ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Experimentální vyšetření možnosti sušit vzduch pomocí

vírové trubice

Autor: **Miroslav KABÁT**

Vedoucí práce: **Prof. Ing. Jiří Linhart, CSc.**

Akademický rok 2012/2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra energetických strojů a zařízení Akad. rok: 2012-13

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: **Miroslav Kabát**

Rodné číslo: 891009/1663

Studijní program: B2301

Studijní obor: R06-13

Téma bakalářské práce: Experimentální vyšetření možnosti sušit vzduch pomocí vírové trubice.

Osnova bakalářské práce:

1. Rešerše prací o vlastnostech vírové trubice a o kondenzačním sušení
2. Výkres sestavy a hlavních detailů zkušebního zařízení.
3. Uvedení experimentálního zařízení do funkčního chodu
4. Proměření procesu a nalezení vhodných parametrů pro sušení.

Semestrální projekt: Rešerše prací o vlastnostech vírové trubice a o kondenzačním sušení, výkres sestavy a hlavních detailů zkušebního zařízení, uvedení experimentálního zařízení do funkčního chodu.

Rozsah bakalářské práce:

a) textová část: 30 stran

b) grafická část: 1 výkres

Doporučená literatura:

1. Kalal M., Linhart J.: Experimental study of vortex tube applications as cooler and heating. str. 181-186, ISBN 978-80-8070-826-9.

2. Mohamed O. M. Kalál: Experimental Study and CFD modeling on the Vortex Tube Performance. Disertační práce 2008.

3. Chyský: Vlhký vzduch. SNTL 1965

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. J. Linhart, CSc.

Konzultant bakalářské práce: prof. Ing. J. Linhart, CSc.

Datum zadání bakalářské práce: 5. 10. 2012

Termín odevzdání bakalářské práce: 27.5.2013

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	**Příjmení** Kabát	**Jméno** Miroslav
STUDIJNÍ OBOR	Stavba energetických strojů a zařízení	
VEDOUCÍ PRÁCE	**Příjmení** Prof. Ing. Linhart, CSc.	**Jméno** Jiří
PRACOVIŠTĚ	ZČU – FST – KKE	
DRUH PRÁCE	BAKALÁŘSKÁ	
NÁZEV PRÁCE	Experimentální vyšetření možnosti sušit vzduch pomocí vírové trubice	

FAKULTA	strojní		**KATEDRA**	KKE		**ROK ODEVZD.**	2013

POČET STRAN

CELKEM	40		**TEXTOVÁ ČÁST**	32		**GRAFICKÁ ČÁST**	8

STRUČNÝ POPIS	Tato bakalářská práce pojednává o principech sušení vzduchu a o možnosti využít tyto principy na sušení vzduchu pomocí vírové trubice. Popisuje základní principy fungování vírových trubic a dále se zaměřuje na sestavení vlastního experimentálního zařízení, jeho popis a obtíže spojené s provozem. Hlavní částí je rozbor naměřených hodnot a jejich vyhodnocení.
KLÍČOVÁ SLOVA	vírová trubice, sušení vzduchu, komprese, vlhkost, Maxwellův démon, zvukové rázy, Lavalova dýza, experiment

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	**Surname** Kabát	**Name** Miroslav
FIELD OF STUDY	Design of Power Machines and Equipment	
SUPERVISOR	**Surname** Prof. Ing. Linhart, CSc.	**Name** Jiří
INSTITUTION	ZČU – FST – KKE	
TYPE OF WORK	BACHELOR	
TITLE OF THE WORK	Experimental testing of the possibility drying air by the vortex tube	

FACULTY	Mechanical Engineering		**DEPARTMENT**	Department of Power system Engineering		**SUBMITTED IN**	2013

NUMBER OF PAGES

TOTALLY	40		**TEXT PART**	32		**GRAPHICAL PART**	8

BRIEF DESCRIPTION	This thesis is about principle drying air and about possibility drying air by the vortex tube. It describes basic principles and construction of vortex tube and problems with the usage of the device. Main part is analysis of the measured values.
KEY WORDS	vortex tube, drying air, compression, humidity, Maxwell´s daemon, acoustic streaming, Laval nozzle, experiment

PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské/diplomové práce.

V Plzni dne 26.6.2013 . . . .

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří se jakkoliv pozitivně podíleli na sestavení experimentálního zařízení vírové trubice, řešení zadané úlohy a zpracování této bakalářské práce.

Především bych chtěl poděkovat panu prof. Ing. Jiřímu Linhartovi, CSc. za vedení v oblasti teorie, zodpovězení mnohých dotazů a vysvětlení nejasností, dále pak panu Ing. Hruškovi za jeho ochotu a pomoc při sestavení měřících zařízení a jejich instalaci na experimentální zařízení.

Rovněž bych chtěl poděkovat za rozsáhlou podporu při studiu mé rodině, především mým rodičů, dále pak mým přátelům a přítelkyni.

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ZNAČKA	NÁZEV	JEDNOTKA
ρ	ABSOLUTNÍ VLHKOST	kg/m^3
φ	RELATIVNÍ VLHKOST	$\%\,;\,-$
x	MĚRNÁ VLHKOST	g/kg_{sv}
m_p	HMOTNOST PÁRY	g
m_{sv}	HMOTNOST SUCHÉHO VZDUCHU	kg_{sv}
V	OBJEM	m^3
T	TERMODYNAMICKÁ TEPLOTA	K
t	TEPLOTA	$°C$
ρ_p	HUSTOTA PÁRY VE VZDUCHU	kg/m^3
ρ_p''	HUSTOTA PÁRY PŘI PLNÉM NASYCENÍ	kg/m^3
p_p	PARCIÁLNÍ TLAK PÁRY VE VZDUCHU	Pa
p_p''	PARCIÁLNÍ TLAK PÁRY PŘI PLNÉM NASYCENÍ	Pa
v_{zv}	RYCHLOST ZVUKU	m/s
v	RYCHLOST	m/s
a	ZRYCHLENÍ	m/s^2
l	POLOMĚR TRUBICE	m
l_{max}	MAXIMÁLNÍ POLOMĚR TRUBICE	m
K	POMĚRNÉ ČÍSLO RYCHLOSTI ZVUKU VŮČI POLOMĚRU TRUBICE	s^{-1}
κ	POISSONOVA KONSTANTA	$-$
r	INDIVIDUÁLNÍ PLYNOVÁ KONSTANTA	J/kgK
g	GRAVITAČNÍ ZRYCHLENÍ	m/s^2

ZNAČKA	NÁZEV	JEDNOTKA
D_{clon}	PRŮMĚR TRUBICE SE CLONOU	mm
d_{clon}	PRŮMĚR OTVORU CLONY	mm
T_{clon}	TERMODYNAMICKÁ TEPLOTA V TRUBICI SE CLONOU	K
$p_{dif\ clon}$	DIFERENČNÍ TLAK V TRUBICI SE CLONOU	Pa
$p_{rel\ clon}$	RELATIVNÍ TLAK V TRUBICI SE CLONOU	$Pa\ ;bar$
p_{atm}	ATMOSFÉRICKÝ TLAK	Pa
$p_{abs\ clon}$	ABSOLUTNÍ TLAK V TRUBICI SE CLONOU	Pa
ρ_{vz}	HUSTOTA VZDUCHU	kg/m^3
β	POMĚR PRŮMĚRŮ	$-$
Re_D	REYNOLDSOVO ČÍSLO	$-$
ν	KINEMATICKÝ VISKOZITA	m^2/s
C	SOUČINITEL PRŮTOKU TRUBICÍ SE CLONOU	$-$
ε	SOUČINITEL EXPANZE	$-$
$\dot{m}$	HMOTNOSTNÍ TOK	kg/hod
w	RYCHLOST V POTRUBÍ	m/s
π	LUDOLFOVO ČÍSLO	$-$
e	EULEROVO ČÍSLO	$-$
D_{vent}	PRŮMĚR VENTURIHO TRUBICE	mm
d_{vent}	PRŮMĚR ZÚŽENÍ VENTURIHO TRUBICE	mm
$T_{h\varphi}$	TEPLOTA V TEPLÉ VĚTVI V MÍSTĚ MĚŘENÍ VLHKOSTI	$°C$
$T_{c\varphi}$	TEPLOTA VE STUDENÉ VĚTVI V MÍSTĚ MĚŘENÍ VLHKOSTI	$°C$
φ_h	RELATIVNÍ VLHKOST V TEPLÉ VĚTVI	%

ZNAČKA	NÁZEV	JEDNOTKA
φ_c	RELATIVNÍ VLHKOST VE STUDENÉ VĚTVI	$\%$
T_h	TEPLOTA V TEPLÉM KONCI TRUBICE	$°C$
T_c	TEPLOTA VE STUDENÉM KONCI TRUBICE	$°C$
$\dot{m}_c$	HMOTNOSTNÍ TOK STUDENOU VĚTVÍ	kg/hod
$\dot{m}_{celk}$	HMOTNOSTNÍ TOK VTUPNÍM POTRUBÍM	kg/hod
x_h	MĚRNÁ VLHKOST V TEPLÉ VĚTVI	g/kg_{sv}
x_c	MĚRNÁ VLHKOST VE STUDENÉ VĚTVI	g/kg_{sv}
x_{vst}	MĚRNÁ VLHKOST V PŘÍVODNÍM POTRUBÍ	g/kg_{sv}
$T_h´´$	TEPLOTA ROSNÉHO BODU V TEPLÉ VĚTVI	$°C$
$T_c´´$	TEPLOTA ROSNÉHO BODU VE STUDENÉ VĚTVI	$°C$
exp	EXPONENT EULEROVA ČÍSLA	$-$
γ	SUBSTITUČNÍ KONSTANTA	$-$
c_m	POMĚRNÉ ČÍSLO HMOTNOSTNÍ TOK V STUDENÉ VĚTVI VŮČI VSTUPU	$\%$; $-$
c_x	POMĚRNÉ ČÍSLO MĚRNÁ VLHKOST V TEPLÉ VĚTVI VŮČI STUDENÉ	$\%$; $-$
c_{xh}	POMĚRNÉ ČÍSLO MĚRNÁ VLHKOST V TEPLÉ VĚTVI VŮČI VSTUPU	$\%$; $-$
c_{xc}	POMĚRNÉ ČÍSLO MĚRNÁ VLHKOST VE STUDENÉ VĚTVI VŮČI VSTUPU	$\%$; $-$

OBSAH

ÚVOD 13

1 VÍROVÁ TRUBICE 14

1.1 PŘEDSTAVENÍ 14

1.2 HISTORIE 14

1.3 KONSTRUKCE A POPIS 15

1.4 FYZIKÁLNÍ PRINCIP 16

1.4.1 FYZIKÁLNÍ FAKTA 16

1.4.2 MAXWELLŮV DÉMON 17

1.4.3 ZVUKOVÉ RÁZY (ACOUSTIC STREAMING) 18

2 SUŠENÍ VZDUCHU A KONDENZAČNÍ SUŠENÍ 19

2.1 PŘEDSTAVENÍ 19

2.2 MĚŘENÍ VLHKOSTI 20

2.3 PRINCIPY SUŠENÍ VZDUCHU 20

2.4 KONDENZAČNÍ SUŠENÍ A MOŽNÉ JEVY OVLIVŇUJÍCÍ VLHKOST 21

3 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ 22

3.1 FUNKČNÍ SCHÉMA 22

3.2 ZDROJ TLAKOVÉHO VZDUCHU 23

3.3 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ 24

3.4 SNÍMÁNÍ A VYHODNOCOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT 27

3.5 SESTAVA VÍROVÉ TRUBICE A HLAVNÍ DETAILY VÍROVÉ TRUBICE 28

3.6 SESTAVENÍ FUNKČNÍHO ZAŘÍZENÍ 30

3.6.1 FOTOGRAFIE REÁLNÉHO ZAŘÍZENÍ S POPISEM 31

4 VLASTNÍ EXPERIMENT 33

4.1 PROBLÉMY PŘI CHODU ZAŘÍZENÍ 33

4.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ 34

4.2.1 MĚRNÁ VLHKOST PŘIVÁDĚNÉHO VZDUCHU $xcelk$ 35

4.2.2 TEPLOTA TEPLÉHO A STUDENÉHO KONCE TRUBICE Th, Tc 36

4.2.3 TEPLOTA ROSNÉHO BODU V TEPLÉM A STUDENÉM KONCI Th'', Tc'' 37

4.2.4 POMĚR MĚRNÉ VLHKOSTI V TEPLÉ VĚTVI VŮČI STUDENÉ cx 39

4.2.5 POMĚR MĚRNÉ VLHKOSTI V TEPLÉ A STUDENÉ VĚTVI VŮČI MĚRNÉ VLHKOSTI VSTUPNÍHO VZDUCHU cxh, cxc 39

5 ZÁVĚR 41

POUŽITÁ LITERATURA 43

SEZNAM PŘÍLOH 44

ÚVOD

Sušení vzduchu je v dnešní době velmi dobře zvládnutá operace za pomoci mnohých principem odlišných metod. Konvenční sušení vzduchu probíhá kondenzačně, absorpčně či membránově. Přesto však mohou existovat podmínky, do kterých se tyto metody sušení nehodí a bylo by vhodné najít další způsoby separace molekul vody z plynů v extrémních podmínkách, kde máme na sušení jiné požadavky, než je ekonomičnost provozu sušícího zařízení.

Za tímto účelem vznikla tato bakalářská práce, kde se budeme zabývat experimentální možností sušit vzduch pomocí vírové trubice.

První a druhá část se zabývá fenoménem vírové trubice, její historií, konstrukcí, fyzikálním principem a užitím. Dále jsou zmíněny metody sušení vzduchu a přehled nejčastěji měřených vlhkostí, jejich fyzikálním významem a předpokládané fyzikální jevy, které se budou při experimentu objevovat.

Třetí část se týká sestavení experimentálního zařízení s popsaným schématem celku. Detailní popis konstrukce vírové trubice a popis jednotlivých měřících zařízení, včetně popisu jejich funkce.

Zbytek práce zobrazuje výsledky měření a jejich vyhodnocení.

1 VÍROVÁ TRUBICE

1.1 PŘEDSTAVENÍ

Vírová trubice je konstrukčně velmi jednoduché zařízení, které dokáže rozdělit proud stlačeného vzduchu na studenou a teplou část. Samotné zařízení je bezúdržbové, bez nutnosti přivádět elektrický proud, bez rizika výbuchu a bez pohyblivých částí.

Tyto vlastnosti zajišťují vírové trubici široké uplatnění v průmyslových odvětvích a všude tam, kde se využívá proud studeného či teplého vzduchu nebo oba současně.

1.2 HISTORIE

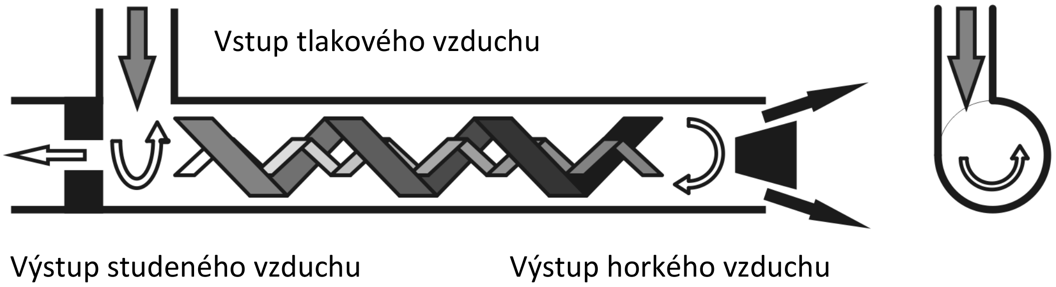
Fyzikální jev, který je klíčový pro chod vírové trubice, byl objeven francouzským fyzikem Georgem Ranquem již v roce 1930, který vytvořil malou firmu, ve které vyráběl zařízení využívající tohoto nového objevu, bohužel firma brzy zkrachovala. George Ranquem se pokusil o představení samotného objevu vědecké společnosti, ale i tento počin byl přijat s velkou nedůvěrou a články z třicátých let dvacátého století byly na dlouhou dobu ignorovány.

Ve čtyřicátých letech dvacátého století se jevem začal zabývat německý fyzik Rudolf Hilsch, který na základě vlastních pokusů publikoval článek „Použití expandujícího plynu v centrifugálním poli v chladících procesech“ v časopise Review of Scientifics Instrument 18 z roku 1947. Po vydání článku byl považován za objevitele, proto byla z počátku vírová trubice pojmenována Hilschova trubice a později Ranque-Hilschova trubice (či v anglickém jazyce Vortex tube).

Dnes se výrobou a vývojem trubic zabývá mnoho soukromých společností a vědeckých skupin na univerzitách. Nejznámější z nich je americká společnost ze Cincinnati v Ohiu „Vortec Corporation“, která působí na světovém trhu přes 40 let a vyvíjí trubice pro průmyslové využití. [9]

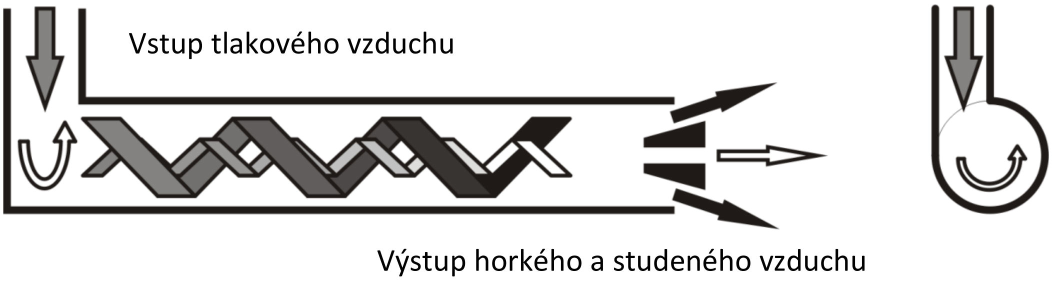
1.3 KONSTRUKCE A POPIS

Konstrukce je velmi jednoduchá. Trubice je tvořena tangenciálním vstupem, který vytváří stacionární generátor vzduchového víru a dvěma otevřenými konci, kde je v delším „teplém“ konci tryska, která funguje jako regulátor poměru vzduchu v teplé i studené části. Tryska odřezává vnější teplejší vrstvu vzduchového víru a zabraňuje úniku vnitřnímu studenému vzduchu, který odráží středem trubice k druhému konci, kde cestou středem víru předává teplo vnějšímu proudu. Studený výstup má menší průměr než trubice sama, aby byl v prvním momentě zajištěn směr přesunu vzduchu vnější vrstvy k teplému konci. [2, 8, 10, 11]



ILUSTRACE 1.1 SCHÉMA VÍROVÉ TRUBICE S VÝSTUPEM NA OBOU KONCÍCH TRUBICE

Druhým konstrukčním uspořádáním, které je méně běžné a méně efektivní, je umístění trysek teplého i studeného konce na jednu stranu trubice. Tangenciální vstup je zachován, rotující vzduch postupuje směrem ke konci trubice, kde je oddělena vnější teplá a vnitřní studená vrstva vzduchu. [2, 8, 10, 11]



ILUSTRACE 1.2 SCHÉMA VÍROVÉ TRUBICE S VÝSTUPEM NA JEDNOM KONCÍ TRUBICE

1.4 FYZIKÁLNÍ PRINCIP

Fyzikální procesy, které mají na svědomí mechanismus ochlazení vnitřního proudu vzduchu, nejsou dosud zcela objasněny. Existují teorie, které by jev vysvětlovaly, přesto mezi fyziky neexistuje jednoznačná shoda názorů o správnosti obecně přijímaných teorií. [9]

1.4.1 FYZIKÁLNÍ FAKTA

Pro nenucený vzduchový či vodní vír platí pravidlo zachování momentu hybnosti. Čím blíže je porovnávaný bod ve vzduchovém víru středu otáčení, tím větší je jeho obvodová rychlost. Součin obvodové rychlosti a poloměru otáčení je konstantní v každém bodě tekutinového víru.

Toto pravidlo však neplatí pro tekutinový vír, který je velmi blízko ose otáčení, kde by měla být rychlost limitně se blížící k nekonečnu. Od určitého poloměru otáčení obvodová rychlost lineárně klesá se snižujícím se poloměrem až do osy otáčení, kde je tato rychlost nulová. Vzduchový vír má tedy v určité oblasti konstantní úhlovou rychlost a otáčí se jako jeden celistvý kus hmoty. Toto je následkem rostoucího smykového tření mezi jednotlivými vrstvami tekutiny, které obvodové rychlosti vrstev vyrovnává. Smykové tření je dáno součinitelem dynamické viskozity násobené gradientem rychlosti mezi jednotlivými vrstvami. Viskozita plynu a vznikající smykové tření plyn zahřívá.

Vírové trubice jsou konstruované s takovým průměrem, aby úhlová rychlost tekutinového víru byla konstantní.

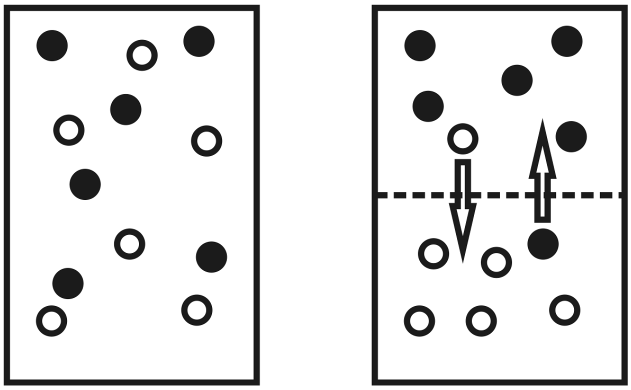
Vstupující tlakový vzduch vytváří rychle rotující vzduchový vír, kde rotace dosahuje hodnot až 17 000 otáček za sekundu při rychlosti přesahující rychlost zvuku. Odstředivá síla zapříčiní ve vnější vrstvě rotujícího plynu vyšší tlak oproti vnitřní části. Tím se vnější vzduch částečně ohřeje. Při následném přesunu do vnitřní části plyn expanduje a ochlazuje se.

Faktem je, že se vzduchový vír v trubici otáčí konstantní úhlovou rychlostí v každém bodě. To znamená, že je kinetická energie uprostřed víru mnohonásobně

menší než v jeho obvodu. Ztracená kinetická energie se přesune do vnější části jako tepelná a zapříčiní ohřev vnější části víru. Mechanismus přenosu tepelné energie je však předmětem sporů. Mohlo by se zdát, že je zde teplo samovolně předáváno z tělesa chladnějšího na těleso teplejší, což odporuje důsledkům druhého zákona termodynamiky, přesto se s největší pravděpodobností jedná o kombinaci jednotlivých dále popsaných mechanismů přenosu tepla mezi vrstvami víru. [8]

1.4.2 MAXWELLŮV DÉMON

Britský fyzik v 19. století James Clerk Maxwell zpracoval teorii možnosti konstrukce stroje, který by dokázal oddělit molekuly s vyšší a nižší kinetickou respektive tepelnou energií přes polopropustnou membránu. Takové zařízení je popsáno jako Maxwellův démon. Tedy imaginární postava, která třídí molekuly podle velikosti jejich kinetické energie oproti průměrné kinetické energii bez přívodu, případně s minimálním přívodem jiné energie. To by znamenalo, že bychom byli schopni vytvořit perpetuum mobile druhého řádu.



ILUSTRACE 1.3 SCHÉMA ZAŘÍZENÍ PODLE TEORIE MAXWELLOVA DÉMONA

Podobný princip je předpokládán i v trubici. Tepelná energie je mírou kinetické energie molekul. Teplejší molekuly mají vyšší kinetickou energii a pohybují se tedy rychleji. Rychlejší pohyb má za následek nárůst odstředivé síly a přesun teplejší molekuly do vnější vrstvy rotujícího víru, kde nahradí pomalejší a tedy i chladnější molekulu, která se přesune do vnitřní části. [2, 8]

1.4.3 ZVUKOVÉ RÁZY (ACOUSTIC STREAMING)

Podle teorie Jamese Lighthilla rozšířené Mitsuri Kurosakym lze Ranqueho efekt vysvětlit pomocí zvukových rázů, které vznikají v důsledku kontaktu tekutiny s potrubím při nadkritických rychlostech proudícího média.

Zvukové rázy jsou změnou termodynamických veličin, jako je tlak, teplota, entropie a rychlost. Vznikající zvukový ráz zapříčiní lokální pokles rychlosti a navýšení tlaku i teploty. Látka ve zvukovém rázu s vyšší teplotou začne svému okolí předávat teplo podle zákonitostí druhého zákona termodynamiky. Při následném ustálení se deficit tepelné energie nahradí poklesem energie kinetické a jako pomalejší a chladnější, s menším působením odstředivých sil, se přesune blíže středu.

Přímá spojitost mezi změnou tepelné a kinetické energie ve vírové trubici se Kurosakovi nepodařilo dokázat, přesto je předpokládána. [8]

2 SUŠENÍ VZDUCHU A KONDENZAČNÍ SUŠENÍ

2.1 PŘEDSTAVENÍ

Sušení vlhkého vzduchu je takovou úpravou vzduchu, při které klesá jeho vlhkost. Směs vlhkého vzduchu obsahuje suchý vzduch, vodní páru. Může obsahovat tekutou i tuhou fázi vody a nečistoty.

Měříme tři základní druhy vlhkostí a několik dalších méně používaných.

- Absolutní vlhkost - vyjadřuje poměr hmotnosti páry vůči objemu vlhkého vzduchu.
- Relativní vlhkost - je poměr hustoty vodní páry k teoretické hustotě vodní páry při absolutním nasycení vzduchu. Rovněž je parciálním tlakem vodní páry k parciálnímu tlaku vodní páry při absolutním nasycení vzduchu.
- Měrná vlhkost - je hmotností vody obsažené ve vlhkém vzduchu vůči hmotnosti suchého vzduchu obsaženého ve směsi.

Název	Vyjádření	Jednotky
Absolutní vlhkost	$\rho = \frac{m_p}{V}$	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
Relativní vlhkost	$\varphi = \frac{\rho_p}{\rho_p''} = \frac{p_p}{p_p''}$	$[-]\ nebo\ \cdot 100[\%]$
Měrná vlhkost	$x = \frac{m_p}{m_{sv}}$	$\left[\frac{g}{kg_{sv}}\right]$

ILUSTRACE 2.1 TABULKA VLHKOST

Relativní a absolutní vlhkost můžeme snížit ohřevem vzduchu, měrnou vlhkost snížíme separací vody ze vzduchu.

Pro výpočty a zjištění složek vzduchu při normálním tlaku se využívá Mollierův h-x vlhkého vzduchu. [3, 4, 5, 6]

2.2 MĚŘENÍ VLHKOSTI

Pro měření vlhkosti využíváme látky, které v rozdílné vlhkosti mění své fyzikální vlastnosti, jako je:

- změna délek materiálů v různě vlhkém prostředí – vlasové vlhkoměry
- kondenzace vodní páry na chladném povrchu – kondenzační hygrometr
- snížení teploty mokrého vůči suchému povrchu – Augustův psychrometr
- změna elektrické vodivosti materiálu v rozdílné vlhkosti
- absorpční vlastnost materiálů – pro měření absolutního množství pohlcené vody [7]

2.3 PRINCIPY SUŠENÍ VZDUCHU

Sušit vzduch je možno několika fyzikálními principy.

Jedním z nich je absorpční sušení, kdy vzduch proudí kolem absorpční látky, která pohlcuje vzdušnou vlhkost. Chemická látka, která váže vlhkost, musí být později regenerována (vysušena) pro její znovupoužití. To se děje za tepla nebo za studena při podtlaku či přetlaku podle druhu absorpční látky. Jako pohlcující látka je využíváno aktivního oxidu hlinitého, silikagelu, vysušené křídy a dalších látek.

Dalším principem je membránové sušení, kde je využíváno pro menší průtoky čistého vlhkého vzduchu, kde se proud vzduchu dostane do kontaktu s plochou, přes kterou projdou částečky vody, které jsou odváděny jako kondenzát. Čistota vzduchu, která je požadována pro správnou funkci polopropustné membrány, je zajišťována filtry.

Poslední běžnou metodou sušení vzduchu je kondenzační sušení, které funguje na principu podchlazení sušeného vzduchu pod teplotu rosného bodu, ve kterém je relativní vlhkost rovna 100%. Při dalším chlazení vzduch nedokáže pohltit více vlhkosti, ta se začne srážet na nečistotách, a kondenzát je následně odloučen v odlučovači. [7]

2.4 KONDENZAČNÍ SUŠENÍ A MOŽNÉ JEVY OVLIVŇUJÍCÍ VLHKOST

Výše zmiňované kondenzační sušení je využíváno i ve vírové trubici.

Studená část vzduchu musí být natolik podchlazená, aby se při výstupních parametrech na studeném konci dostala pod teplotu rosného bodu a docházelo k vysrážení kapiček vody. Tímto způsobem je předpokládáno odloučení největšího objemu vody ze vzduchu.

Teoreticky lze mimo kondenzační sušení předpokládat vlivem vysokých rychlostí v centrifugálním poli odstředění těžkých molekul vody od lehkých molekul ostatních plynů v médiu do vnějšího teplejšího proudu vzduchu, neboť očekáváme velmi vysoké odstředivé zrychlení v teoretickém rozmezí $0 \div 800\,000\ g$ v závislosti na vzdálenosti částice od osy víru. V jaké míře se tento jev projeví, bude předmětem zkoumání.

Vycházím z následujících vztahů

$$v_{zv}(l \to l_{max}) = \sqrt{\kappa r T} \doteq 350\ m/s \tag{2.1}$$

$$v(l) = \frac{v_{zv}(l \to l_{max})}{l\ (l \to l_{max})} \cdot l = K \cdot l \doteq 23\,000 \cdot l\ m/s \tag{2.2}$$

$$a = \frac{v(l)^2}{l} = K^2 \cdot \frac{l^2}{l} = K^2 \cdot l \doteq 523\,000\,000 \cdot l\ m/s^2 \tag{2.3}$$

kde při okrajovém extrému $l \to 0{,}015\ m \Rightarrow a \doteq 8\,000\,000\ m/s^2 \doteq 800\,000 g$

Další jev, který bude ovlivňovat vlhkost média je difúze vody z oblasti chladného vzduchu s větší koncentrací vody do oblasti s nižší koncentrací v teplém proudu. [1, 3]

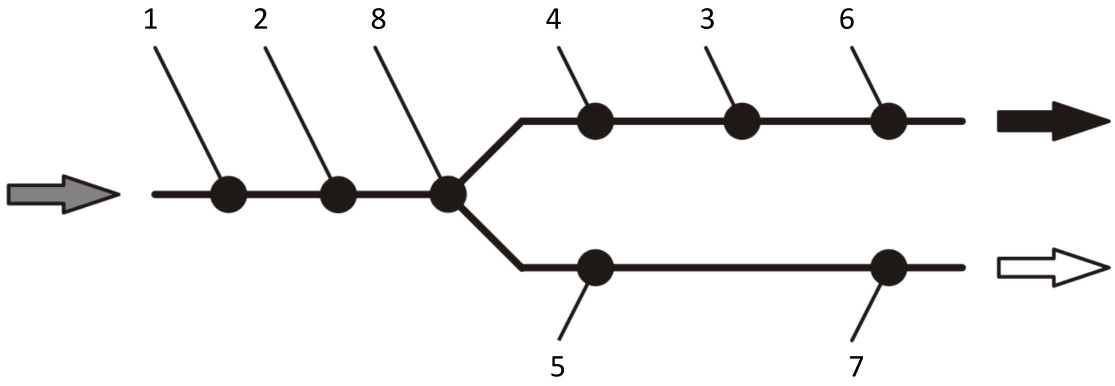
3 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ

Experimentální zařízení včetně měřících prvků je složeno z několika částí.

Stlačený vzduch je odebírán z rozvodné tlakové sítě o provozním přetlaku $1\ MPa$ a seškrcen na pracovní tlak. Následně je změřen vstupní průtok vzduchu do vírové trubice pomocí trubice s clonou, kde je průtok počítán z diference tlaků před a za clonou, teploty, relativního tlaku média v trubici a atmosférického tlaku v okolí. Následuje vírová trubice, kde proběhne odloučení na 2 části, kde je na výstupech z vírové trubice měřena teplota a na teplém konci měřen průtok plynu Venturiho trubicí, ze kterého je následně dopočten průtok ve studené části.

Na obou výstupech ze sestavy je měřena relativní vlhkost vzduchu přepočtená za daných podmínek na měrnou vlhkost, která je hlavním výstupem našeho měření.

3.1 FUNKČNÍ SCHÉMA



1) Měření tlaku na vstupu do sestavy
2) Měření hmotnostního průtoku vzduchu do sestavy
3) Měření hmotnostního průtoku vzduchu v teplém výstupu
4) Měření teploty na teplém konci
5) Měření teploty na studeném konci
6) Měření vlhkosti vzduchu na teplém konci
7) Měření vlhkosti vzduchu na studeném konci
8) Vírová trubice

ILUSTRACE 3.1 SCHÉMA EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ

3.2 ZDROJ TLAKOVÉHO VZDUCHU

Pro potřebu semestrální práce by byl vhodný jako zdroj tlakového vzduchu kompresor, který by byl schopný neustále dodávat alespoň $130\ kg$ vzduchu za hodinu při tlaku $8-10\ bar$. Tento vzduch by neměl obsahovat nečistoty jako je olej, prachové částice a kondenzát vodní páry.

Při řešení této úlohy není v současné době k dispozici kompresor s těmito parametry.

Jeho absenci nahrazujeme odlišnou metodou měření, kde využíváme dílenský rozvod tlakového vzduchu, do kterého je médium dodáváno ze vzdušníku o objemu $500\ l$, do kterého je přiváděn vzduch z kompresoru UNM STS 1250-10-500 společnosti Schneider Bohemia.

Parametry kompresoru:

- tlak $8-10\ bar$
- nasávané množství $1250\ l/min$
- elektrický příkon 7,5 kW
- dodávané množství $980\ l/min$ při pracovním tlaku

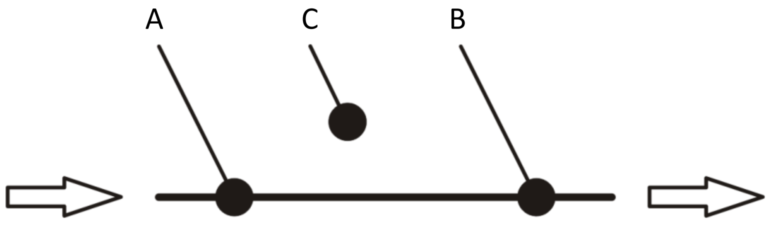
Objem vzdušníku při jednom měření vyčerpáme zhruba za 4 minuty od spuštění experimentálního zařízení. Během této doby je nutno naměřit potřebné parametry v tlakovém rozmezí od $9\ bar$ do $3{,}5\ bar$. [12]

3.3 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ

Měření hmotnostního průtoku vzduchu a jeho přepočtu na rychlost v potrubí (Ilustrace 3.1 pozice 2) bylo provedeno na principu diferenčního snímání tlaku na trubici se clonou o zúžení z $D_{clon} = 35\ mm$ na $d_{clon} = 20\ mm$.

Na vstupu byla změřena absolutní teplota T_{clon} teploměrným čidlem (Ilustrace 3.2 pozice A). Před a za clonou byl změřen diferenční tlak $p_{dif\ clon}$ (Ilustrace 3.2 pozice B) a před clonou tlak relativní $p_{rel\ clon}$(Ilustrace 3.2 pozice B). Externě byl naměřen tlak atmosférický p_{atm} (Ilustrace 3.2 pozice C).

Z normy ČSN EN ISO 5167 byla odečtena hodnota odběru tlaků $L1$ a $L2'$ a dopočteny hodnoty $M2'$ a $A1$, které dále nerozvádím, stejně jako iterační výpočet rychlosti.



ILUSTRACE 3.2 SCHÉMA MĚŘENÍ PRŮTOKU VZDUCHU

Z těchto veličin byl počítán:

- absolutní tlak v trubici se clonou: $p_{abs\ clon} = p_{atm} + p_{rel\ clon}$ (3.1)
- hustota vzduchu $\rho_{vz} = \frac{p_{abs\ clon}}{r.T_{clon}}$ (3.2)
- poměr průměrů $\beta = \frac{D_{clon}}{d_{clon}}$ (3.3)
- Reynoldsovo číslo $Re_D = \frac{v.D_{clon}}{\nu}$ (3.4)

- součinitel průtoku

$$C = 0{,}5961 + (0{,}0261.\beta^2) - (0{,}216.\beta^8) + \left(0{,}000521.\left(\frac{10^6.\beta}{Re_D}\right)^{0{,}7}\right)$$
$$+ \left((0{,}0188 + 0{,}0063.A1).\beta^{3{,}5}.\left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0{,}3}\right)$$
$$+ \left(\left(0{,}043 + 0{,}08.e^{(-10.L1)} - 0{,}123.e^{(-7.L1)}\right).(1 - 0{,}11.A1)\left(\frac{\beta^4}{1-\beta^4}\right)\right)$$
$$-(0{,}031.(M2' - 0{,}8.M2'^{1{,}1}).\beta^{1{,}3}) + 0{,}011.(0{,}75 - \beta).\left(2{,}8 - \frac{D}{25{,}4}\right) \tag{3.5}$$

- součinitel expanze

$$\varepsilon = 1 - (0{,}351 + 0{,}256.\beta^4 + 0{,}93.\beta^8).\left(1 - \left(\frac{p_{abs\,clon} - p_{dif\,clon}}{p_{abs\,clon}}\right)^{\frac{1}{\kappa}}\right) \tag{3.6}$$

- hmotnostní průtok

$$\dot{m} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}}\varepsilon\frac{\pi d^2}{4}\sqrt{2.p_{dif\,clon}.\rho} \tag{3.7}$$

- rychlost v potrubí

$$w = \frac{4.\dot{m}}{\rho_{vz}\pi D^2} \tag{3.8}$$

Rychlost v potrubí je v rekurzi vůči Reynoldsovu číslu, proto je nutné provést iterační výpočet.

Obdobně bylo provedeno měření průtoku v teplé větvi. Namísto trubice se clonou byla použita Venturiho trubice s průměry $D_{vent} = 40\ mm$ a $d_{vent} = 20\ mm.$ Konkrétní vztahy pro měření průtoku diferenčním tlakoměrem pomocí venturiho trubice jsou přístupné v normě ČSN EN ISO 5167. [13]

Pro měření teplot jsme využili vlastní teplotní čidla zaletovaná do potrubí.

Měření relativní vlhkosti v teplé a studené větvi bylo provedeno vlhkoměrem s teploměrem T0213 společnosti Comet system. Výrobce zaručuje rozsah použitelnosti tohoto měřícího zařízení v oblasti od 0% do 100% relativní vlhkosti v teplotách od $-30°C$ do $+80°C$.

Přesnost měřidla byla kontrolována a cejchována 14.2.2007 s odchylkou relativní vlhkost $\pm 1{,}3\ \%$ a odchylkou teploty $\pm 0{,}24\ °C$

Pro popsání jevu sušení vzduchu ve vírové trubici využívám měrnou vlhkost a poměr měrné vlhkosti v teplé a studené větvi, kterou z teploty a relativní vlhkosti přepočítávám dle následujících rovnic [14]:

- parciální tlak vody při plném nasycení při teplotách pod $0°C$

$$p_p{}'' = e^{28{,}557 - \frac{5951{,}3855}{268{,}78 + t}} \tag{3.9}$$

- parciální tlak vody při plném nasycení při teplotách nad $0°C$

$$p_p{}'' = e^{23{,}58 - \frac{4044{,}6}{235{,}628 + t}} \tag{3.10}$$

- měrná vlhkost vzduchu

$$x = 0{,}622 \frac{\varphi . p_p{}''}{p_{atm} - \varphi . p_p{}''} \tag{3.11}$$

3.4 SNÍMÁNÍ A VYHODNOCOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Analogová data byla sejmuta z měřících zařízení a přivedena do dvou převodníků analogového signálu na digitální a dále upravována v osobním počítači. Převodníky mají označení USB 6009 a jsou vyrobené společností National Instruments. Každý převodník má 8 vstupů signálu.

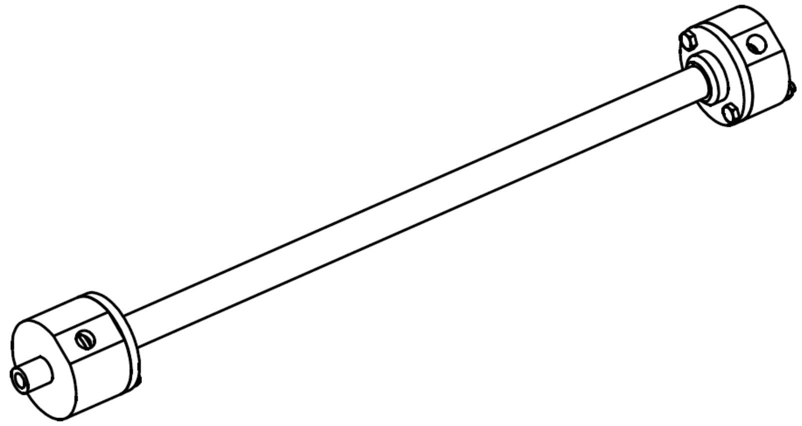
Převod napětí na výstup měřených veličin a aplikování rovnic na výstup napětí z diferenčních manometrů pro měření průtoku tekutin byl proveden v softwaru LabView 2012 společnosti National Instruments s trialovou licencí. Data byla dále zpracována pomocí softwaru MS Excel 2007 společnosti Microsoft.

Při spuštění experimentálního zařízení jsem zaznamenával následující údaje určené pro rozbor v MS Excel. Ostatní měřené veličiny byly použity pro stanovení zaznamenaných hodnot.

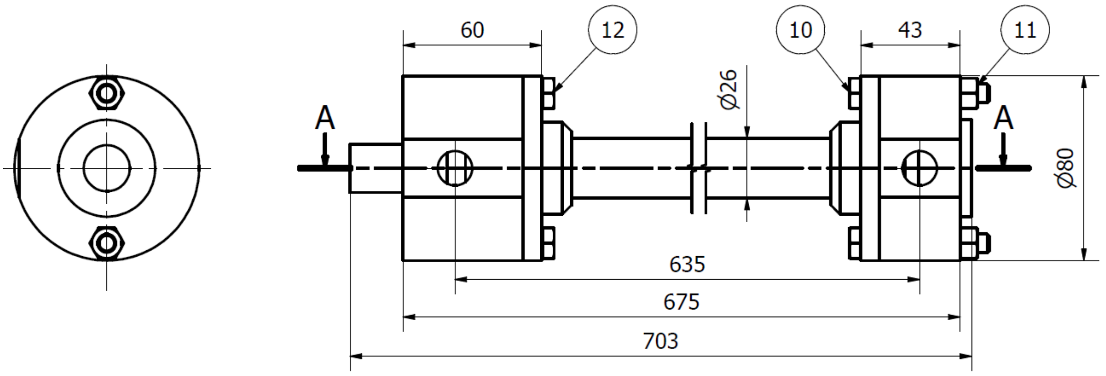
- tlak okolí (barometrický tlak) $p_{atm}[Pa]$
- relativní tlak před clonou v trubici se clonou $p_{rel\,clon}[Pa]$
- teplota v teplé větvi na výstupu v místě měření vlhkosti $T_{h\varphi}[°C]$
- relativní vlhkost v teplé větvi na výstupu $\varphi_h[\%]$
- teplota v studené větvi na výstupu v místě měření vlhkosti $T_{c\varphi}[°C]$
- relativní vlhkost v studené větvi na výstupu $\varphi_c[\%]$
- teplota na studeném konci trubice $T_c[°C]$
- teplota na teplém konci trubice $T_h[°C]$
- hmotnostní tok média trubicí $\dot{m}\left[\frac{kg}{hod}\right]$
- poměr hmotnostního toku média studenou větví vůči celkovému hmotnostnímu toku $c_m = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_{celk}}[\%]$

3.5 SESTAVA VÍROVÉ TRUBICE A HLAVNÍ DETAILY VÍROVÉ TRUBICE

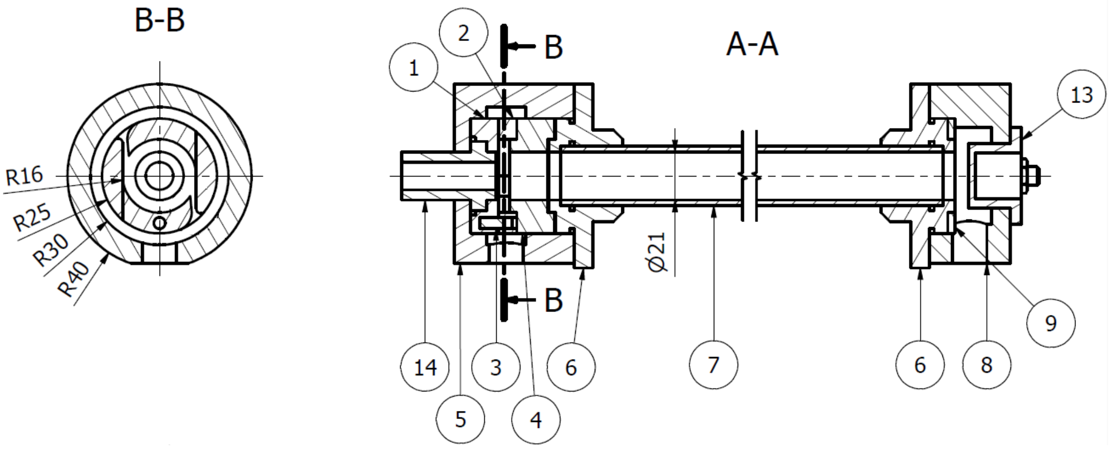
Izometrický pohled



Pohled



Řez A-A a B-B



ILUSTRACE 3.3 SESTAVA VÍROVÉ TRUBICE

KUSOVNÍK

Pozice	Počet	Součást
1	1	Tangenciální vstup 1. Segment
2	1	Tangenciální vstup 2. Segment
3	1	Kolík
4	1	Přítlačný kroužek
5	1	Vstupní víko
6	2	Příruba
7	1	Trubice
8	1	Výstupní víko
9	1	Vyrovnávací kroužek
10	2	Metrický šroub se šestihrannou hlavou M8 x 1,5 x 55
11	2	Šestihranná matice M8 x 1,25
12	2	Metrický šroub se šestihrannou hlavou M8 x 1,25 x 20
13	1	Zátka
14	1	Nátrubek

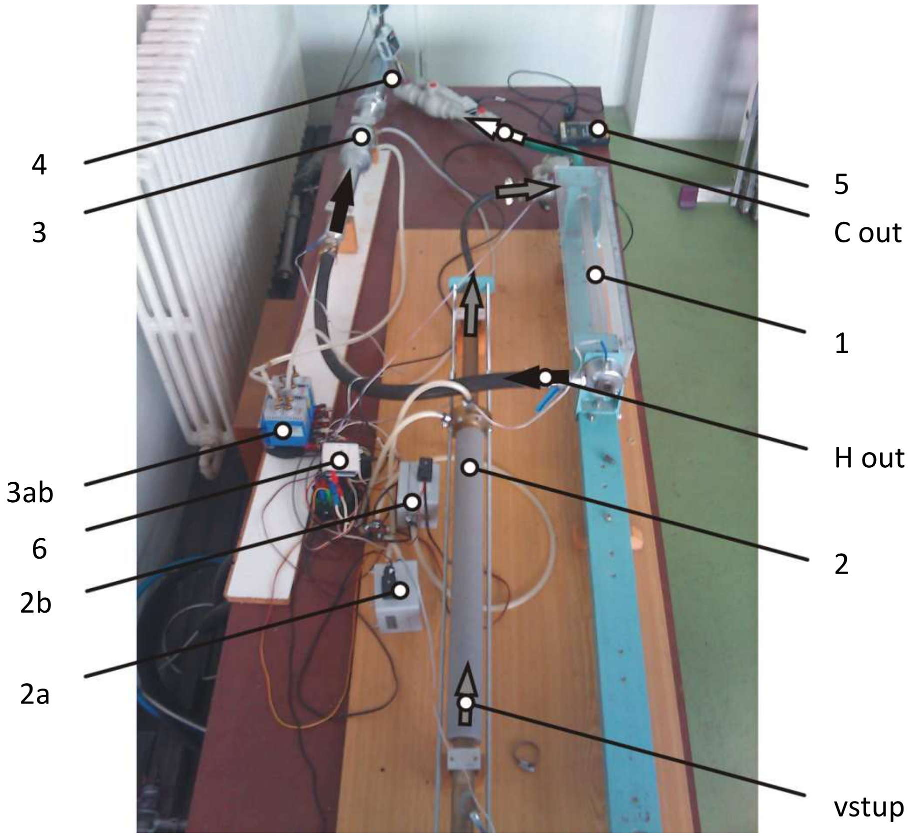
3.6 SESTAVENÍ FUNKČNÍHO ZAŘÍZENÍ

Vírová trubice, měřicí zařízení a prostory s funkčním rozvodem tlakového vzduchu byly zajištěny Západočeskou univerzitou.

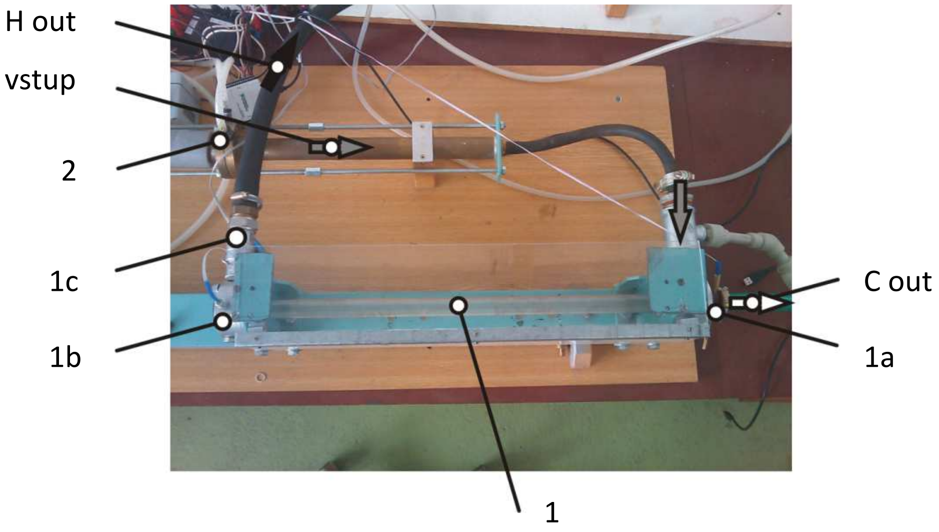
Sestavení funkčního zařízení bylo doprovázeno nákupem vhodných chybějících součástek, jako byly zátky pro výrobu teplotních čidel se závitem $G1/8$ a nákup speciálního lepidla pro jejich instalaci a další drobné součástky například pro připojení zařízení k rozvodu tlakového vzduchu. Největší objem práce v laboratoři byl přidělen na určení a zapojení vhodným měřicích přístrojů a zejména naprogramování automatizovaného softwaru pro záznam a vyhodnocování měření. Pro tento účel byl zvolen SW LabVIEW.

Jelikož rozbor programování měřidel a vývoj automatizovaného SW není v zadání požadován, dále se jím nezabývám, ačkoliv byl časově velmi náročný. Pro hrubý nástin způsobu měření přikládám v příloze 4 blokové schéma vytvořeného programu.

3.6.1 FOTOGRAFIE REÁLNÉHO ZAŘÍZENÍ S POPISEM



ILUSTRACE 3.4 POHLED NA SESTAVU



ILUSTRACE 3.5 PŮDORYSNÝ POHLED NA VÍROVOU TRUBICI

VYSVĚTLIVKY K ILUSTRACÍM 3.4 A 3.5

1	VÍROVÁ TRUBICE
1a	TEPLOTNÍ ČIDLO V STUDENÉM VÝSTUPU
1b	TEPLOTNÍ ČIDLO V TEPLÉM VÝSTUPU
1c	REGULAČNÍ VENTIL
2	TRUBICE SE CLONOU
2a	DIFERENČNÍ MANOMETR PRO HODNOTU $p_{rel\ clon}$
2b	DIFERENČNÍ MANOMETR PRO HODNOTU $p_{dif\ clon}$
3	VENTURIHO TRUBICE
3ab	DIFERNČNÍ MANOMETRY PRO HODNOTY $p_{rel\ vent}$ a $p_{dif\ vent}$
4	VLHKOMĚRY S TEPLOMĚREM NA KONCÍCH TEPLÉ A STUDENÉ VĚTVE
5	BAROMETR PRO HODNOTU p_{atm}
6	PŘEVODNÍK ANALOGOVÉHO SIGNÁLU NA DIGITÁLNÍ

4 VLASTNÍ EXPERIMENT

4.1 PROBLÉMY PŘI CHODU ZAŘÍZENÍ

V průběhu testování zařízení bylo řešeno mnoho vzniklých obtíží spojených s provozem zařízení.

Jednalo se o příliš vysokou teplotu v teplé větvi, která tavila polymerové těsnění kolem teplotních čidel a musela být nahrazena dvousložkovým, epoxidovým, elektricky nevodivým, teplotně odolným a dostatečně pevným lepidlem, neboť původně použité těsnění se působením vysoké teploty tavilo a bylo vytlačeno vnitřním přetlakem.

Dalším problémem byl vznik velmi malého množství kondenzátu v potrubí studené větve. V zimních měsících se kondenzát neobjevoval a relativní vlhkost byla ve studené větvi do 95%. V letním počasí s vyšší teplotou a s tím spojenou vyšší měrnou vlhkostí vzduchu zřejmě nestačil kompresor odvádět veškerou vlhkost, což mělo za následek vysráženou vodu v potrubí, která silně ovlivňovala měření vlhkosti vzduchu. Výsledky byly nepoužitelné, proto bylo nutné v případě vzniku kondenzátu čekat na vyschnutí celého soustrojí.

Jako hlavní problematika se jevila neschopnost instalovaného kompresoru dodávat dostatečné množství tlakového vzduchu při udržení konstantního tlaku. Z ekonomických a časových důvodů nebyl instalován výkonnější kompresor, ani nebyly paralelně zapojeny další kompresory, ale bylo využito tlakového vzdušníku o objemu $500\ l$, kdy byly hodnoty naměřeny v celém tlakovém spektru poklesu tlaku v síti. Řádově se jednalo o rozmezí $p_{rel\ clon} = 650\ 000\ \div 350\ 000\ Pa$. Hodnoty byly rozděleny do tlakových hladin $p_{rel\ clon}$ $6\ bar; 5\ bar; 4\ bar\ a\ 3{,}5\ bar$ s odchylkou $\pm 25\ 000\ Pa$.

4.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Popsání jevu sušení ve vírové trubici bylo provedeno následujícími porovnáními v jednotlivých tlakových hladinách $p_{rel\ clon}$

- teplota teplého a studeného konce trubice T_h ; T_c v závislosti na c_m
- poměr měrné vlhkosti v teplé větvi vůči studené $c_x = \frac{x_h}{x_c}$ v závislosti na c_m
- teplota rosného bodu v teplém a studeném konci T_h''; T_c'' v závislosti na c_m
- poměr měrné vlhkosti v teplé a studené větvi vůči vlhkosti přiváděného vzduchu $c_{xh} = \frac{x_h}{x_{vst}}$ a $c_{xc} = \frac{x_c}{x_{vst}}$ v závislosti na c_m

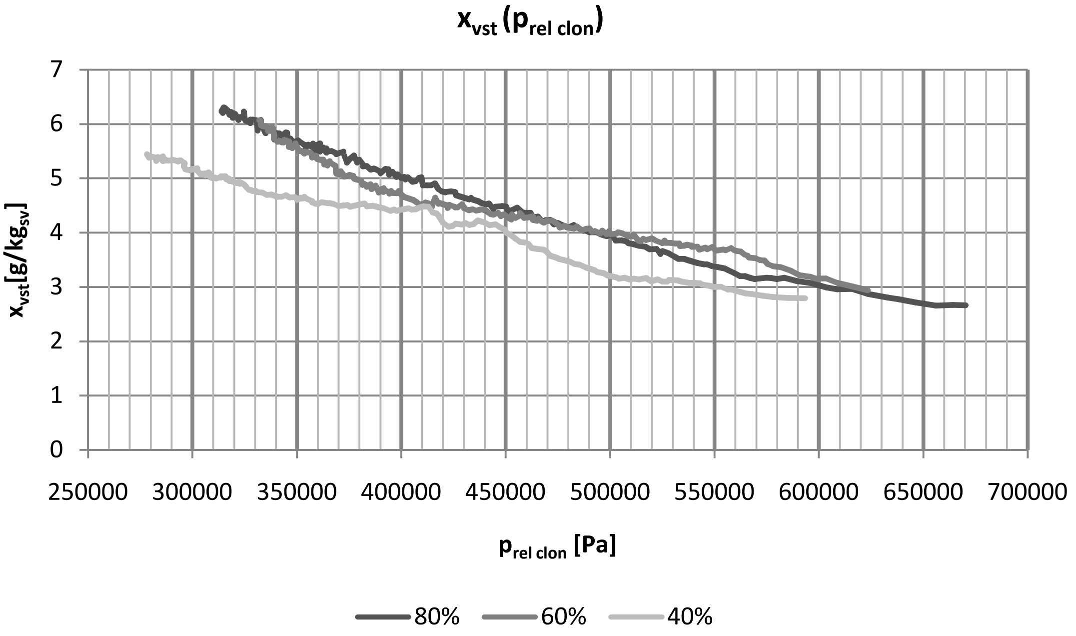
a pro jednotlivé nastavení c_m

- měrná vlhkost přiváděného vzduchu x_{vst} .

4.2.1 MĚRNÁ VLHKOST PŘIVÁDĚNÉHO VZDUCHU x_{celk}

Tato veličina nebyla přímo měřena, ale dopočítávala se ze znalosti měrných vlhkostí na obou výstupech. Pro správné vyhodnocení se při chodu zařízení nesmí objevit kondenzát.

$$x_{vst} = c_m \cdot x_c + (1 - c_m) \cdot x_h \tag{4.1}$$

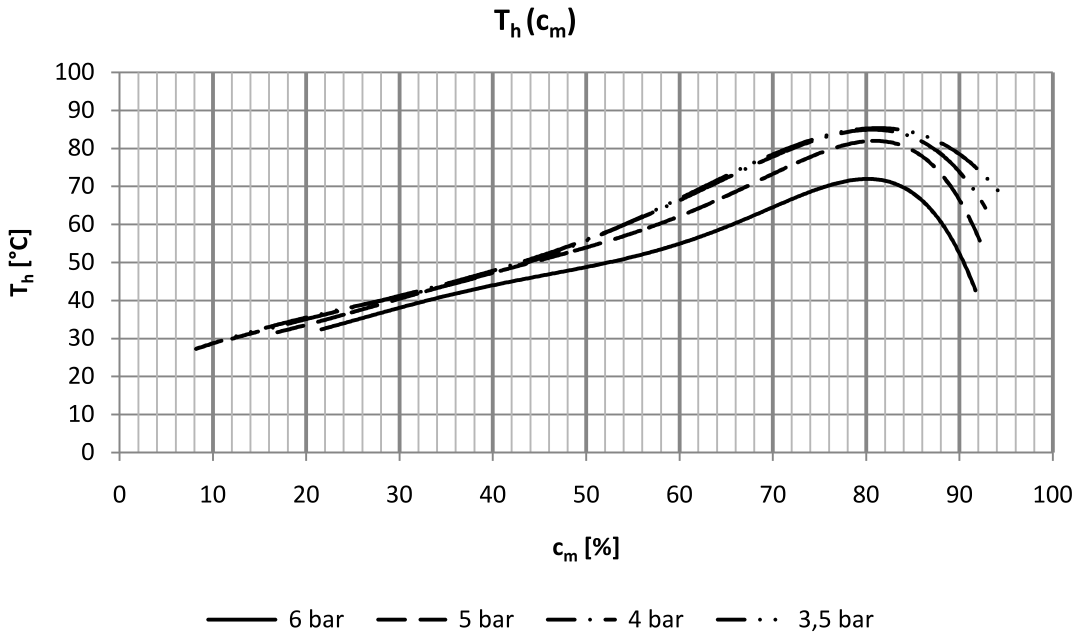


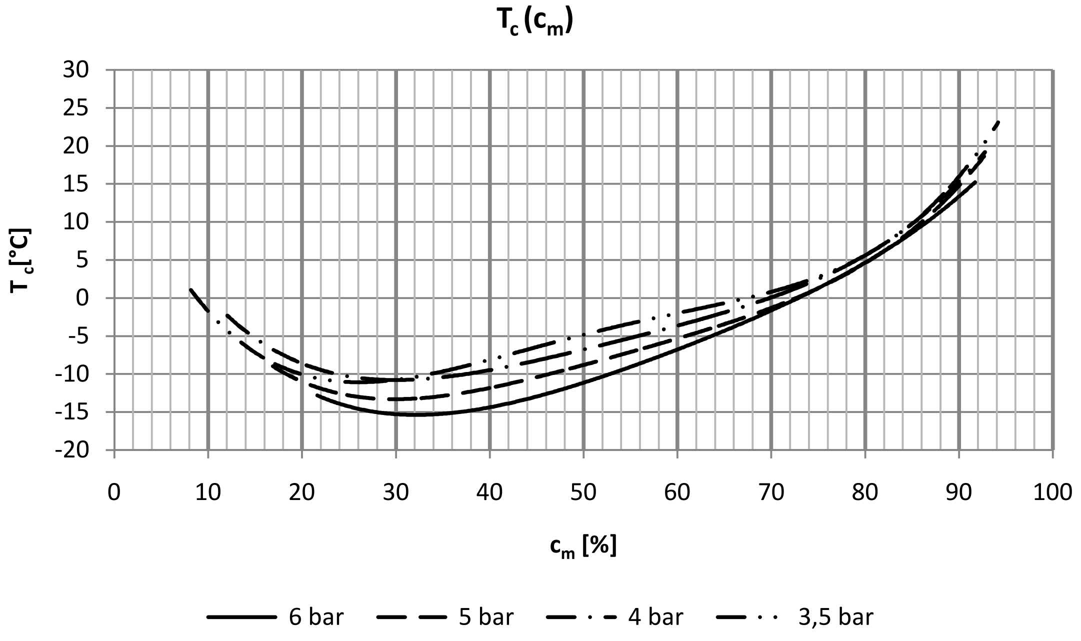
V grafu jsou znázorněné 3 křivky pro různé nastavení c_m. Odlišné průběhy jsou připisovány různým vnějším podmínkám, neboť měření těchto tří zobrazených průběhů probíhalo v různé dny a rovněž různě vytížené síti tlakového rozvodu.

Je zřejmé, že v průběhu měření, které je doprovázené poklesem tlaku, roste měrná vlhkost přiváděného vzduchu. Růst měrné vlhkosti je zapříčiněn menším vznikem kondenzátu v kompresoru vlivem stlačení, neboť tlaková diference z atmosférického tlaku na tlak pracovní klesá při chodu zařízení.

4.2.2 TEPLOTA TEPLÉHO A STUDENÉHO KONCE TRUBICE T_h, T_c

Hodnota T_h a T_c byla přímo měřena v zařízení na koncích trubice.





Z naměřených hodnot zobrazených v grafech vyplývá, že byla zaznamenávána neustálená hodnota teploty. Větší tlakový spád by měl vyvodit nižší teplotu studeného a vyšší teplotu teplého konce. Při našem měření jsem však zaznamenal

opačný postup růstu teploty v závislosti na tlaku. Skutečnosti se blíží jen hodnota T_c a T_h při tlaku $p_{rel\,clon} = 3{,}5\ bar$.

Samotný vývoj křivek se dá považovat za správný, pokud jej porovnáme s výsledky z předchozích prací na stejném zařízení.

4.2.3 TEPLOTA ROSNÉHO BODU V TEPLÉM A STUDENÉM KONCI T_h'', T_c''

Jako jedna z důležitých sledovaných veličin byla určena teplota rosného bodu pro případné další sušení vzduchu metodou mokrého chlazení.

Pro výpočet teploty rosného bodu jsem zvolil jako nejvhodnější vztah Magnus-Tetensovu aproximaci s Böglovo modifikací rovněž zvanou Arden Buckova rovnice ve tvaru:

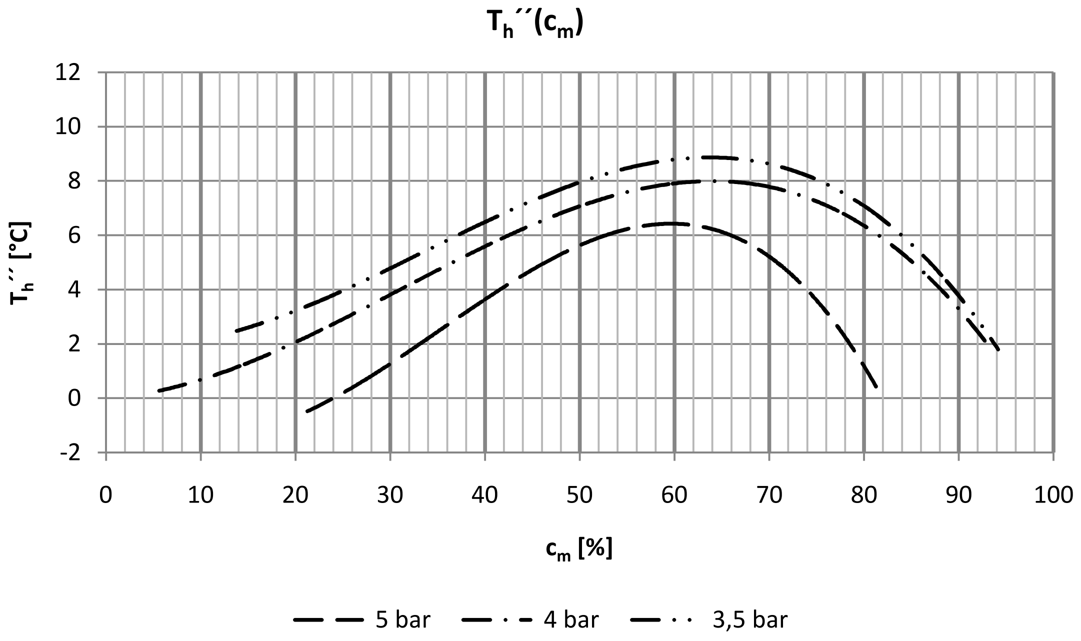
$$T_{h,c}'' = 257{,}14 \cdot \frac{\gamma}{18{,}678-\gamma} \tag{4.2}$$

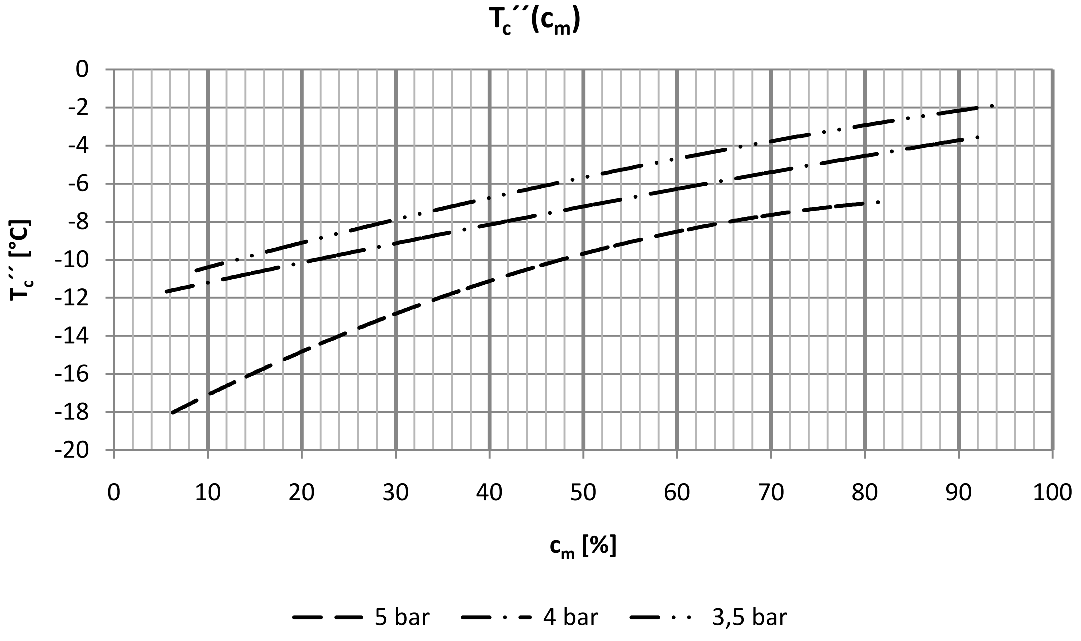
$$\gamma = \ln\left(\frac{\varphi_{h,c}}{100}\exp\left(18{,}678 - \frac{T_{h,c\,\varphi}}{234{,}5}\right)\left(\frac{T_{h,c\,\varphi}}{257{,}14+T_{h,c\,\varphi}}\right)\right) \tag{4.3}$$

Rovnice zaručuje přesnost 0,1 % při $-35 \leq T_{h,c\,\varphi} \leq +35\ °C$ a v rozsahu našeho použití odchylku do 2 %. [15]

Při porovnání hodnot T_h'', T_c'' a T_h, T_c je patrné, že v oblastech nastavení poměru c_m mezi 20 ÷ 50 % jsou ve studené větvi ideální podmínky pro vznik kondenzátu v potrubí. Důležité je, že při nižším pracovním tlaku je možnost vzniku kondenzátu vyšší, nežli při využívání vyšších pracovních tlaků.

Tato teorie je potvrzena pozorováním, kdy se kondenzát v potrubí objevil ke konci měření, kdy byl vstupní tlak velmi nízký – řádově $p_{rel\,clon} < 4\ bar$.

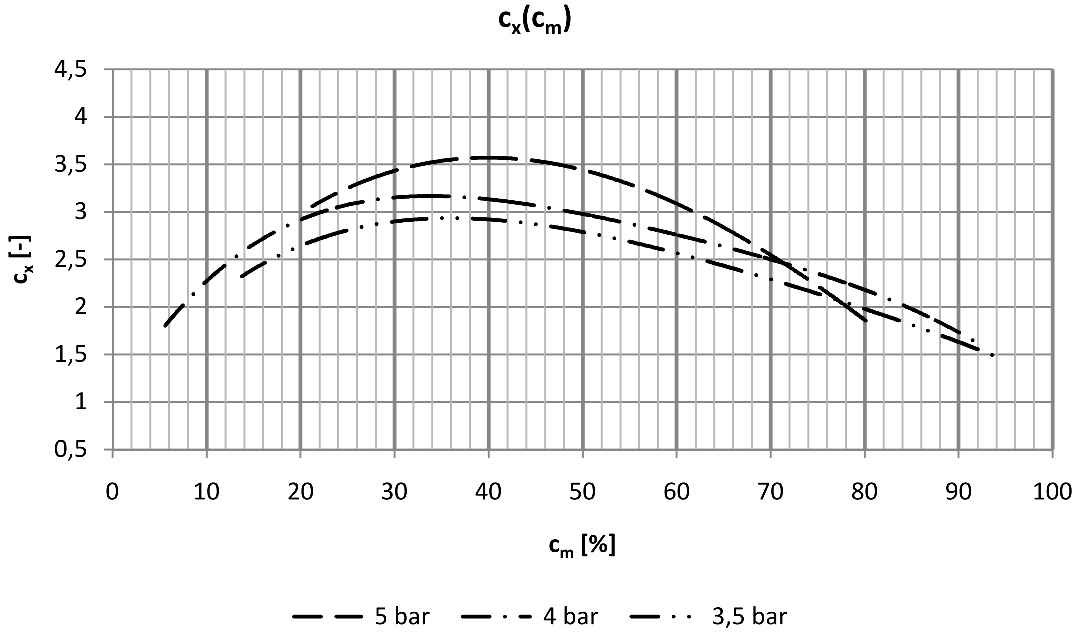

Th´´(cm)
12
10
8
6
4
2
0
-2
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
Th´´ [°C]
cm [%]
5 bar
4 bar
3,5 bar


Tc´´(cm)
0
-2
-4
-6
-8
-10
-12
-14
-16
-18
-20
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
Tc´´ [°C]
cm [%]
5 bar
4 bar
3,5 bar

4.2.4 POMĚR MĚRNÉ VLHKOSTI V TEPLÉ VĚTVI VŮČI STUDENÉ c_x

Samotný proces sušení využívající centrifugální pole lze dobře popsat poměrnými čísly c_x, c_{xh} a c_{xc}.

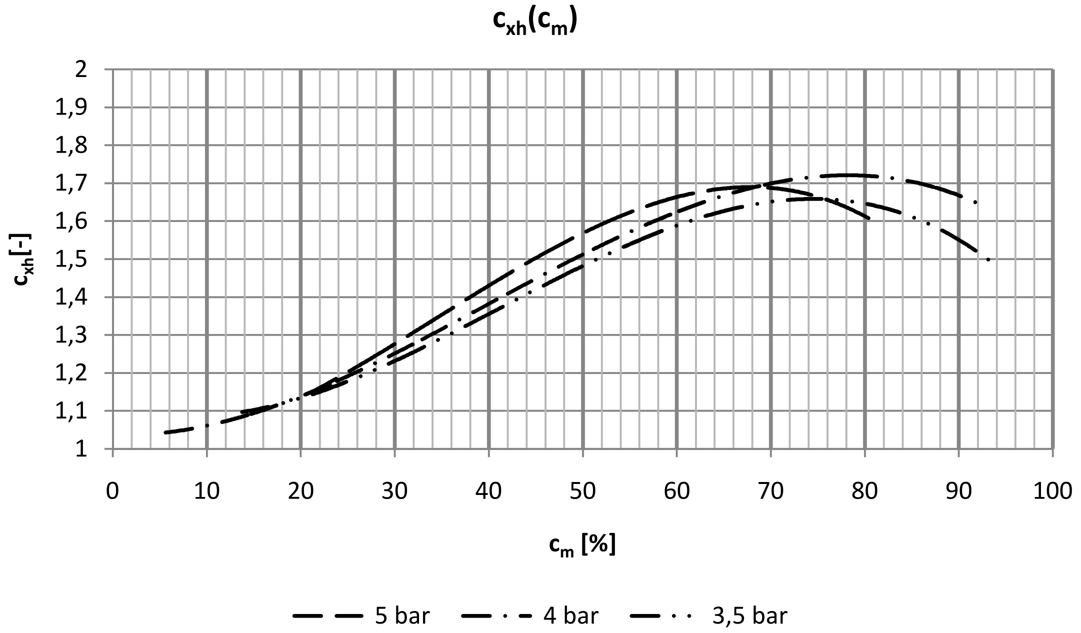
Poměrné číslo c_x vyjadřuje kolikanásobně je vyšší měrná vlhkost v teplé větvi vůči studené. V grafu $c_x(c_m)$ je dobře patrné maximum v oblasti $c_m = 30 \div 40\ \%$, kde c_x nabývá hodnot $3 \div 3{,}5$.

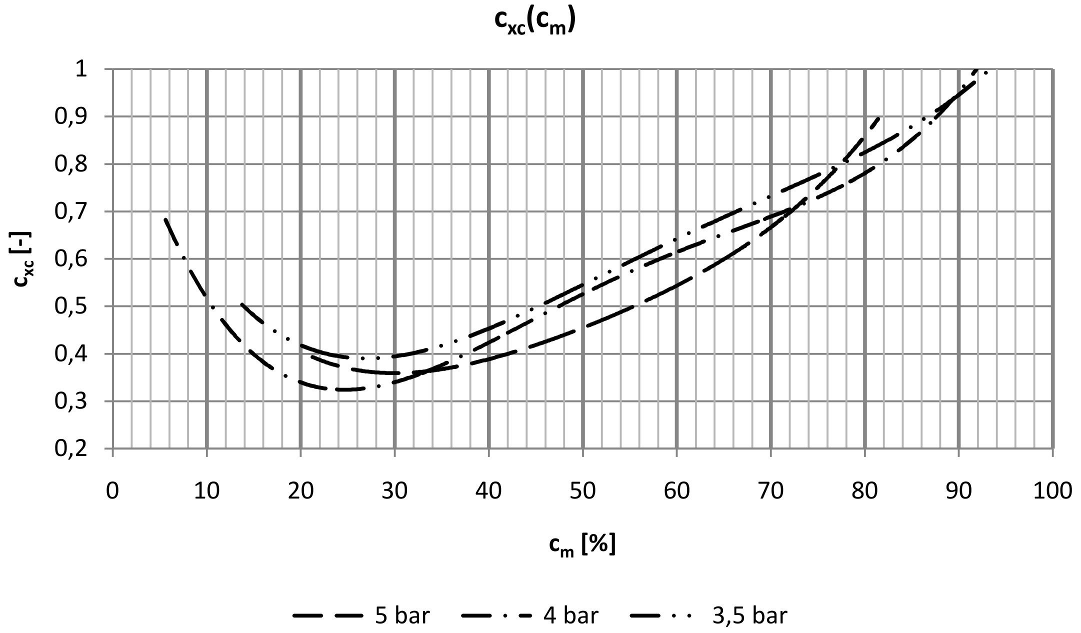


4.2.5 POMĚR MĚRNÉ VLHKOSTI V TEPLÉ A STUDENÉ VĚTVI VŮČI MĚRNÉ VLHKOSTI VSTUPNÍHO VZDUCHU c_{xh}, c_{xc}

Tento parametr vyjadřuje míru, kolikanásobně je vlhčí vzduch na výstupech oproti vlhkosti vstupního vzduchu. Je tedy ideálním parametrem pro zjištění optimálního nastavení vírové trubice.

Nejvyšší vysušení pomocí vírového pole trubice vykazuje při nastavení $c_m = 30\ \%$, kde dochází k vysušení až $60 \div 70\ \%$ obsahu vody. Dochází však k znehodnocení 70 % vstupního hmotnostního toku v teplé větvi.


$c_{xh}(c_m)$
2
1,9
1,8
1,7
1,6
1,5
1,4
1,3
1,2
1,1
1
c_{xh}[-]
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
c_m [%]
5 bar
4 bar
3,5 bar


$c_{xc}(c_m)$
1
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
c_{xc} [-]
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
c_m [%]
5 bar
4 bar
3,5 bar

5 ZÁVĚR

Z experimentálního šetření je patrné, že lze sušit vzduch pomocí vírové trubice dvěma způsoby.

Prvním z nich je sušení centrifugálním polem, kdy jsou těžké molekuly vody odstředivými silami vytlačovány do vnějšího teplého proudu a lehčí molekuly vzduchu, jako je kyslík, dusík a ostatní lehčí plyny tlačeny do středu víru. Podobně, jako je tomu například při obohacování uranu z par fluoridu uranového v odstředivkách.

Lze předpokládat, že tento princip je podpořen difúzí molekul vody z oblasti vyšší koncentrace vody ve středním studeném proudu, kde je $\varphi = 30 \div 100\ \%$ do oblasti vnějšího teplého vzduchu, kde $\varphi = 5 \div 15\ \%$. Míra difúze je pro naše podmínky nezměřitelná a předpokládám jen malý vliv na výsledné sušení, neboť sušení difúzí potřebuje delší čas a pevný proud vzduchu bez víření. Tedy vír s konstantní úhlovou rychlostí v každém bodě.

Druhým objeveným způsobem sušení je využití nízké teploty ve studené větvi a využít principu mokrého chlazení, kdy v oblasti $c_m = 30 \div 50\ \%$ může dojít k poklesu teploty pod teplotu rosného bodu a to zejména při nižších tlacích na vstupu do sestavy, kdy má vstupní vzduch vyšší měrnou vlhkost vlivem nižšího efektu sušení vzduchu stlačením v kompresoru. Množství vody odvedené ze vzduchu tímto způsobem je zanedbatelné, pokud kompresor s odlučovačem kondenzátu funguje správně.

Vstupní vzduch je vysušen ve studené větvi při vhodném nastavení na zhruba třetinovou hodnotu měrné vlhkosti vstupu za současného zvýšení měrné vlhkosti v teplé větvi.

Nevýhodou této metody je neekonomičnost provozu, neboť stlačený vzduch je jedna z nejdražších energetických komodit. Současně je při sušení tímto způsobem znehodnoceno a nevyužito velké množství vyrobeného vzduchu z teplé větve a

zároveň je nutné vstupní vzduch stlačovat a odvádět značné množství kondenzátu z kompresoru, který odvádí mnohem větší část vlhkosti než samotná trubice.

Za optimální nastavení vírové trubice pro sušení považuji takové nastavení, při kterém je teplota ve studené větvi mírně vyšší oproti teplotě rosného bodu ve větvi studené a zároveň dochází k maximálnímu vysušení. To odpovídá nastavení hodnoty $c_m = 30\ \%$ pro všechny tlakové hladiny.

I přes nevýhody by si tento způsob sušení mohl najít své uplatnění, neboť při vhodných parametrech nastavení probíhá sušení bez vzniku kondenzátu či ledu v potrubí. Zařízení by při opomenutí provozu kompresoru bylo bezúdržbové a jediným odpadem by byl vlhčí vzduch v teplé větvi, který zle využít pro zpětný ohřev studené větve a tím značně ušetřit energii oproti metodě mokrého chlazení.

POUŽITÁ LITERATURA

[1] Linhart, J., Mechanika tekutin I. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009

[2] Kalal, M., Experimental study and CFD modelling on the Vortex tube performance [disertační práce]. [Pilsen]: University of West Bohemia, Faculty of Mechanical Engineering, 2007.

[3] Mareš, R., Kapitoly z termomechaniky [Elektronický zdroj]. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009

[4] Kalčík, J., Sýkora, K.; Technická termomechanika. Praha: Academia, 1973

[5] Chyský, J., Vlhký vzduch. Praha: SNTL, 1977

[6] Mauer, K., Vzduchotechnická zařízení. Praha: Sobotáles, 2007

[7] Straka, F., Sušička stlačeného vzduchu. Plzeň, 2008/2009. Bakalářská práce (Bc.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní.

[8] The Ranque-Hilsch Vortex Tube. Mechanical Engineering University of California, Berkley. [online]. 2010 [cit. 2013-06-06]. Dostupné z: http://www.me.berkeley.edu/~gtdevera/notes/vortextube.pdf

[9] Věda technika a my, Praha: Mladá fronta, 1989; roč. 89, č. 8.

[10] How Does a Vortex Tube Work?. AiRTX [online]. 2008 [cit. 2013-06-06]. Dostupné z: http://www.airtx.com/how-does-a-vortex-tube-work.htm

[11] Vortex Tubes – vírové trubice. VORTEC [online]. 2011 [cit. 2013-06-06]. Dostupné z: http://www.lontech.cz/

files/virove_trubice/prehled_modelu_virovych_trubic.pdf

[12] Dílenský kompresor UNM STS. Schneider-Bohemia [online]. [cit. 2013-06-06].

Dostupné z: http://www.schneider-bohemia.cz/

Web/Catalogue/ArtDetails.ASP?MID=1&ArtID=2595&GLN=2

[13] ČSN EN ISO 5167. Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu. Praha: Český normalizační institut, 2003.

[14] Andres, M.; O Vlhkém vzduchu. PowerWiki [online]. 2009 [cit. 2013-06-20]. Dostupné z: www.powerwiki.cz/attach/ET2/OVlhkemVzduchu2009.doc

[15] Dew point. Wikipedia [online]. 2013 [cit. 2013-06-20]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Dew_point

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Výkres A3: Vírová trubice

Příloha 2 – Výkres A3: Venturiho trubice

Příloha 3 – Výkres A3: Trubice se clonou

Příloha 4 – Blokové schéma programu pro zápis měření