí pod teplotou $t = 5^\circ\text{C}$ dále nepokračují, jelikož díky měřítku by byly prakticky nečitelné.

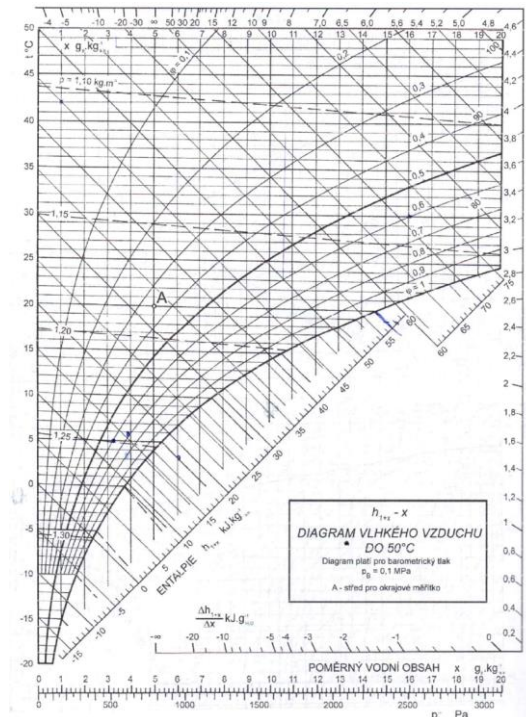


Obrázek 1: Mollierův diagram využívaný na ČVUT



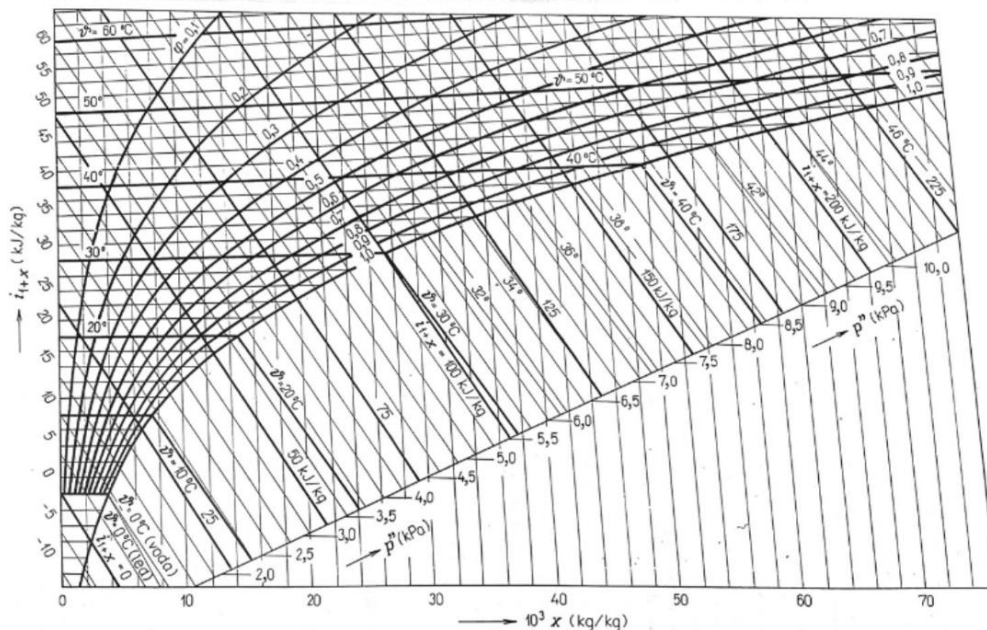
Obrázek 2: Mollierův diagram využívaný na VŠB-TUO

Diagram využívaný na TUL **Obrázek 3** [3] je dostatečně přehledný ovšem není přehlednější než ten využívaný na ČVUT. Nevýhodou je opět, že na pravé části diagramu je vynášena stupnice teploty. Jeho výhodou ovšem je vyznačení relativní vlhkosti 0,5 a 1 silnou čarou a také to že stupnice měrné vlhkosti je jak na spodní, tak i na horní části diagramu.



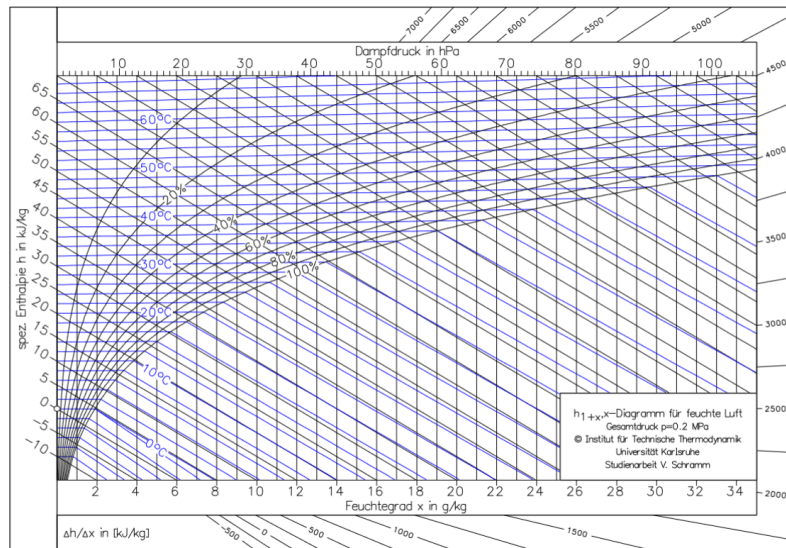
Obrázek 3: Mollierův diagram využívaný na TUL

Dále pak diagram využívaný na ZCU **Obrázek 4** [4] je také velice přehledný i přesto, že jeho měřítko stupnice měrné vlhkosti je dvojnásobné oproti diagramu na VŠB-TUO. Zajímavostí je orientace osy zobrazující parciální tlak sytých par, která je kolmá na osu entalpie.

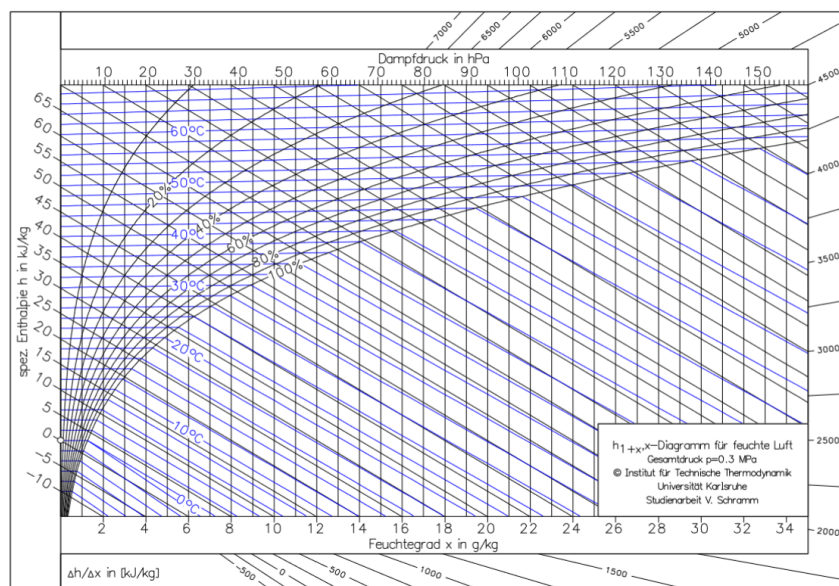


Obrázek 4: Mollierův diagram využívaný na ZCU

Dalšími dostupnými diagramy jsou diagramy využívané na Technologickém institutu v Karlsruhe (KIT) pro tlak vzduchu 2 000 **Obrázek 5** a 3 000 hPa **Obrázek 6** [5]. Ty se zřejmě využívají při zkouškách v aerodynamických tunelech, kde je z důvodu proudícího vzduchu daleko vyšší tlak.

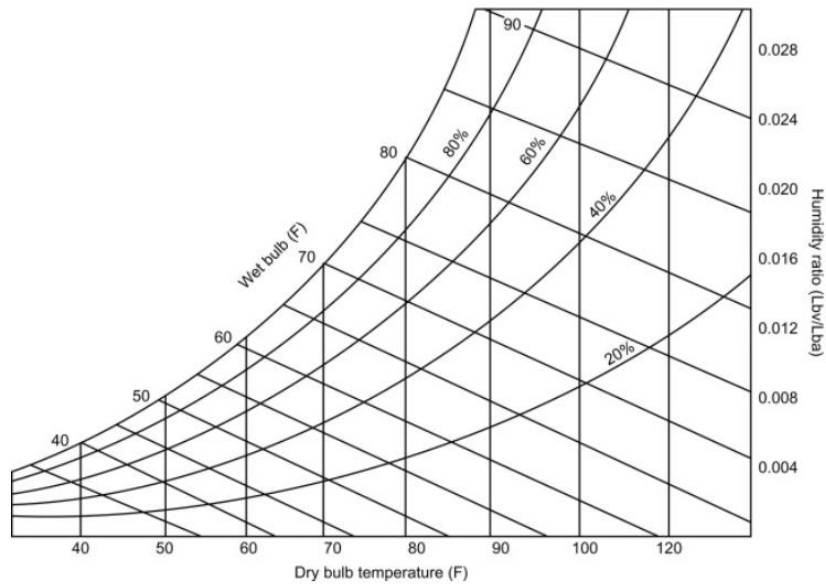


Obrázek 5: Mollierův diagram využívaný na KIT pro tlak 0,2 MPa



Obrázek 6: Mollierův diagram využívaný na KIT pro tlak 0,3 MPa

Dalším typem diagramů pro vlhký vzduch jsou takzvané psychometrické diagramy **Obrázek 7** [6]. Tyto diagramy se využívají převážně v anglicky mluvících zemích. De facto se jedná o zrcadlový Mollierův diagram. Dále pak teplota může být udávána ve stupních Celsia nebo ve stupních Fahrenheita.



Obrázek 7: Psychometrický diagram

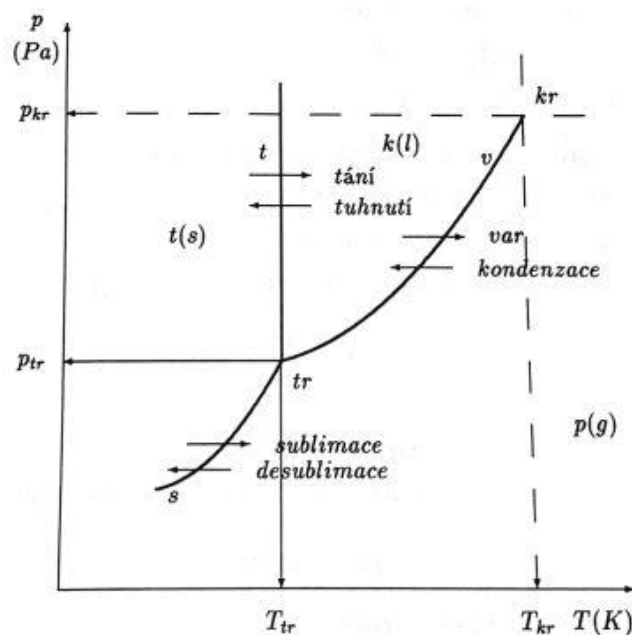
Všechny diagramy dostupné v tištěné formě jsou tvořeny pouze černobíle. Hlavním důvodem je ekonomičnost tisku diagramů, ale díky této úspoře ztrácíme přehlednost diagramů.

Mnou vytvořené diagramy budou pro lepší přehlednost konstruovány tak aby konstantní křivky od sebe byly odlišeny i barevně. Dále v mé konstrukci využijeme poznatků získaných z diagramů využívaných na různých vysokých školách. Budeme se tedy snažit využít výhody těchto diagramů a vyvarovat se jejich nevýhodám.

3 Termodynamické pojmy a veličiny

3.1 Rovnovážný – fázový diagram

Každá látka za normálních teplot a tlaků existuje v tuhé – t, kapalně – k nebo plynné – p fázi. Oblasti těchto fází zobrazujeme do tzv. rovnovážného neboli fázového diagramu **Obrázek 8** [1], který ukazuje závislost skupenské přeměny na tlaku p [Pa] a teplotě T [K]. Mezní křivky od sebe oddělují jednotlivé fáze látky a vychází z jednoho tzv. trojného bodu. V trojném bodu – tr se mohou všechny fáze nacházet současně a mohou se skokově měnit.



Obrázek 8: Fázový (rovnovážný) diagram

Křivka varu končí v tzv. kritickém bodě – kr, které jsou pro každou látku zcela určité. Pro vodu jsou

$$p_{kr} = 22,064 \text{ MPa}, \quad T_{kr} = 647,096 \text{ K}.$$

Nad parametry kritického bodu není možné rozlišit, zdali se jedná o kapalnou či plynnou fázi, jelikož kapalná látka se může změnit na plynnou, aniž by prošla varem [1].

3.2 Ideální plyn

Jelikož všechny vlastnosti plynů jsou popsány složitými vztahy, zavádíme proto pojem ideální plyn. Ideální plyn je pouze teoretický model plynu, který nám zjednodušuje popis chování plynů. Předpokladem pro toto zjednodušení je, že velikosti molekul jsou nulové, plyn je tedy dokonale stlačitelný. Dále mezi molekulami nepůsobí žádné jiné síly než srážky mezi nimi, proto je vnitřní energie plynu rovna součtu kinetických energií jednotlivých molekul. Tyto srážky jsou dokonale pružné, nedochází tedy k disipaci energie [7]. Tato zjednodušení často vyjadřují s dostatečnou přesností i chování některých reálných plynů.

Pro model ideálního plynu platí jednoduchý vztah mezi jeho termodynamickou teplotou T [K], tlakem p [Pa] a objemem v [m³/kg]. Nazýváme jej stavovou rovnicí ideálního plynu. Pro 1 kg plynu platí

$$pv = rT. \quad (3.1)$$

V případě zadané hustoty ρ [kg/m³] lze využít i rovnice ve tvaru

$$p = rT\rho, \quad (3.2)$$

kde r [J/(kg · K)] je měrná plynová konstanta.

Měrná plynová konstanta

Měrná plynová konstanta je vlastností jednotlivých plynů a vyjadřuje, jaký je poměr mezi univerzální (molární) plynovou konstantou a molární hmotností plynu

$$r = \frac{R}{M}, \quad (3.3)$$

kde r [J/kg · K] je měrná plynová konstanta, $R = 8314,41$ [J/(kmol · K)] je univerzální plynová konstanta a M [kg/kmol] molární hmotnost plynu. Tento poměr je důležitý pro charakterizaci chování plynu při různých podmínkách. Vyšší hodnota měrné plynové konstanty naznačuje, že molekuly plynu mají vyšší energii vztaženou na jednotku hmotnosti.

Mayerova rovnice

Mayerova rovnice vyjadřuje vztah mezi měrnou tepelnou kapacitou při konstantním tlaku c_p [J/(kg · K)], měrnou tepelnou kapacitou při konstantním objemu c_v [J/(kg · K)] a měrnou plynovou konstantu r [J/(kg · K)]

$$c_p - c_v = r. \quad (3.4)$$

Pro model ideálního plynu platí, že základní měrné tepelné kapacity c_p a c_v jsou konstantní, nezávisí tedy na teplotě ani tlaku [8].

Dále vnitřní energie a entalpie ideálních plynů závisí pouze na teplotě, což je důsledkem jeho výše uvedených vlastností

$$du = c_v \cdot dT, \quad (3.5)$$

$$dh = c_p \cdot dT, \quad (3.6)$$

kde u [J/kg] je vnitřní energie, h [J/kg] je entalpie, c_v [J/kg · K] je izochorická měrná tepelná kapacita, c_p [J/(kg · K)] je isobarická měrná tepelná kapacita a T [K] je termodynamická teplota.

Ideální plyn zůstává v celém rozsahu teplot a tlaků v plynném stavu, nezkapalňuje ani netuhne [1]. Reálné plyny se svými vlastnostmi blíží modelu ideálního plynu v oblastech vysokých teplot a nízkých tlaků (informativně: $T > 2T_{kr}$ a $p < 0,05 p_{kr}$) [7]. Většina reálných plynů se modelu ideálního plynu blíží již za normálních podmínek ($p_n = 101,325$ kPa a $T_n = 273,15$ K)

Poissonova konstanta

Poissonova konstanta je poměr izobarické a izochorické měrné tepelné kapacity ideálního plynu

$$\frac{c_p}{c_V} = \kappa. \quad (3.7)$$

Závisí na počtu atomů v molekule. Pro jednoatomové plyny jako je argon Ar je Poissonova konstanta $\kappa = 1,66$, pro dvouatomové plyny jako je vodík H₂ nebo kyslík O₂ je rovna $\kappa = 1,4$ a pro tříatomové plyny je rovna $\kappa = 1,33$.

Z rovnic (3.4) a (3.7) lze odvodit vztahy pro výpočet měrných tepelných kapacit ideálních plynů [7]

$$c_p = \frac{\kappa}{\kappa-1} r, \quad (3.8)$$

$$c_V = \frac{1}{\kappa-1} r, \quad (3.9)$$

kde κ [-] je Poissonova konstanta, r [J/ (kg · K)] je měrná plynová konstanta, c_p [J/ (kg · K)] je izobarická měrná tepelná kapacita a c_V [J/ (kg · K)] je izochorická měrná tepelná kapacita.

3.3 Ideální směs plynů

Model ideální směsi plynů je směs, ve které se plyny navzájem chemicky neslučují. Dále nedochází k objemovým a tepelným efektům. Z těchto důvodů můžeme předpokládat, že suchý vzduch je ideální směsí. Tento model ideální směsi plynů lze také aplikovat na zplodiny hoření a směsi plynů a vlhkostí. Pro popis vlastností směsi plynů využíváme Daltonova nebo Amagatova modelu [7].

3.3.1 Daltonův model

Daltonův zákon lze popsat tak, že máme uzavřenou nádobu naplněnou směsí plynů o určité teplotě a tlaku a různém množství jednotlivých složek o určitém celkovém objemu. Pokud bychom byli schopni vyčerpát všechny složky až na jedinou (A), při zachování teploty a objemu, tlak v nádobě klesne. Zbývající tlak čisté složky A v nádobě pak nazýváme parciální tlak složky A. Model ideálních plynů předpokládá, že na sebe jednotlivé molekuly plynů nepůsobí jinak než srážkami mezi nimi. Každá složka ideálního plynu se chová tak, jako by byla v daném prostoru sama. Daltonův model nám tedy říká, že celkový tlak směsi p [Pa] je roven součtu parciálních tlaků jednotlivých složek p_i [Pa]

$$p = \sum_i p_i. \quad (3.10)$$

Tento model odpovídá teorii ideálních plynů, který předpokládá, že na sebe jednotlivé molekuly plynu nepůsobí jinak než srážkami mezi nimi.

4 Teorie vlhkého vzduchu

4.1 Vlhký vzduch a jeho složky

Vlhký vzduch je směs suchého vzduchu a vlhkosti tvořené obsahem H₂O převážně ve formě vodní páry. Vlhký vzduch můžeme za běžných podmínek považovat za ideální. Z kapitoly 3.2 víme, že model ideálního plynu můžeme použít až do tlaku $p = 0,05 p_{kr}$. Za běžných atmosférických podmínek ($p_n = 101,325 \text{ kPa}$ a $T_n = 273,15 \text{ K}$) dosahuje parciální tlak suchého vzduchu tlaku $p = 97,662 \text{ kPa}$ tj. $p = 0,026 p_{kr}$ a parciální tlak páry $p = 2,338 \text{ kPa}$ tj. $p = 0,0001 p_{kr}$. Tyto podmínky jednoznačně dokazují, že vlhký vzduch můžeme považovat za ideální plyn a tento model nám bude poskytovat dostatečně přesné výsledky.

Celkový tlak vlhkého vzduchu p_{vv} [Pa] můžeme dle Daltonova zákona určit jako součet parciálního tlaku suchého vzduchu p_{sv} [Pa] a parciální tlak vodní páry p_p [Pa]

$$p_{vv} = p_{sv} + p_p. \quad (4.1)$$

4.1.1 Suchý vzduch a jeho vlastnosti

Suchý vzduch je směs plynů, jehož složení je uvedeno viz, **Tabulka 4.1**. V blízkosti povrchu země je složení suchého vzduchu prakticky neměnné. Za běžných atmosférických podmínek dosahuje barometrického tlaku $p_a \doteq 0,1 \text{ [MPa]}$ a teplot $t \doteq 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$.

Složka suchého vzduchu	Značka	Objemová koncentrace [%]	Hmotnostní koncentrace [%]	Molární hmotnost $\left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}\right]$
Dusík	N ₂	78,03	75,55	28,0134
Kyslík	O ₂	20,93	23,1	31,998
Argon	Ar	0,94	1,3	39,948
Oxid uhličitý	CO ₂	0,03	0,05	44,0095
Vzduch	-	1,00	1,00	28,964

Tabulka 4.1: Tabulka složení suchého atmosférického vzduchu [8]

Z důvodů uvedených v kapitole 4.1 můžeme suchý vzduch považovat za ideální plyn, a proto pro něj platí stavová rovnice ideálního plynu

$$p_{sv} = r_{sv} T \rho_{sv}, \quad (4.2)$$

kde p_{sv} [Pa] je tlak suchého vzduchu, s_v [kg/m³] je hustota suchého vzduchu, r_{sv} [J/(kg · K)] je měrná plynová konstanta suchého vzduchu a T [K] je termodynamická teplota.

Základní termodynamické vlastnosti suchého vzduchu [1]:

Střední molární hmotnost:	$M_{sv} = 28,964 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
Měrná plynová konstanta:	$r_{sv} = 287,062 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$
Izobarická měrná tepelná kapacita:	$c_{p_{sv}} = 1005,968 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$
Poissonova konstanta:	$\kappa_{sv} = 1,4$

Kritická teplota:

$$t_{kr_{sv}} = -140,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Kritický tlak:

$$p_{kr_{sv}} = 3,77 \text{ MPa}$$

4.1.2 Voda a její vlastnosti

Voda je pro průmysl velice významná z důvodu svých tepelných vlastností jako jsou vysoká tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita. V kombinaci s její dostupností vytváří nejlepší podmínky pro přenos energie. Jak již bylo řečeno, vodní páru ve vlhkém vzduchu lze za běžných atmosférických podmínek považovat za ideální plyn, a proto pro ni platí stavová rovnice ideálního plynu

$$p_p = r_p T \rho_p, \quad (4.3)$$

kde p_p [Pa] je tlak páry, ρ_p [kg/m³] je hustota páry, r_p [J/(kg · K)] je měrná plynová konstanta páry a T [K] je termodynamická teplota.

Dalšími důležitými vlastnostmi vody jsou její fázové přechody, kterých se využívá v oblastech energetiky, chlazení nebo vytápění.

Základní termodynamické vlastnosti páry [1]:

Střední molární hmotnost:

$$M_p = 18,015 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

Měrná plynová konstanta:

$$r_p = 461,518 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

Poissonova konstanta:

$$\kappa_p = 1,328$$

Kritická teplota:

$$T_{kr_p} = 647,096 \text{ K}$$

Kritický tlak:

$$p_{kr_p} = 22,064 \text{ MPa}$$

Výparné teplo:

$$l_{s,l} = 2500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Skupenské teplo tání:

$$l_{s,g} = 333,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Izobarická měrná tepelná kapacita páry:

$$c_{p_p} = 1884 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

Izobarická měrná tepelná kapacita kapaliny:

$$c_{p_k} = 4219 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

Izobarická měrná tepelná kapacita ledu:

$$c_{p_l} = 2093,4 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

Pro stanovení maximální hodnoty tlaku, pro kterou platí model ideálního plynu využijeme tabulky termodynamických vlastností syté vody a syté vodní páry [3]. Uděláme to tak, že ze stavové rovnice ideálního plynu (3.1) si vyjádříme měrný objem páry v_p [m³/kg]

$$v_p = \frac{r_p T}{p_p}. \quad (4.4)$$

Následně budeme do vztahu (4.4) dosazovat hodnoty syté páry odpovídající určitým tlakům

z tabulek a vypočtené hodnoty měrného objemu par v_p [m^3/kg] jsou porovnány s těmi co nalezneme v tabulkách. Po zanesení dat do tabulky dostáváme.

p [MPa]	T [K]	Vypočtená hodnota v_p [m^3/kg]	Hodnota v_p určená z tabulek [m^3/kg]	Chyba [%]
0,1	372,78	1,722	1,694	-1,6
0,2	393,39	0,909	0,886	-2,6
0,4	416,79	0,481	0,462	-4,1
0,5	425,02	0,393	0,375	-4,7
0,8	443,59	0,256	0,240	-6,6
1	453,07	0,209	0,194	-7,7
1,5	471,48	0,145	0,132	-10,2
2	485,57	0,112	0,100	-12,6
3	507,04	0,078	0,067	-17,1
4	523,54	0,060	0,050	-21,5
5	537,13	0,050	0,039	-25,8
10	584,18	0,027	0,018	-49,7
14	609,85	0,020	0,011	-75,2

Tabulka 4.2: Stanovení maximálního tlaku s platností stavové rovnice ideálního plynu

Tabulka 4.2 ukazuje hodnoty měrných objemů par v_p [m^3/kg] vypočtené pomocí stavové rovnice ideálního plynu mají do tlaku $p = 0,5$ MPa chybu menší než pět procent. Tlaky vyšší než $p = 0,5$ MPa mají chybu větší. Předpokládáme že, chyba do pěti procent je přijatelná, a tudíž maximální možný tlak pro, který je možné stavovou rovnicí ideálního plynu použít je $p = 0,5$ MPa

4.2 Parciální tlak syté vodní páry p_p''

Suchý vzduch není s vodní párou do $100\text{ }^\circ\text{C}$ při normálním tlaku mísitelný v libovolném poměru. Maximální množství páry, které dokáže suchý vzduch pojmout, je omezeno stavem nasycení vlhkého vzduchu. Parciální tlak syté vodní páry je tedy tlakem vodní páry při nasycení.

Parciální tlak syté páry ve vlhkém vzduchu je při běžných atmosférických podmínkách velice nízký. Při teplotě $t=20\text{ }^\circ\text{C}$ je tlak sytých par $p_p'' = 2\,388\text{ Pa}$.

Jak je patrné (viz. **Obrázek 8**) tlak sytých par je závislý pouze na teplotě. Jeho hodnoty lze zjišťovat z tabulek.

Pro určení parciálního tlaku sytých par lze použít vztah v literatuře [9], který je platný od teploty -100 až $0\text{ }^\circ\text{C}$

$$\ln p_p'' = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3 T + C_4 T^2 + C_5 T^3 + C_6 T^4 + C_7 \ln(T), \quad (4.5)$$

a pro teploty od 0 až $200\text{ }^\circ\text{C}$ platí

$$\ln p_p'' = \frac{C_8}{T} + C_9 + C_{10} T + C_{11} T^2 + C_{12} T^3 + C_{13} \ln(T), \quad (4.6)$$

kde T [K] je termodynamická teplota a C_1 až C_{13} jsou konstanty pro výpočet parciálního tlaku sytých par.

Konstanta	Hodnota	Konstanta	Hodnota
C ₁	-5,6745359·10 ³	C ₈	-5,8002206 · 10 ³
C ₂	6,3925247	C ₉	1,3914993
C ₃	-9,677843·10 ⁻³	C ₁₀	-4,8640239 · 10 ⁻²
C ₄	6,2215701·10 ⁻⁷	C ₁₁	4,1764768 · 10 ⁻⁵
C ₅	2,0747825·10 ⁻⁹	C ₁₂	-1,4452093 · 10 ⁻⁸
C ₆	-9,484024·10 ⁻¹³	C ₁₃	6,5459673
C ₇	4,1635019		

Tabulka 4.3: Tabulka hodnot konstant C₁ až C₁₃ pro výpočet parciálního tlaku par [9]

4.3 Vlhkost vzduchu

Vlhkost vzduchu je mírou obsahu vodní páry ve vzduchu a může být udávána několika způsoby. Jedná se například o absolutní, relativní a měrnou vlhkost.

4.3.1 Absolutní vlhkost

Absolutní vlhkost vzduchu a [kg/m³] vyjadřuje hmotnost páry m_p [kg] obsažené v jednotkovém objemu vzduchu V [m³]

$$a = \frac{m_p}{V}. \quad (4.7)$$

Absolutní vlhkost je tedy hustota par ρ_p při tlaku p_p a dané teplotě. Absolutní vlhkost páry tedy závisí na teplotě a pro homogenní směs se může měnit v rozsahu od 0 až do ρ_p'' [7]

4.3.2 Relativní vlhkost

Relativní vlhkost φ [-] definujeme jako poměr dané absolutní vlhkosti a [kg/m³] ku absolutní vlhkosti ve vzduchu nasyceném a'' [kg/m³] při stejné teplotě. Mění se v rozmezí od 0 pro suchý vzduch do 1 pro nasycený vlhký vzduch. Můžeme jej též udávat v procentech [7]

$$\varphi = \frac{a}{a''} = \frac{\rho_p}{\rho_p''}. \quad (4.8)$$

Dosazením (4.3) do (4.8) dostaneme vztah pro určení relativní vlhkosti ve tvaru

$$\varphi = \frac{\rho_p}{\rho_p''} = \frac{p_p \cdot r_p \cdot T}{p_p'' \cdot r_p \cdot T} = \frac{p_p}{p_p''}. \quad (4.9)$$

Vztah (4.10) byl odvozen za předpokladu platnosti stavové rovnice pro ideální plyn.

4.3.3 Měrná vlhkost

Pro výpočty vlhkého vzduchu je nejužívanější veličina charakterizující obsah vlhkosti měrná vlhkost x [kg_p/kg_{sv}]. Ta je definována jako hmotnostní množství páry m_p [kg] vztažené na jednotku hmotnosti suchého vzduchu m_{sv} [kg] ve vlhkém vzduchu o celkové hmotnosti m_{vv} [8]

$$x = \frac{m_p}{m_{sv}} = \frac{\rho_p}{\rho_{sv}}. \quad (4.10)$$

Celková hmotnost vlhkého vzduchu m_{vv} [kg] je rovna součtu hmotnosti suchého vzduchu m_{sv} [kg] a vodní páry m_p [kg]

$$m_{vv} = m_p + m_{sv}. \quad (4.11)$$

Dosadíme-li do vztahu pro měrnou vlhkost (4.10) vztah (4.9) a stavové rovnice (4.2), (4.3) obdržíme vztah mezi měrnou vlhkost x [kg_p/kg_{sv}] s relativní vlhkostí φ [-]

$$x = \frac{\rho_p}{\rho_p''} = \frac{p_p \cdot r_p \cdot T}{p_{sv} \cdot r_{sv} \cdot T} \doteq 0,622 \frac{\varphi \cdot p_p''}{p_{vv} - \varphi \cdot p_p''}. \quad (4.12)$$

Jedná-li se o vzduch nasycený, tj. $\varphi=1$ používáme vztah

$$x = x'' = 0,622 \frac{p_p''}{p_{vv} - p_p''}. \quad (4.13)$$

Jak již víme, vlhkost vzduchu se objevuje v různých fázích v závislosti na vnějších podmínkách, ať se jedná o páru, sníh či jinovatku. Měrnou vlhkost používáme i pro stanovení vlhkosti v oblasti přesyceného vlhkého vzduchu, tj. $x > x''$. Tedy při teplotách nad 0 °C obsahuje přesycený vlhký vzduchu krom syté páry x'' [kg_p/kg_{sv}] i přebytečně vyloučenou kapalnou fázi (vodní mlhu) x' [kg_p/kg_{sv}] a měrná vlhkost bude

$$x = x'' + x'. \quad (4.14)$$

Při teplotách pod 0 °C obsahuje přesycený vlhký vzduch jak sytou páru x'' [kg_p/kg_{sv}], tak i jinovatku či sníh x''' [kg_p/kg_{sv}] a tedy měrná vlhkost bude

$$x = x''' + x''. \quad (4.15)$$

Je-li teplota přesyceného vlhkého vzduchu $t = 0$ °C, vlhkost v něm obsažena bude ve formě syté páry x'' [kg_p/kg_{sv}] a dále může obsahovat tuhou fázi (sníh, jinovatka) x''' [kg_p/kg_{sv}] i kapalnou fázi (vodní mlhu) x' [kg_p/kg_{sv}]. Měrná vlhkost bude tedy

$$x = x''' + x'' + x'. \quad (4.16)$$

4.4 Entalpie vlhkého vzduchu

Entalpie je aditivní stavovou veličinou, tedy pro výpočet celkové entalpie vlhkého vzduchu sčítáme přírůstky entalpií od jednotlivých složek vlhkého vzduchu, které jej tvoří. Jelikož vlhký

vzduch kromě suchého vzduchu obsahuje i vlhkost v různých fázích dostáváme pro výpočet entalpie několik vztahů podle toho jaké fáze vlhký vzduch obsahuje [7].

Celková (měrná) entalpie je dána vztahem

$$H = m_{sv}h_{sv} + m_{H_2O}h_{H_2O} . \quad (4.17)$$

Po úpravě dostáváme

$$H = m_{sv} \left(h_{sv} + \frac{m_p}{m_{sv}} h_p \right) = m_{sv} (h_{sv} + x h_p) . \quad (4.18)$$

Pro výpočty stavu vlhkého vzduchu nevyužíváme měrnou entalpii vlhkého vzduchu, nýbrž využíváme entalpii vlhkého vzduchu o hmotnosti jednoho kilogramu suchého vzduchu a x kilogramů páry. Je to z důvodu, že při izobarických dějích obsahuje vlhký vzduch stále množství suchého vzduchu, ale množství vlhkosti se může měnit. Zavádíme proto označení h_{1+x} [J/kg_{sv}], které nám vyjadřuje entalpii vlhkého vzduchu o hmotnosti 1 kilogramu (suchého vzduchu) a x kilogramů (vlhkosti) [1]. V tom případě

$$h_{1+x} = 1 \cdot h_{sv} + x \cdot h_p + x' \cdot h_k + x''' \cdot h_t . \quad (4.19)$$

Absolutní hodnotu entalpie nelze určit. K vyčíslení jejích hodnot byly konvencí přijaty počáteční podmínky pro nulovou entalpii. Nulovou entalpii má suchý vzduch při teplotě 0 °C. Tedy entalpie suchého vzduchu h_{sv} [J/kg] je násobkem měrné tepelné kapacity vzduchu $c_{p_{sv}}$ [J/(kg · K)] a teploty t [°C]

$$h_{sv} = c_{p_{sv}} \cdot t . \quad (4.20)$$

Pro podíl vlhkosti je nulová entalpie definována ve stav kapalné vody v trojném bodě, pro zjednodušení budeme teplotu trojného bodu uvažovat jako $t = 0$ °C. Entalpie páry je tedy součtem skupenského výparného tepla při 0 °C $l_{s,l}$ [kJ/kg] a násobku měrné tepelné kapacity páry c_{p_p} [J/(kg · K)] s teplotou vlhkého vzduchu [7]

$$h_p = l_{s,l} + c_{p_p} \cdot t . \quad (4.21)$$

Za předpokladu nenasyceného vlhkého vzduchu tj. $x < x''$, dosadíme-li do vztahu (4.19) vztahy (4.20) a (4.21), získáme vzorec pro určení entalpie vlhkého vzduchu

$$h_{1+x} = c_{p_{sv}} \cdot t + x \cdot (l_{s,l} + c_{p_p} \cdot t) . \quad (4.22)$$

Pro nasycený vlhký vzduch dostáváme rovnici pro určení entalpie vlhkého vzduchu ve tvaru, kde x'' [kg_p/kg_{sv}] je vlhkost sytého vzduchu

$$h_{1+x} = c_{p_{sv}} \cdot t + x'' \cdot (l_{s,l} + c_{p_p} \cdot t) . \quad (4.23)$$

Jak bylo již uvedeno v kapitole 4.3.3, přesycený vlhký vzduch o teplotě nad 0 °C obsahuje vlhkosti ve formě syté páry a kapalné fáze. Entalpie kapalné fáze je dána násobkem teploty t a měrné tepelné kapacity vody c_{p_k} [J/(kg · K)]

$$h_k = c_{p_k} \cdot t . \quad (4.24)$$

Dosazením vztahů (4.23) a (4.24) do vztahu (4.19) získáváme vztah pro určení entalpie přesyceného vlhkého vzduchu o teplotě nad $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$h_{1+x} = c_{p_{sv}} \cdot t + x'' \cdot (l_{s,l} + c_{p_p} \cdot t) + x' \cdot c_{p_k} \cdot t. \quad (4.25)$$

Jedná-li se o přesycený vlhký vzduch o teplotě pod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, vlhkost se nachází ve formě páry a tuhé fáze. Entalpie tuhé fáze je dána součtem skupenského tepla tání při teplotě $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $l_{s,g}$ [kJ/kg] a násobkem měrné tepelné kapacity ledu c_{p_l} [J/(kg · K)] a teploty

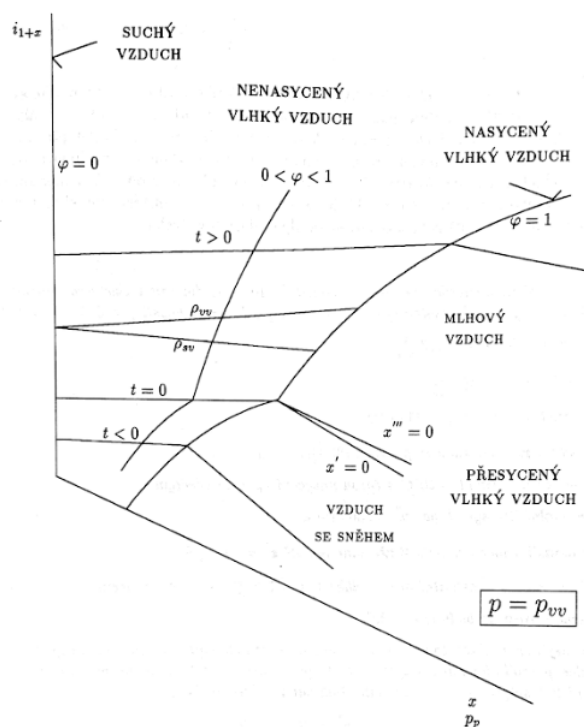
$$h_t = -l_{s,g} + c_{p_l} \cdot t. \quad (4.26)$$

Dosazením vztahů (4.23) a (4.26) do vztahu (4.19) získáme vztah pro určení entalpie přesyceného vlhkého vzduchu o teplotě pod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$h_{1+x} = c_{p_{sv}} \cdot t + x'' \cdot (l_{s,l} + c_{p_p} \cdot t) + x''' \cdot (-l_{s,g} + c_{p_l} \cdot t). \quad (4.27)$$

5 Mollierův diagram vlhkého vzduchu

Mollierův diagram je jeden ze základních termodynamických nástrojů, který nám pomáhá určovat stav vlhkého vzduchu v technické praxi. Mollierův neboli h - x diagram znázorňuje závislost entalpie vlhkého vzduchu h_{I+x} [J/kg_{sv}] na měrné vlhkosti vzduchu x [g_p/kg_{sv}]. Pro praktické využití je vhodný zejména proto, že se v termodynamice často setkáváme s ději, kdy je vlhkému vzduchu odebíráno nebo dodáváno teplo za stálého tlaku. Toto teplo je rovno rozdílu entalpií h_{I+x} [J/kg_{sv}], které lze z diagramu snadno vyčíst [8].



Obrázek 9: Schéma Mollierova diagramu [1]

Obrázek 9 neboli Mollierův diagram je zvláštní v tom, že se nejedná o pravoúhlý diagram, ale o diagram, kde spolu osy (entalpie a měrné vlhkosti) svírají úhel asi 135°. Je to dáno tím, že kdyby osy svíraly úhel pouze úhel 90°, křivky konstantních relativních vlhkostí φ [-] by byly příliš strmé a z grafu by se velice špatně odečítalo [8].

Jeho další zvláštností je to, že je konstruován pro konkrétní hodnotu tlaku. Oproti tomu diagramy vlhkého vzduchu by musely být konstruovány jako trojrozměrné, na jejich třetí ose by byl vynášen tlak. Z toho důvodu jsou všechny děje v Mollierově diagramu popsány jako izobaričné, tedy každý diagram odpovídá pouze jednomu tlaku. Hodnota tlaku musí být na diagramu uvedena, jinak není diagram plně určen.

Každý Mollierův diagram je zkonstruován pouze pro jeden kilogram suchého vzduchu a x kilogramů páry z důvodů, jež byly řečeny v kapitole 3.4.

V diagramu jsou zaneseny křivky konstantních teplot neboli izotermy $t = konst.$ a křivky konstantních relativních vlhkostí $\varphi = konst.$ Z poznatků v kapitole 4 je jasné, že izotermy jsou přímky. Každá přímka izotermy nenasyceného vlhkého vzduchu vycházející na ose entalpie h_{I+x} , kde $x = 0$, z bodu $[0; c_{psv}t]$ a její směrnice je dána koeficientem u x tj. $(l_{s,l} + c_{pp} \cdot t)$, končí na křivce nasycení $\varphi = 1$ tj. $x = x''$.

V oblasti přesyčeného vlhkého vzduchu přímka izotermy vycházející na křivce nasycení $\varphi = 1$ z bodu $[x''; c_{p_{sv}} \cdot t + x'' \cdot (l_{s,l} + c_{p_p} \cdot t)]$ a její směrnice je dána koeficientem u x tj. $(c_{p_k} \cdot t)$ nebo $(-l_{s,g} + c_{p_l} \cdot t)$. To závisí na tom, zdali se jedná o teplotu $t > 0^\circ\text{C}$ nebo $t < 0^\circ\text{C}$. Proto v se při teplotě $t = 0^\circ\text{C}$ konstruuji dvě křivky, jedna pro případ, že všechna přebytečná voda je ve formě mlhy a druhou pro případ, že všechna přebytečná voda je ve formě jinovatky. S jistotou pak víme, že reálný stav přesyčeného vlhkého vzduchu při teplotě $t = 0^\circ\text{C}$ se bude nacházet mezi těmito dvěma přímkami.

Z rovnice (4.21) je zřejmé, že pro nenasyčený vlhký vzduch se se vzrůstající teplotou zvětšuje strmost jednotlivých přímek [7]. Izoterma $t = 0^\circ\text{C}$ vychází z počátku diagramu a probíhá kolmo k ose entalpie [2].

Spojením odpovídajících bodů jednotlivých izoterem se společnou hodnotou měrných vlhkostí $x = x''$ získáme křivku nasyceného vzduchu $\varphi = 1$. Pro křivky konstantních relativních vlhkostí $\varphi = \text{konst.}$ spojíme odpovídající body jednotlivých izoterem se společnou hodnotou měrných vlhkostí $x = \varphi$. Křivka relativních vlhkostí má v izotermě $t = 0^\circ\text{C}$ nepatrný zlom. Ten je způsoben tím, že křivky fázových přechodů sublimace a varu ve fázovém diagramu p-T vody a vodní páry nemají v trojném bodě společnou tečnu [1]. V diagramech můžou být i údaje například o hodnotě parciálních tlaků par či křivky hustoty vlhkého vzduchu.

6 Praktická část (konstrukce h-x diagramu)

Volba tlaků vlhkého vzduchu

Jak bylo řečeno v předchozí kapitole, všechny děje v Mollierově diagramu jsou izobarické. Pro jeho konstrukci je tedy potřeba si zvolit tlak, pro který budou diagramy konstruovány. Zvolená místa a jim odpovídající tlaky, pro něž budou diagramy konstruovány, jsou v tabulce 5.1.

Místo	Průměrný tlak [hPa]
Standartní atmosférický tlak (0 m.n.m.)	1013,25
Vrchol Sněžky (1602 m.n.m.)	835 [10]
Vrchol Mt. Everest (8849 m.n.m.)	360 [11]
Vrchol Mt. Blanc (4807 m.n.m.)	555
Hladina Mrtvého moře (430 m.p.m.)	1060
Liberec (359 m.n.m.)	970 [12]
Aerodynamický tunel 1	2500
Aerodynamický tunel 2	5000
Fyzikální atmosféra	1000
Průměrný tlak v ČR	980

Tabulka 6.1: Tabulka tlaků vzduchu na určitých místech planety

Pro některá místa lze hodnotu tlaku určit buď z meteorologických stanic nebo literatury, která se této problematice věnuje. U míst, kde se stanice nenacházejí, je tlak přepočítán v závislosti na nadmořské výšce dle vztahu [13]

$$p = p_b \cdot 0,88^h, \quad (6.1)$$

kde p [Pa] je tlak v nadmořské výšce h [km] a p_b [Pa] je tlak na mořské hladině.

Místa byla volena tak, aby byla něčím zajímavá. Bylo proto zvoleno místo s nejvyšší (Mt. Everest) a nejnižší nadmořskou výškou (hladina Mrtvého moře) na světě. Aby zde byl i tlak pro místo nacházející se mezi nejvyšším a nejnižším bodem světa, byl zvolen vrchol hory Mt. Blanc, který se nachází skoro uprostřed těchto dvou míst. Jelikož je tato práce psána na TUL byl zvolen průměrný tlak pro Liberec a také pro Českou republiku. Dále byla také zvolena nejvyšší hora Česka, a to Sněžka. Aby bylo možné zkontrolovat správnost zkonstruovaných diagramů byl zvolen tlak pro standartní a fyzikální atmosféru. Aby bylo možné vidět, jak diagramy vydají i v případě vysokých tlaků, byly zvoleny dva aerodynamické tunely s tlaky několásobně přesahující standartní atmosférický tlak.

Jakmile jsou učeny hodnoty tlaků všech míst, pro která je diagramy konstruován, je důležité si určit rozpětí teplot t [°C]. Je potřeba brát v potaz, jak hodnoty teplot, které na místě mohou nastat, tak i přehlednost diagramu. V oblasti nízkých teplot se křivky konstantních relativních vlhkostí φ [–] k sobě velice přibližují a je těžké odečíst správné hodnoty měrných vlhkostí x [kg_p/kg_{sv}], teplot t [°C] a entalpií vlhkého vzduchu h_{l+x} [J/kg].

Rozpětí teplot je voleno v rozmezí od -40 až 50 °C. Tento rozsah dokáže pokrýt velkou část teplot, které mohou nastat na všech zvolených místech. V případě nepřehlednosti kdykoliv můžeme v diagramu změnit meze hodnot x [kg_p/kg_{sv}] a h_{l+x} [J/kg].

6.1 Konstrukce diagramu v programu Excel

Konstrukci diagramu je prováděna v programu MS Excel z důvodu jeho jednoduchosti a uživatelské přívětivosti a také se jedná o program, se kterým mám již dřívější zkušenosti.

6.2 Konstrukce izoterem

Oblast nenasyceného vzduchu

Pro konstrukci izoterem v oblasti nenasyceného vlhkého vzduchu stačí rovnice (4.21), z které vyplývá, že izotermy jsou přímky, a tudíž pro jejich sestavení nám budou postačovat pouze dva body A a B [8]. Těmito dvěma body je entalpie pro měrnou vlhkost $x_A = 0$ a $x_B = x''$ při určité teplotě. Pro entalpii v bodě A tedy platí

$$h_{1+x} = c_{p_{sv}} \cdot t, \quad (6.2)$$

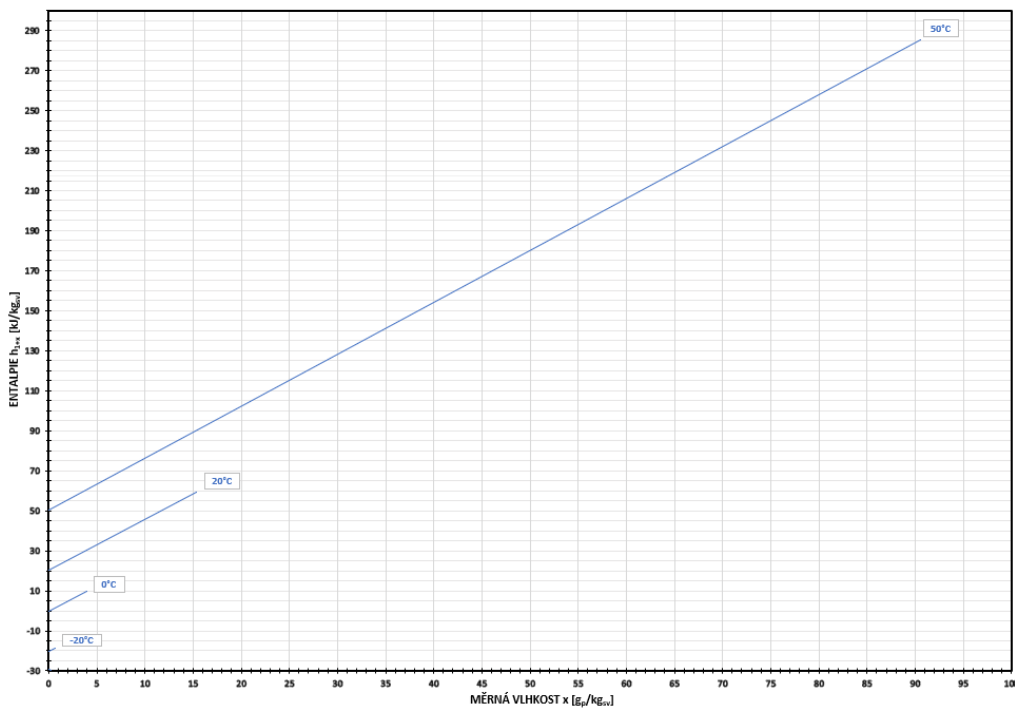
a pro entalpii v bodě B platí

$$h_{1+x} = c_{p_{sv}} \cdot t + x_B \cdot (l_{s,l} + c_{p_p} \cdot t), \quad (6.3)$$

kde x_B získáme ze vztahu

$$x_B = x'' = 0,622 \frac{p_p''}{p_{vv} - p_p''}. \quad (6.4)$$

Zanesením křivek konstantních izoterem ($t = -20 \text{ °C}$, 0 °C , 20 °C a 50 °C) získáme následující diagram pro tlak $p = 100 \text{ kPa}$.



Obrázek 10: h-x diagram – izotermy v oblasti nenasyceného vzduchu

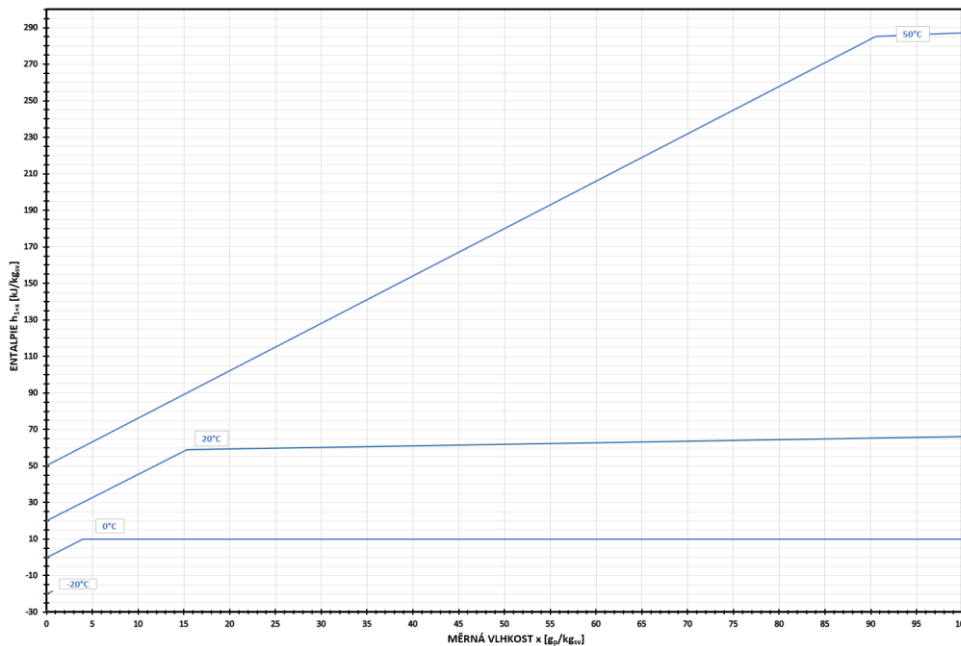
Oblast mlhového vzduchu

Pro konstrukci izoterm v oblasti mlhového vzduchu, tj. oblast přesyceného vlhkého vzduchu při teplotách $t \geq 0 \text{ °C}$, je potřeba znát počáteční a koncový bod těchto přímek. Počátečním bodem je hodnota entalpie na křivce nasycení pro danou teplotu a koncový bod je vypočítán pomocí vztahu (4.25)

$$h_{1+x} = c_{p_{sv}} \cdot t + x'' \cdot (l_{s,l} + c_{pp} \cdot t) + x' \cdot c_{pk} \cdot t, \quad (6.5)$$

kde x' je přebytečná vlhkost vyloučená ve formě vody. Ta je získána pomocí vztahu (4.14)

$$x = x'' + x'. \quad (6.6)$$



Obrázek 11: h-x diagram – izoterm v oblasti mlhového vzduchu

Pro přehlednost je požadováno, aby izoterm v přesycené oblasti nepokračovaly přes celý graf, ale končily za křivkou nasycení. Toho je dosaženo tak, že je zvoleno x' a následně je získána maximální vlhkost, do které budou izoterm pokračovat. Tyto hodnoty jsou dosazeny do rovnic (6.6) a (6.7). Tím je získán druhý bod izoterm v oblasti mlhového vzduchu.

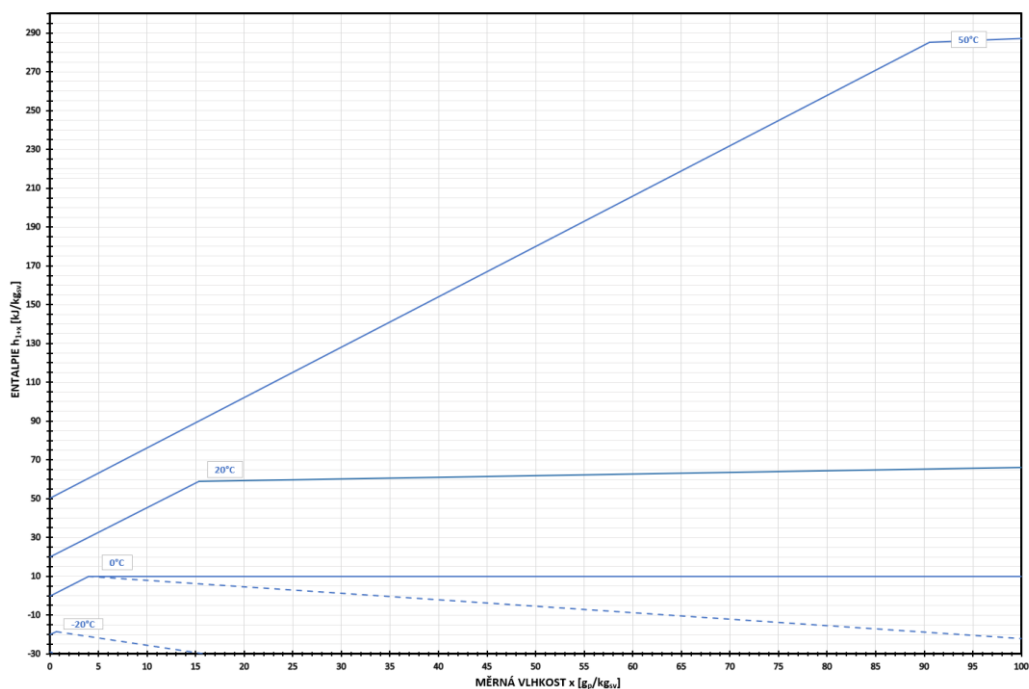
Oblast mrazivého vzduchu

Poslední konstrukcí jsou izoterm v oblasti mrazivého vzduchu, tj. oblast přesyceného vzduchu při teplotách $t \leq 0 \text{ °C}$. Jak již víme, jedná se o přímky, a tudíž potřebujeme znát dva body. Jako počáteční bod bereme hodnotu entalpie na křivce nasycení pro danou teplotu a koncový bod získáme pomocí vztahu (3.28):

$$h_{1+x} = c_{p_{sv}} \cdot t + x'' \cdot (l_{s,l} + c_{pp} \cdot t) + x''' \cdot (-l_{s,g} + c_{pl} \cdot t) \quad (6.7)$$

Kde x''' je přebytečná vlhkost vyloučená ve formě jinovatky či sněhu a získáme ji pomocí vztahu (3.17):

$$x = x''' + x'' \quad (6.8)$$



Obrázek 12: h-x diagram – izotermy v oblasti mrazivého vzduchu

Pro přehlednost, jako v případě mlhového vzduchu, si zvolíme hodnotu přesazení izoterm x''' . Izotermy v oblasti mrazivého vzduchu budou kresleny čárkovanou čarou.

6.3 Křivky konstantních relativních vlhkostí

Dalším krokem při tvorbě Mollierova diagramu je konstrukce křivek relativních vlhkostí $\varphi = konst.$ [–] pomocí vzorce

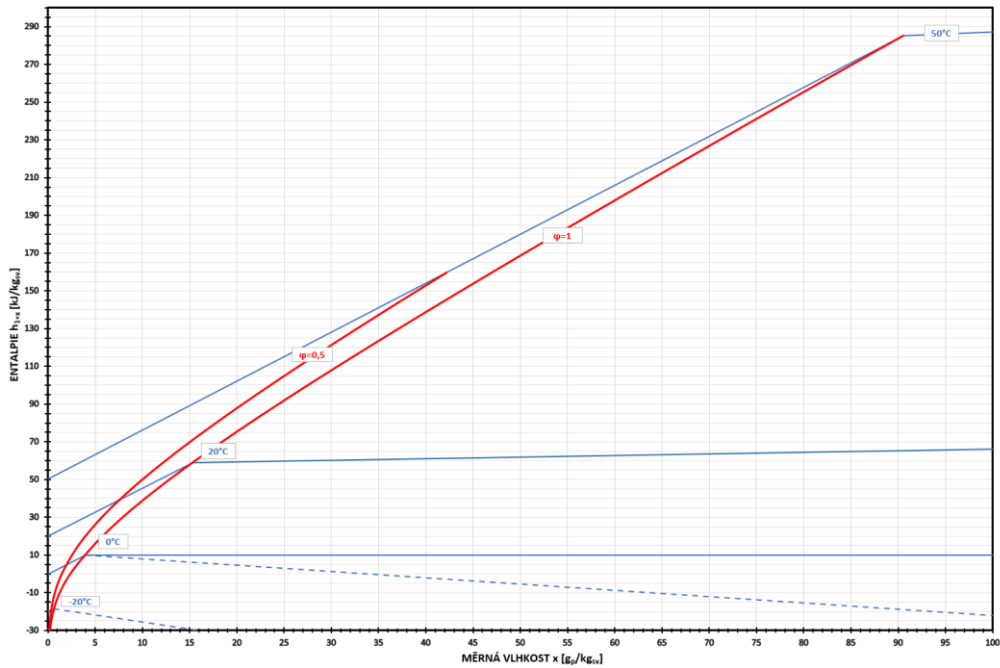
$$x = 0,622 \frac{\varphi \cdot p_p''}{p_{vv} - \varphi \cdot p_p''} \quad (6.9)$$

Jelikož již máme vytvořenou síť izoterm pro vytvoření křivky relativní vlhkosti $\varphi = 1$, stačí spojit koncové body izoterm pro nenasyčený vlhký vzduch.

Pro výpočet dalších křivek relativních vlhkostí je potřeba znát hodnoty parciálního tlaku sytých par p_p'' [Pa] pro námi zvolený rozsah teplot, který poslouží k určení měrné vlhkosti vzduchu x [kg_p/kg_{sv}]. Je k tomu využito vztahů (4.5) a (4.6)

Dále je potřeba získat hodnotu entalpie h_{1+x} [J/kg] odpovídající jednotlivým hodnotám x , pomocí vzorce

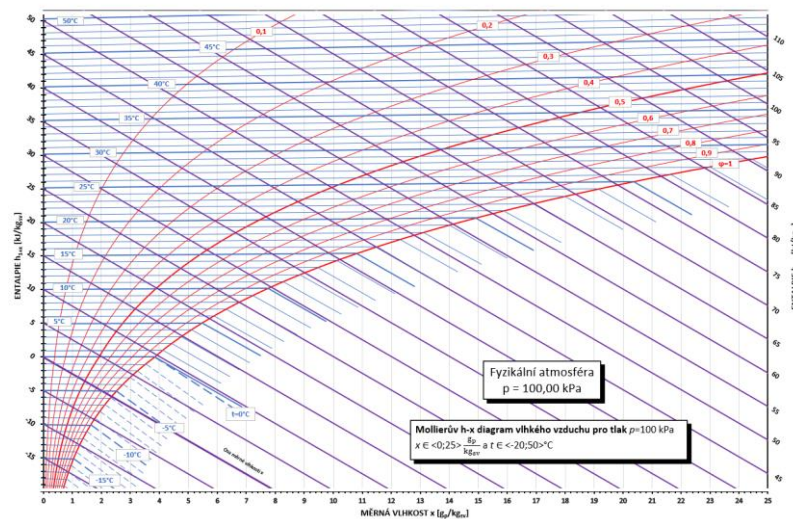
$$h_{1+x} = c_{p_{sv}} \cdot t + x \cdot (l_{s,l} + c_{p_p} \cdot t) \quad (6.10)$$



Obrázek 13: h-x diagram – křivky konstantních relativních vlhkostí

Jak je možné vidět takto zkonstruovaný h-x diagram je velice nepřehledný z důvodu velké strmosti křivek konstantní teploty a konstantní relativní vlhkosti.

V Mollierově h-x diagramu jsou použity kosoúhlé souřadnice, tedy osa měrné vlhkosti nesvívá s osou entalpie (svislou osou) pravý úhel, ale je sklopena šikmo dolů tak, aby izoterma $t = 0^\circ\text{C}$ byla v oblasti nenasyceného vlhkého vzduchu vodorovná přímka (tj. ypsilonové – svislé – souřadnice všech bodů v diagramu jsou posunuty dolů o hodnotu „ $x \cdot l_0$ “). **Obrázek 14** je tímto grafem. Osa měrné vlhkosti, tj. čára konstantní entalpie $h_{I+x} = 0$, je v diagramu vyznačena silnější čarou. V dolní části diagramu je vyneseny průmět osy měrné vlhkosti x do vodorovného směru s příslušným popisem hodnot měrné vlhkosti.



Obrázek 14: Mollierův h-x diagram

6.4 Osa parciálního tlaku par

Pro vytvoření osy udávající parciální tlak par je v Excelu využito funkce vytvoření vedlejší mřížky. Osa je konstruována tak, že vypočítána hodnota parciálního tlaku par odpovídá vlhkému vzduchu o určité vlhkosti x ze vztahu (4.13)

$$x = 0,622 \frac{p_p}{p_{vv} - p_p} \quad (6.11)$$

Úpravou rovnice je získán vztah pro výpočet parciálního tlaku par p_p

$$p_p = \frac{x \cdot p_{vv}}{x + 0,622} \quad (6.12)$$

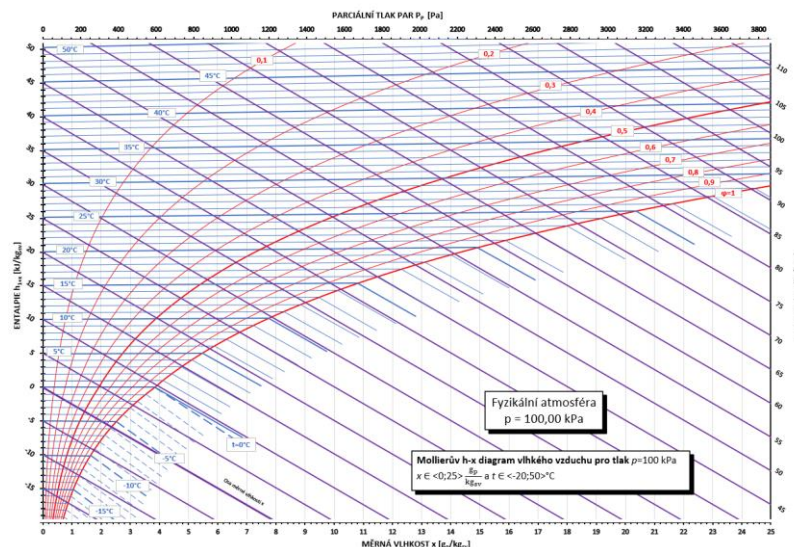
Vypočtené hodnoty ukazují závislost parciálního tlaku par na měrné vlhkosti (viz. **Graf 1**).



Graf 1: Závislost parciálního tlaku par p_p na měrné vlhkosti x

Závislost není přesně lineární, ale po provedení lineární aproximace ji můžeme za lineární považovat. Chyba způsobená lineární aproximací je velmi malá.

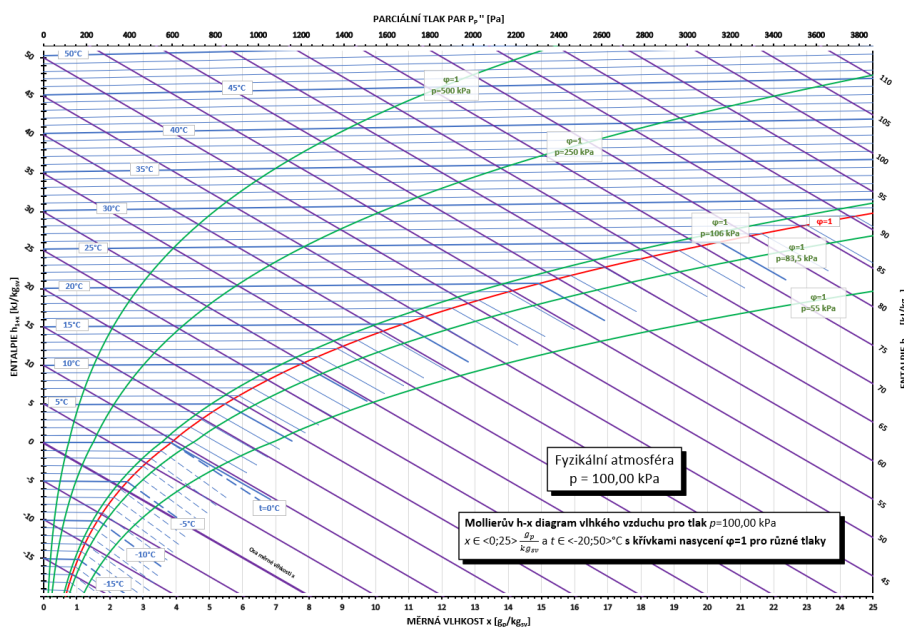
Stupnice parciálního tlaku par získaná linearizací je vynesena v horní části diagramu (viz, **Obrázek 15**).



Obrázek 15: Mollierův diagram – osa parciálního tlaku par

6.5 Diagramy pro různé hodnoty celkového tlaku

V příloze práce jsou Mollierovy diagramy zkonstruované pro zvolené hodnoty tlaků vlhkého vzduchu (viz, **Tabulka 6.1**). Pro jejich vzájemné porovnání jsou do Mollierova diagramu pro tlak $p = 100$ kPa vykresleny i křivky nasyceného vlhkého vzduchu, tj. $\varphi = 1$ pro tlaky ($p = 500$ kPa, 250 kPa, 106 kPa, 83,5 kPa, 55 kPa) (viz. **Obrázek 16**). Je tak získán přehled o tom, jaký vliv má změna tlaku na posunutí křivek v Mollierově diagramu.

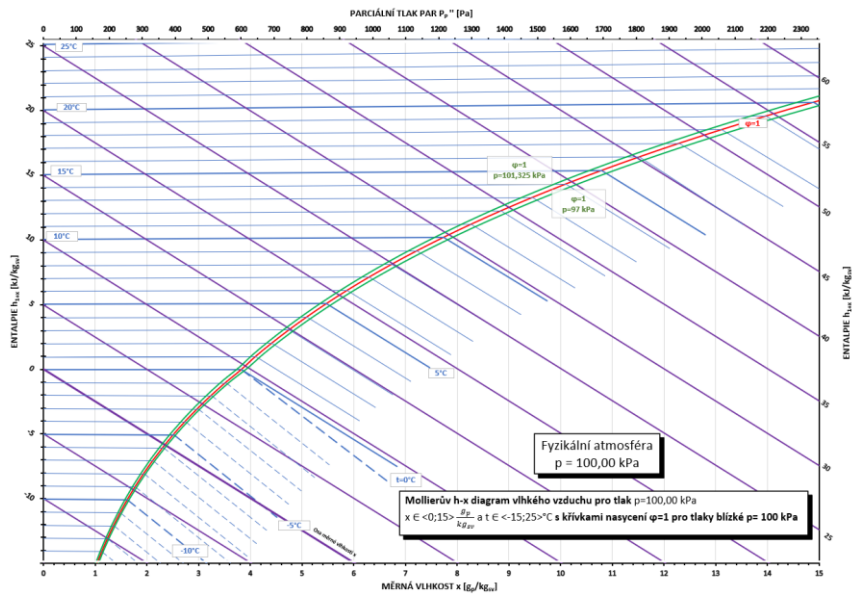


Obrázek 16: Mollierův diagram – křivky nasycení pro různé tlaky

Do téhož diagramu, tj. pro tlak $p = 100$ kPa, ale s jiným rozsahem měrných vlhkostí i entalpií vyneseny křivky nasyceného vlhkého vzduchu pro tlak odpovídající průměrnému tlaku v Liberci $p = 97$ kPa a pro standartní atmosférický tlak $p = 101,325$ kPa, tedy tlaky velmi blízké normálnímu atmosférickému tlaku (viz. **Obrázek 17**). Z něj je patrné, že při takto malých rozdílech tlaků vlhkého vzduchu by odečítané hodnoty veličin příliš nelišily. Porovnání hodnot jednotlivých měrných vlhkostí sytého vzduchu x'' pro tlaky $p = 101,325$ kPa, $p = 101,325$ kPa a $p = 101,325$ kPa při teplotě t (viz. **Tabulka 6.2**).

Tlak vlhkého vzduchu p [kPa]	Měrná vlhkost sytého vzduchu x'' [g _p /kg _{sv}] při teplotě $t = 0$ °C	Měrná vlhkost sytého vzduchu x'' [g _p /kg _{sv}] při teplotě $t = 15$ °C
97	3,96	11,14
100	3,84	10,8
101,325	3,79	10,65

Tabulka 6.2: Hodnoty měrné vlhkosti sytého vzduchu odpovídající teplotě a tlaku



Obrázek 17: Mollierův digram – křivky nasycení pro tlaky blízké $p = 100$ kPa

7 Vyhodnocení a diskuse výsledků

Mollierových diagramů je nepřehledné množství a každý je více, či méně přehledný. Přesto je každý diagram vždy konstruován pro specifický účel a využití. Nelze tedy jednoznačně říct, který je lepší nebo horší. Vždy závisí na konkrétním využití diagramu a také na tom, kdo s daným diagramem pracuje. Cílem bylo vytvořit Mollierovy diagramy, které by mohli studenti využívat při výuce na technických vysokých školách. Z toho důvodu jsem se snažil využít výhod diagramů, které na nich jsou již využívány a vyvarovat se jejich nevýhodám.

V **příloze A** je Mollierův diagram vytvořený pro tlak vzduchu na vrcholu Everestu ($p = 36$ kPa). Ten má rozsah teplot od -30 do 50 °C a rozsah měrných vlhkostí od 0 do 25 g_p/kg_{sv}. Minimální teplota je volena z důvodu, že teplota -30 °C je nejběžnější minimální teplota, která se na vrcholu může objevit během sezony výstupů.

V **příloze B** je Mollierův diagram vytvořený pro tlak vzduchu na vrcholu Mt. Blancu ($p = 55$ kPa) a **příloze C** pro tlak vzduchu na vrcholu Sněžky ($p = 83,5$ kPa). Rozsah teplot je od -20 do 50 °C a rozsah měrných vlhkostí od 0 do 25 g_p/kg_{sv}. Minimální teplota -20 °C je volena z důvodu, že na vrcholu Mt. Blancu teplota v sezoně výstupů nepřesáhne tuto teplotu a na vrcholu Sněžky byla celková nejnižší zaznamenaná teplota $-21,7$ °C.

V **příloze D** je Mollierův diagram vytvořený pro průměrný tlak vzduchu v Liberci ($p = 97$ kPa), **příloze E** pro průměrný tlak vzduchu v České republice ($p = 98$ kPa), **příloze F** pro průměrný tlak vzduchu fyzikální atmosféry ($p = 100$ kPa) a **příloze G** pro průměrný tlak vzduchu standartní atmosféry ($p = 101,325$ kPa). Všechny tyto diagramy mají rozsah teplot od -20 do 50 °C a rozsah měrných vlhkostí od 0 do 25 g_p/kg_{sv}.

V **příloze H** je Mollierův diagram vytvořený pro tlak vzduchu na hladině Mrtvého moře ($p = 106$ kPa). Rozsah teplot je od -20 do 50 °C a rozsah měrných vlhkostí od 0 do 25 g_p/kg_{sv}. Jako minimální teplota je volena teplota -20 °C i když v této oblasti nejnižší teploty dosahují pouze 15 °C. Je to z důvodu, že zde padá velice málo srážek a tento Mollierův diagram by mohl být využíván převážně v zařízeních pro získávání vzdušné vlhkosti ze vzduchu (S.A.W.E.R.).

V **příloze I** a **příloze J** je Mollierův diagram vytvořený pro tlak vzduchu v Aerodynamických tunelech ($p = 250$ kPa a 500 kPa). Rozsah teplot je od -5 do 50 °C a rozsah měrných vlhkostí je od 0 do 15 g_p/kg_{sv}. Minimální teplota -5 °C je volena z důvodu, že při nižších teplotách by křivky relativních vlhkostí byly tak blízko u sebe, že by vypadaly jako jedna křivka. Jako maximální měrná vlhkost je volena hodnota 15 g_p/kg_{sv}. Je to kvůli tomu, aby byla využita celá plocha diagramu.

8 Závěr

V práci byl sestaven souhrn vztahů potřebných pro určení stavu vlhkého vzduchu na základě nich byly zkonstruovány jednotlivé body křivek konstantních teplot a konstantních relativních vlhkostí.

Dále jsem sestavil deset Mollierových diagramů vlhkého vzduchu, každý pro jiný vhodně vybraný tlak, přičemž byl především kladen důraz na přehlednost a jednoduchost jednotlivých diagramů. Pro určení vhodných tlaků jsem volil místa, která jsou nějak speciální, jako je třeba nejvyšší místo světa nebo České republiky. U každého diagramu jsem stanovoval měřítko stupnic entalpie a měrné vlhkosti tak, aby byla zajištěna co nejlepší přehlednost a také, aby bylo využito co nejširší spektrum možných teplot a vlhkostí, které mohou nastat za běžných podmínek.

Popis entalpií h_{l+x} [J/kg_{sv}] jsem umístil přímo vedle osy – v levé části diagramu a dále v pravé části diagramu, ve spodní části diagramu jsem vynesl průmět osy měrné vlhkosti x [kg_p/kg_{sv}] i s jejím popisem. Hodnoty teploty t [°C] jsem označoval přímo v diagramu. Křivky izoterem v oblasti přesyceného vzduchu jsem konstruoval tak, aby končily s malým přesahem za křivkou nasycení a dále, aby křivky konstantních měrných vlhkostí byly přes celý diagram. Dále jsem jednotlivé konstantní křivky i s popisy od sebe odlišil i barevně. Díky této konstrukci je diagram přehlednější než diagramy dostupné na českých technických vysokých školách, o kterých jsem mluvil v úvodní části.

Bibliografie

- [1] FIALOVÁ, Magda a Pavel ŠAFARÍK. *Základy termodynamiky vlhkého vzduchu: doplňkové skriptum*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, Strojní fakulta, 1999. ISBN 978-80-01-01977-1.
- [2] KADLEC, Zdeněk. *Termomechanika: návody do cvičení*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1736-1.
- [3] PETŘÍKOVÁ, Markéta a Pavel KRYŠTŮFEK. *Tabulky a diagramy pro termodynamiku*. Vydání šesté. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. ISBN 978-80-7494-272-3.
- [4] MAREŠ, Radim. *Tabulky termodynamických vlastností vody a vodní páry: podle mezinárodní formulace pro průmyslové výpočty IAPWS-IF97*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN 978-80-7043-680-6.
- [5] TRÄNDLE (INAKTIV), Philipp. *KIT - Diagrams* [online]. 17. duben 2012 [vid. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://www.itt.kit.edu/english/221.php>
- [6] BROWN, Royce N. *Compressors*. B.m.: Elsevier Science, 2011. ISBN 978-0-08-047665-0.
- [7] STŘEDA, Ivo. *Základy rovnovážné termodynamiky*. Vyd. 3. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-459-7.
- [8] HEJZLAR, Radko. *Termodynamika*. Vyd. 4. Praha: České vysoké učení technické, 2004. ISBN 978-80-01-02975-6.
- [9] *2001 ASHRAE handbook: fundamentals*. Inch-pound ed. Atlanta, GA.: ASHRAE, 2001. ISBN 978-1-883413-87-3.
- [10] *Tlak vzduchu Sněžka - Pozorování | Polsko Archiv počasí* [online]. [vid. 2024-03-26]. Dostupné z: <https://www.weatheronline.cz/weather/maps/city?WMO=12510&CONT=namk&LAND=PL&ART=LDR&LEVEL=150>
- [11] <https://www.outver.net/post/kyslik-nadmorska-vyska> [online]. [vid. 2024-03-27]. Dostupné z: <https://www.outver.net/post/kyslik-nadmorska-vyska>
- [12] *Portál ČHMÚ: Aktuální situace: Aktuální stav počasí: Česká republika: Stanice: Profesionální stanice: Přehled stanic: Liberec* [online]. [vid. 2024-03-27]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/ceska-republika/stanice/professionalni-stanice/prehled-stanic/liberec>
- [13] *Fyzika - tlak vzduchu změna s nadmořskou výškou* [online]. [vid. 2024-03-27]. Dostupné z: <https://www.okhelp.cz/fyzika/vypocty/tlak-vzduchu-nadmorska-vyska.php>

Seznam příloh

Příloha A	Mollierův diagram vlhkého vzduchu pro tlak $p = 36$ kPa
Příloha B	Mollierův diagram vlhkého vzduchu pro tlak $p = 55$ kPa
Příloha C	Mollierův diagram vlhkého vzduchu pro tlak $p = 83,5$ kPa
Příloha D	Mollierův diagram vlhkého vzduchu pro tlak $p = 97$ kPa
Příloha E	Mollierův diagram vlhkého vzduchu pro tlak $p = 98$ kPa
Příloha F	Mollierův diagram vlhkého vzduchu pro tlak $p = 100$ kPa
Příloha G	Mollierův diagram vlhkého vzduchu pro tlak $p = 101,325$ kPa
Příloha H	Mollierův diagram vlhkého vzduchu pro tlak $p = 106$ kPa
Příloha I	Mollierův diagram vlhkého vzduchu pro tlak $p = 250$ kPa
Příloha J	Mollierův diagram vlhkého vzduchu pro tlak $p = 500$ kPa