



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MECHANIKY TEKUTIN A TERMODYNAMIKY

**ANALÝZA CHLADICÍ VĚŽE S PŘIROZENÝM TAHEM
Z POHLEDU MÍSTNÍ ZTRÁTY**

**NATURAL DRAFT WET-COOLING TOWER MINOR LOSS
ANALYSIS**

Bakalářská práce

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D.

Tomáš Brychta

2018

Praha

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Brychta** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **457640**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza chladicí věže s přirozeným tahem z pohledu místní ztráty

Název bakalářské práce anglicky:

Natural Draft Wet-Cooling Tower Minor Loss Analysis

Pokyny pro vypracování:

1. V rešeršní části práce diskutujte způsob řešení přestupu tepla a hmoty v chladicí věži s přirozeným tahem.
 2. Podrobně popište Merkelův model přestupu tepla a hmoty při výparném chlazení.
 3. V práci uveďte rovnici tahu chladicí věže s přirozeným tahem a diskutujte ztráty při proudění ve věži.
 4. Použijte funkce připravené v MATLABu pro výpočet přestupu tepla a hmoty v chladicí věži.
 5. Z podkladů z literatury se pokuste určit konkrétní hodnotu ztrátového součinitele věže dle podkladů od vedoucího práce.
- Rozsah práce: cca 30 stran včetně obrázků.

Seznam doporučené literatury:

dle doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D., 12112

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:


Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.08.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **29.04.2019**



doc. Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



prof. Ing. Jiří Nožička, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

30.4.2018

Datum převzetí zadání

Brychta

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Tomáši Hyhlíkovi Ph.D. za čas, který mi věnoval, jeho příkladné a trpělivé vedení, za cenné připomínky a celkově za vstřícný přístup. Dále bych chtěl poděkovat rodině za podporu v průběhu celého studia a v neposlední řadě děkuji i přátelům, jež mi poskytli potřebné odreagování.

Anotace

Jméno autora:	Tomáš Brychta
Instituce:	České Vysoké Učení Technické v Praze Fakulta strojní 12112 – Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky Technická 4, 166 07 Praha 6
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství
Název práce:	Analýza chladicí věže s přirozeným tahem z pohledu místní ztráty
Vedoucí práce:	doc. Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D.
Počet stran:	43
Rok:	2017/2018
Klíčová slova:	chladicí věž, vlhký vzduch, přestup tepla a hmoty, Merkelův model, rovnice tahu, ztrátový koeficient

Bakalářská práce se zabývá především výpočtem přestupu tepla a hmoty v chladicí věži s přirozeným tahem. V úvodu je stručně nastíněna problematika chladicích věží a jejich konstrukcí. Dále je v práci definován Lewisův faktor a rovnice přestupu tepla a hmoty pro nenasycený a přesycený vzduch podle Klimanka a Bialeckého. Poté je v práci představen Merkelův model a rovnice tahu dle Klopperse a Krögera. Společně s rovnicí tahu jsou v práci uvedeny jednotlivé ztrátové koeficienty. Konec práce je věnován výpočtům přestupu tepla a hmoty a ztrátového koeficientu v programu MATLAB.

Abstract

Author's name:	Tomáš Brychta
Institution:	Czech Technical University in Prague Faculty of Mechanical Engineering 12112 – Department of Fluid Dynamics and Thermodynamics Technická 4, 166 07 Praha 6
Programme:	Theoretical fundamentals of mechanical engineering
Title:	Natural Draft Wet-Cooling Tower Minor Loss Analysis
Consultant:	doc. Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D.
Number of pages:	43
Year:	2017/2018
Keywords:	cooling tower, humid air, heat and mass transfer, Merkel's theory, draft equation, loss coefficient

Bachelor thesis is focused mainly on heat and mass transfer in natural draft cooling tower. In the beginning of the thesis the principles of water cooling towers and their construction types are described. Next, Lewis factor is defined and governing equations of heat and mass transfer for unsaturated and for supersaturated air described by Klimanek and Bialecky is introduced. Then Merkel's theory is described and draft equation according to Kloppers and Kröger is presented. Together with draft equation loss coefficients are also described. Last part of this Bachelor thesis is devoted to examples of heat and mass transfer and loss coefficient calculated in MATLAB.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	9
1. Úvod	11
2. Chladicí věž	12
2.1. Základní rozdělení chladicích věží	12
2.1.1. Chladicí věž s přirozeným tahem	12
2.1.2. Chladicí věž s tahem nuceným	13
2.2. Komponenty chladicí věže s přirozeným tahem	14
2.2.1. Systém distribuce vody	14
2.2.2. Výplň	14
2.2.3. Eliminátory	16
2.3. Účinnost chladicí věže	16
3. Rovnice přestupu tepla a hmoty	17
3.1. Lewisův faktor	17
3.2. Výpočet výplně chladicí věže	18
3.2.1. Rovnice pro nenasycený vzduch	19
3.2.2. Rovnice pro přesycený vzduch	21
4. Merkelův model	24
4.1. Merkelovo číslo	24
4.2. Aproximace Merkelova integrálu	26
5. Rovnice tahu a ztráty při proudění	27
5.1. Rovnice tahu	27
5.2. Ztráty při proudění ve věži	29
5.2.1. Ztráty ve výplni	29
5.2.2. Ztráty v oblasti deště	30
5.2.3. Ztráty na eliminátorech	30
5.2.4. Ostatní ztráty	31

6. Výpočty	33
6.1. Přestup tepla a hmoty v chladicí věži	33
6.2. Ztrátový součinitel věže	37
7. Závěr	40
Zdroje	42

Seznam použitých symbolů a zkratek

a		koeficient, konstanta, plocha na jednotku objemu
A	$[m^2]$	plocha
c	$[J/kgK]$	měrná tepelná kapacita
C		konstanta, koeficient
d	$[m]$	průměr
D	$[m^2/s]$	difuzní tok
F	$[N]$	síla
g	$[m/s^2]$	tíhové zrychlení
G	$[kg/sm^2]$	hustota hmotnostního toku
h	$[J/kg]$	měrná entalpie
J	$[m^2/s]$	difuzní tok
K		ztrátový koeficient
l	$[J/kg]$	měrné skupenské teplo
L	$[m]$	délka
Le		Lewisovo číslo
Le_f		Lewisův faktor
\dot{m}	$[kg/s]$	hmotnostní tok
Me		Merkelovo číslo
Nu		Nusseltovo číslo
p	$[Pa]$	tlak
Pr		Prandtlovo číslo
q	$[J/kg]$	měrné sdělené teplo
Q	$[W]$	tepelný tok, tepelný výkon
r	$[J/kgK]$	měrná plynová konstanta
Re		Reynoldsovo číslo
Ry	$[m^{-1}]$	charakteristický parametr toku
Sc		Schmidtovo číslo
St		Stantonovo číslo vedení tepla
St_m		Stantonovo číslo přenosu hmoty
t	$[°C]$	teplota
T	$[K]$	teplota
v	$[m/s]$	rychlost
x	$[1]$	vodní obsah vlhkého vzduchu

α	$[W/m^2K]$	součinitel přestupu tepla
β	$[kg/m^2s]$	součinitel přestupu hmoty
η	$[kg/ms]$	dynamická viskozita
λ	$[W/mK]$	tepelná vodivost
φ	[1]	relativní vlhkost vzduchu
ξ	$[K/m]$	spádový koeficient
ρ	$[kg/m^3]$	hustota
τ	$[N/m^2]$	tečné napětí

Dolní indexy

0	ve stagnačním stavu
$(x + 1)$	vztaženo k $1+x$ kg (vlhkého vzduchu)
a	vztahující se ke vzduchu
av	označuje směs suchého vzduchu a páry
ct	označuje chladicí věž
ctc	označuje kontrakci ve věži
cte	označuje expanzi ve věži
de	označuje eliminátory
fi	označuje výplň; vztaženo k výplni
fr	vztaženo k čelní ploše
fs	označuje podporu výplně
H	vztaženo k výšce
i	index; označuje vstup
il	označení pro vstupní mřížování
m	střední hodnota
o	označuje výstup
p	konstantní tlak
rz	označení pro oblast deště
s	vztahující se k páře
sp	označení pro sprchu
ts	označení pro podpory věže
v	vztahující se k páře
w	vztahující se k vodě
wb	mokrý teploměr
wd	označení pro distribuci vody

Horní indexy

"	označuje stav na mezi sytosti
---	-------------------------------

1. Úvod

Když se řekne chladicí věž, většina lidí si velmi pravděpodobně představí obří betonové stavby, jež můžeme vídat u elektráren. Tyto věže ve tvaru rotačního hyperboloidu jsou však pouze jedním z velkého množství věží rozličných velikostí, typů či tvarů. Tyto a další parametry chladicích věží závisí na faktorech jako okolní prostředí nebo například princip samotného chlazení. Problematika chlazení je tedy poměrně složitá a pro návrh věže, která by poskytla, pokud možno optimální chladicí výkon, je důležité znát procesy, jež se odehrávají v prostoru chladicí věže.

Chladicí věže jsou nepostradatelnou součástí všech jaderných a tepelných elektráren, továren a dalších průmyslových staveb a aplikací. Obecně můžeme říct, že chladicí věže využíváme tam, kde potřebujeme ochladit velké množství chladicí látky – nejčastěji vody, která je díky svému hojnému zastoupení v přírodě relativně levným, ale přesto účinným, chladicím médiem.

Základním principem, který využíváme, je vypařování vody smíšené se vzduchem v podobě páry a následného odvedení tepla. Na chladicí věž se tedy můžeme dívat jako na směšovací výměník.

Než se pustíme do rovnic popisujících jednotlivé procesy probíhající uvnitř chladicích věží, bylo by zřejmě vhodné se v úvodní kapitole seznámit s chladicími věžemi jako takovými – na jakých principech fungují a z jakých částí se skládají.

Následně si pomocí práce Klimanka a Bialeckého [9] popíšeme přestup tepla a hmoty v chladicí věži s přirozeným tahem pomocí dvou soustav čtyř obyčejných diferenciálních rovnic – jedna soustava pro nenasycený vzduch a druhá pro případ jeho přesycení. Poté si v další kapitole si popíšeme Merkelův model, přičemž si ukážeme i jednodušší postup při popisu přestupu tepla a hmoty.

V páté kapitole bude uvedena rovnice tahu chladicí věže s přirozeným tahem tak, jak ji ve své práci [15] uvádí Kröger. Pomocí jeho práce a práce Klopperse [14] budou posléze uvedeny ztrátové koeficienty pro jednotlivé komponenty a oblasti chladicí věže, jenž se v rovnici tahu vyskytují.

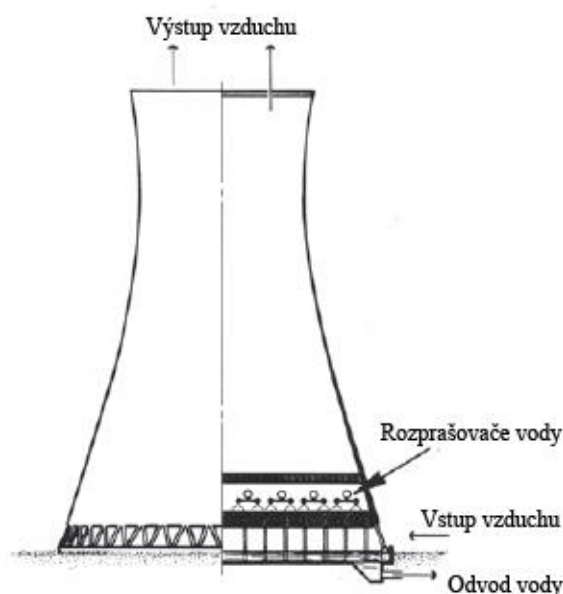
Závěr práce bude věnován výpočtům jednak přestupu tepla a hmoty pomocí vzorového zadání, kde bude moci být správnost řešení porovnána s referenčními výsledky z [5], ale také pokusu o vyčíslení celkového ztrátového koeficientu chladicí věže s přirozeným tahem, jejíž parametry jsou zadané v podkladech od vedoucího této práce. Pro výpočet bude využito programu MATLAB.

2. Chladicí věž

2.1. Základní rozdělení chladicích věží

2.1.1. Chladicí věž s přirozeným tahem

Z hlediska vzniku proudění můžeme chladicí věže rozdělit na dvě základní kategorie. První z nich jsou věže s přirozeným tahem. Ty nevyužívají žádných mechanických součástí (větráků) k vytvoření proudění vzduchu věží. Nejvýraznějším typem chladicí věže s přirozeným tahem jsou hyperbolické chladicí věže, jež svůj název dostaly díky tvaru jejich skořepiny (Obrázek 1), vysoce spolehlivé a jejich účinnost je dobře předvídatelná. Jak se můžeme dočíst v [1], tah těchto věží je vytvořen rozdílnou hustotou mezi zahříváním (tedy méně hustým) vzduchem uvnitř chladicí věže a relativně chladnějším (tedy hustějším) vzduchem v okolí věže. Hyperbolické věže mohou být postaveny jak v souproudé, tak i v protiproudé konfiguraci.



Obrázek 1: Hyperbolická chladicí věž – protiproudá konfigurace (převzato z [1] a upraveno)

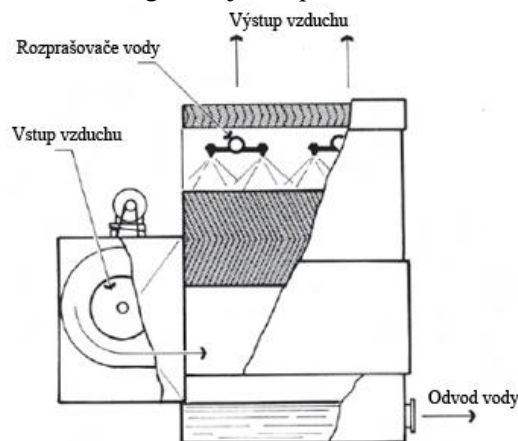
Tyto železobetonové stavby bývají opravdu obří – jak [1] udává, mohou dosahovat výšek přes 150 metrů a průtok vody bývá i více než 17 m³/s. Ačkoliv je výstavba těchto věží velmi nákladná, jsou široce využívány u elektráren, kde je potřeba odvést relativně stálé a hlavně vysoké množství tepla. Výhodou však je, že náklady na mechanické součásti a jejich údržbu jsou nulové, díky čemuž se tyto chladicí věže za určitou dobu provozu „zaplatí“. Naopak nevýhodou je, že tyto věže pracují efektivně na místech s vyšší

relativní (poměrnou) vlhkostí vzduchu a v sušších oblastech nebo v oblastech s vyšší nadmořskou výškou je výhodnější použít chladičí věže s tahem nuceným.

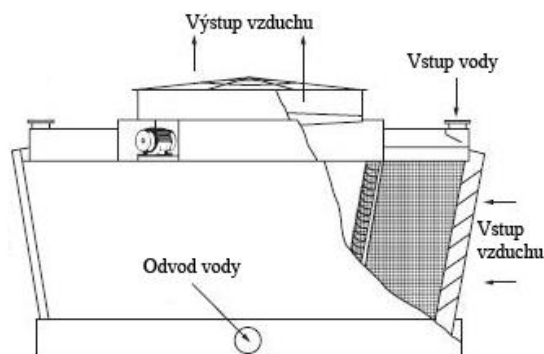
2.1.2. Chladičí věž s tahem nuceným

Tyto věže využívají k vytvoření proudu vzduchu jednoho či více ventilátorů. Díky tomu je proud vzduchu stabilní a efektivita chladičí věže je mnohem méně ovlivněna klimatickými podmínkami, než tomu je u věží s tahem přirozeným. Přítomnost ventilátorů znamená nejen to, že přesně víme, jaký objem vzduchu věží proudí, ale také nám tento objem umožňuje reagovat, čímž můžeme udržovat přibližně stejný výkon při měnících se podmínkách.

Jak můžeme vidět v [2], chladičí věže s nuceným tahem můžeme podle umístění ventilátoru a jeho funkce rozdělit na dvě skupiny. První jsou věže s ventilátorem umístěným v dolní části konstrukce v místě vstupu vzduchu (Obrázek 2). Ventilátor zde protlačuje vzduch věží a jedná se tak o protiproudou konfiguraci. V druhém případě (Obrázek 3) je ventilátor umístěn v horní části věže na výstupu vzduchu, který nasávají ze spodní části. Tato konfigurace je souproudá.



Obrázek 2: Věž s nuceným tahem – protiproudá konfigurace (převzato z [1] a upraveno)



Obrázek 3: Věž s nuceným tahem – souproudá konfigurace (převzato z [2] a upraveno)

Samozřejmostí je, že existují i kombinace výše uvedených typů chladicích věží. Příkladem může být chladicí věž s přirozeným tahem, kde je vznikající komínový efekt podpořen ventilátory.

2.2. Komponenty chladicí věže s přirozeným tahem

Jelikož se v dalších kapitolách budeme věnovat výpočtům chladicí věže s přirozeným tahem, bude stačit, když si popíšeme komponenty, jež obsahuje právě tato konstrukce, a komponenty typické pro věže s tahem nuceným jako ventilátor či difuzor vynecháme.

2.2.1. Systém distribuce vody

Vstupním místem vody do prostoru samotné chladicí věže je systém distribuce vody. Ten navazuje na rozvodné potrubí, které odvádí ohřáté chladicí médium z chlazeného prostoru a dovedou vodu do prostoru nad výplň. V [1] se dočteme, že první částí jsou betonové nebo ocelové kanály, ze kterých následně vystupuje síť většinou plastových trubek. Ty jsou vybaveny rozprašovači (Obrázek 4), aby došlo k co možná nejrovnoměrnější distribuci vody v průřezu věže. Odtud následně voda padá vlivem gravitace na výplň věže.



Obrázek 4: Rozprašovací trysky (převzato z [1])

Nevýhodou tohoto systému je, že se trysky zejména menších rozměrů mohou zanášet a je proto kladen důraz na kvalitu použité vody, ve které by neměly být obsaženy větší částice, jež by se mohly shlukovat a trysku případně ucpat.

2.2.2. Výplň

Nejdůležitější komponentou chladicí věže je bezesporu výplň. Jejím hlavním úkolem je poskytnout maximální možnou kontaktní plochu a maximální možný kontaktní čas mezi vzduchem a vodou, což ovlivňuje efektivitu chlazení, jelikož se právě zde odehrává většina procesu chlazení. Zároveň však musí být výplň uzpůsobena tak, aby představovala co možná nejmenší odpor vzduchu proudícímu se spodu věže. Tato důležitost a zároveň komplikovanost komponenty, jak uvádí [5], vedla k tomu, že bylo vyvinuto rozličné množství typů výplní, z nichž každá je uzpůsobena tak, aby co možná

nejlépe odpovídala technickým a konstrukčním požadavkům jednotlivých výrobců chladících věží a systémů.

V [1] i [4] se můžeme dočíst, existují dva základní typy výplně. Prvním z nich je výplň typu splash (Obrázek 5), která je tvořena horizontálně uloženými tyčemi v několika řadách nad sebou. Při kontaktu vody s tyčí dojde k rozstříknutí kapky vody na menší, které následně kaskádovitě prostupují přes výplň do spodní části věže a následně až do bazénu. Tento typ výplně je charakteristický tím, že u něj dochází k menším tlakovým ztrátám a také není náchylný k ucpání. Dříve k tomuto účelu byly hojně využívány děrované dřevěné latě, avšak v dnešní době jsou tyto výplně vyráběny z plastů a příležitostně také z nerezových ocelí nebo z hliníku.



Obrázek 5: Výplň typu splash (převzato z [3])

U protiproudých chladicích věží je téměř výhradně využíváno výplně filmového typu (Obrázek 6). Tato výplň způsobí, že se dopadající voda rozprostře do tenkého filmu, který následně vertikálně stéká. Výplň typu film je tvořena velmi tenkými (přibližně 0,5 mm) tvarovanými plastovými fóliemi, jež jsou s malými rozestupy montovány k sobě a v podobě bloků umístěny do prostoru věže. Stejnomořné rozmístění je důležité vzhledem k snaze vzduchu proudit cestou nejmenšího odporu.



Obrázek 6: Výplň filmového typu (převzato z [4])

Tato výplň je schopná poskytnout větší chladicí výkon na menším prostoru, než je tomu u výplně typu splash. Na druhou stranu je silně ovlivněna špatnou a nerovnoměrnou distribucí vody a také případnými turbulencemi, které mohou při špatné konstrukci

podpor věže vznikat. Vzhledem k malým vzdálenostem mezi jednotlivými fóliemi výplně je podobně jako u trysek také důležité, aby použitá voda neobsahovala větší částice, který by se v meziprostorech výplně mohly zaseknout nebo je mechanicky poškodit.

2.2.3. Eliminátory

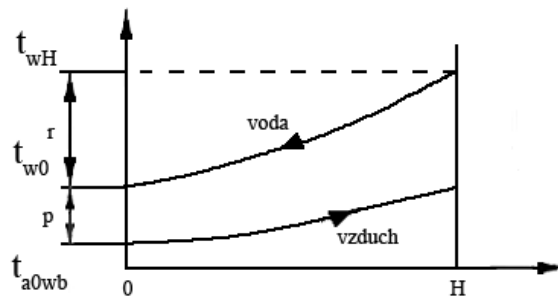
Dalším důležitým prvkem „vnitřku“ chladicí věže jsou eliminátory, které jsou umístěny v horní části věže. V důsledku kontaktu vody a vzduchu ve výplni se stává, že dojde k zachycení drobných kapek vody v proudu vody. Eliminátory mají za úkol tyto kapky zachytávat, aby nedocházelo k nežádoucí ztrátě vody z oběhu a k jejímu následnému spádu v okolí věže.

Tohoto efektu je dosaženo náhlými změnami směru proudění. Následné odstředivé síly způsobí oddělení kapek vody od vzduchu a jejich zachycení na povrchu eliminátoru, odkud následně kapky padají zpět do věže. Stejně jako u výplně je u eliminátorů důležité, aby při průchodu vzduchu jejich strukturou nedocházelo k nadměrným tlakovým ztrátám.

2.3. Účinnost chladicí věže

Jak jsem již uvedl, většina procesu chlazení se odehrává ve výplni. [10] nám říká, že efektivita tohoto chladicího procesu se dá vypočítat pomocí tří parametrů, respektive teplot. Jsou jimi teplota vody na vstupu do výplně t_{wH} , teplota vody na výstupu z výplně t_{w0} a teplota mokrého teploměru vzduchu na výstupu t_{a0wb} .

Při protiproudé konfiguraci věže a výplně o výšce H můžeme hodnoty vyobrazit následovně:



Obrázek 7: Vztah mezi teplotou vody a vzduchu

Rozdíl teplot vody na vstupu a na výstupu je označen jako rozsah $r = t_{wH} - t_{w0}$ a rozdíl teplot vzduchu označujeme jako přiblížení $p = t_{w0} - t_{a0wb}$. Samotná účinnost je dána poměrem rozsahu chlazení vody r a přiblížením p

$$\eta = \frac{r}{r + p} = \frac{t_{wH} - t_{w0}}{t_{wH} - t_{a0wb}} \quad (2.3.1)$$

3. Rovnice přestupu tepla a hmoty

3.1. Lewisův faktor

Než se pustíme do samotného popisu řešení přestupu tepla a hmoty v chladicí věži s přirozeným tahem, bylo by vhodné se nejdříve seznámit s pomocí [8] s Lewisovým faktorem Le_f , jenž se kromě rovnic popisujících přestup tepla a hmoty vyskytuje i například v Merkelově modelu přestupu tepla a hmoty, který bude předmětem další kapitoly.

Dále se setkáváme také s Lewisovým podobnostním číslem značeným Le , jenž je definováno při procesech, u kterých dochází k současnému přestupu tepla a hmoty. Odvození a význam Lewisova čísla je vysvětlen jeho analogií k odvozením jiných dvou podobnostních čísel – Prandtlova Pr a Schmidtova Sc . Základem tohoto odvození, jak je uvedeno v [8] jsou tři fyzikální zákony

Newtonův zákon viskozity popisující vztah mezi napětím a rychlostí deformace,

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{\partial u}{\partial x} = \nu \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \quad (3.1.1)$$

Fouriérův zákon popisující vedení tepla,

$$q = \frac{Q}{A} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = -a \frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial x} \quad (3.1.2)$$

a První Fickův zákon popisující difuzi

$$J = \frac{\dot{m}}{A} = -D \frac{\partial c_i}{\partial x} \quad (3.1.3)$$

Difuzivity ν , α a D v rovnicích (3.1.1), (3.1.2) a (3.1.3) mají rozměr $[L^2/T]$, kde L a T reprezentují délku respektive čas. Jakýmkoliv poměrem těchto koeficientů tedy dostáváme bezrozměrnou jednotku.

Jak Kloppers s Krögerem v [8] uvádějí, v systémech se stálou konvekcí tepla a přenosem hybnosti využíváme Prandtlova podobnostního čísla definovaného jako poměr ν a a

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{c_p \eta}{\lambda} \quad (3.1.4)$$

v systémech se současným přenosem hybnosti a hmoty je Schmidtovo číslo definováno jako poměr ν a D

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (3.1.5)$$

a konečně v procesech se stálou konvekcí tepla a s přenosem hybnosti definujeme Lewisovo podobnostní číslo jako poměr a a D

$$Le = \frac{a}{D} = \frac{\lambda}{\rho c_p D} = \frac{Sc}{Pr} \quad (3.1.6)$$

Lewisův faktor je definován jako indikátor relativních poměrů přenosu tepla a hmoty v procesu vypařování. Je tedy roven poměru Stantonova podobnostního čísla St popisující vedení tepla a Stantonova podobnostního čísla St_m , které popisuje přenos hmoty

$$St = \frac{Nu}{RePr} = \frac{\alpha}{\rho u c_p} \quad (3.1.7)$$

$$St_m = \frac{Sh}{ReSc} = \frac{\beta}{\rho u} \quad (3.1.8)$$

$$Le_f = \frac{St}{St_m} = \frac{\alpha}{\rho u c_p} \frac{\rho u}{\beta} = \frac{\alpha}{c_p \beta} \quad (3.1.9)$$

[8] uvádí, že z analogie podobnostních čísel následně dostáváme vztah mezi Lewisovým faktorem a Lewisovým číslem

$$St = C Re^{-1/2} Pr^{-2/3} = \frac{\alpha}{\rho u c_p} \quad (3.1.10)$$

$$St_m = C Re^{-1/2} Sc^{-2/3} = \frac{\beta}{\rho u} \quad (3.1.11)$$

$$Le_f = \frac{St}{St_m} = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{-2/3} = Le^{2/3} \quad (3.1.12)$$

Tento vztah však závisí na směsi plynu a páry a není tedy konstantní. Bosjankovič ve své práci (dle [8]) proto zavedl opravný faktor $F(\xi)$ zohledňující rozdíl měrných vlhkostí.

$$Le_f = Le^{2/3} \frac{1}{F(\xi)} \quad (3.1.13)$$

kde

$$F(\xi) = \frac{\ln \xi}{\xi - 1} \quad (3.1.14)$$

$$\xi = \frac{x_{sw} + d}{x + d} \quad (3.1.15)$$

$$d = \frac{M_w}{M_a} = \frac{18,02}{28,96} \doteq 0,622 \quad (3.1.16)$$

Následně pak Poppe a Rögener předpokládali (dle [8]), že Lewisovo číslo nabývá hodnoty 0,865 čímž dostáváme výsledný vztah pro výpočet Lewisova faktoru

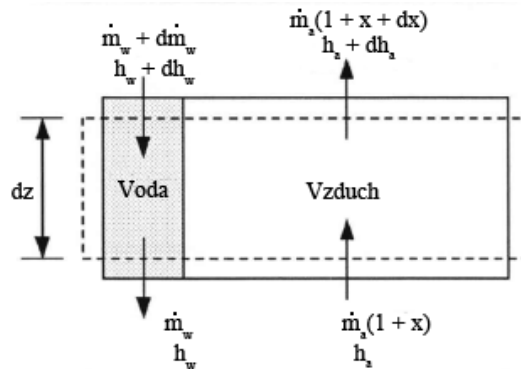
$$Le_f = 0,865^{2/3} \frac{\frac{x_w'' + 0,622}{x + 0,622} - 1}{\ln \frac{x_w'' + 0,622}{x + 0,622}} \quad (3.1.17)$$

Kloppers a Kröger ve své práci [8] uvádějí, že Lewisův faktor běžně nabývá hodnot mezi 0,5 až 1,3.

3.2. Výpočet výplně chladicí věže

Celou problematiku přestupu tepla a hmoty ve výplni chladicí věže s protiproudým tahem si můžeme s pomocí [9] a [12] vhodně popsat budeme-li uvažovat elementární kontrolní objem zahrnující dvě hlavní oblasti – vodní film, který vzniká rozstříknutím vody a jejím

následným spádem na výplň, a oblast proudícího vzduchu smíšeného s vodní parou. Na rozhraní těchto dvou prostředí dochází k difuzi vodních par do proudícího vzduchu čímž dochází i k výměně tepla a hmoty mezi těmito prostředími.



Obrázek 8: Kontrolní objem výplně chladičí věže (převzato z [12] a upraveno)

Jak můžeme vidět na Obrázku 8, při řešení problému přestupu tepla a hmoty se setkáme s několika důležitými veličinami. Čtyři z nich – teplota vody t_w , teplota vzduchu t_a , vlhkost vzduchu x a hmotnostní průtok vody \dot{m}_w – jsou závislé proměnné pro jejichž řešení budeme muset sestavit soustavu čtyř rovnic. Pátá proměnná z je nezávislá a představuje vertikální polohu ve výplni, tedy prostorovou souřadnici.

Dále je důležité si uvědomit, že popis systému závisí na nasycenosti vzduchu a musíme tedy uvažovat dva různé případy, kdy se jedná o vzduch buď nenasyčený nebo přesycený.

3.2.1. Rovnice pro nenasyčený vzduch

Porovnáním veličin vstupujících a vystupujících z kontrolního objemu získáváme následující dva výchozí vztahy popisující bilanci hmoty a tepla na dostatečně malém výřezu d_z :

$$\frac{d\dot{m}_w}{dz} = \dot{m}_a \frac{dx}{dz} \quad (3.2.1.1)$$

$$\dot{m}_a \frac{dh_a}{dz} = c_{pw} t_w \frac{d\dot{m}_w}{dz} + c_{pw} \dot{m}_w \frac{dt_w}{dz} \quad (3.2.1.2)$$

Člen h_a představuje entalpii. Tato veličina je s teplotou spojena měrnou tepelnou kapacitou pomocí obecného vztahu

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_p dt = c_p dt \quad (3.2.1.3)$$

Konkrétně v našem případě můžeme dle [9] entalpii vlhkého vzduchu vyjádřit jako

$$h_{x+1} = c_{pa} t_a + x(l_0 + c_{pv} t_a) \quad (3.2.1.4)$$

kde c_{pa} zastupuje měrnou entalpii suchého vzduchu a l_0 měrné skupenské teplo.

Dále si za pomoci přenosové plochy na jednotku objemu a a plochy řezu výplně kolmé k vertikální souřadnici A_z přesněji určíme element plochy dA

$$dA = a_{fi}A_{fr}dz \quad (3.2.1.5)$$

Tento vztah je v [9] následně dosazen do kinetické rovnice výparu hmoty

$$d\dot{m}_w = \beta(x''(t_w) - x)dA = \beta(x''(t_w) - s)a_{fi}A_{fr}dz \quad (3.2.1.6)$$

jejíž úpravou získáváme výsledný vztah

$$\frac{d\dot{m}_w}{dz} = \beta(x''(t_w) - x)a_{fi}A_{fr} \quad (3.2.1.7)$$

kde β je koeficient přenosu hmoty a x'' představuje měrnou vlhkost nasyceného vzduchu na rozhraní prostředí voda-vzduch, který je dle [7] definován jako poměr hmotnosti vodní páry m_s a hmotnosti suchého vzduchu m_a

$$x'' = \frac{m_s}{m_a} = \frac{r_a p_s}{r_s p_a} = 0,622 \frac{p_s(t_a)}{p - p_s(t_a)} \quad (3.2.1.8)$$

Nyní je zapotřebí podívat se na problematiku přenosu energie, přesněji na sdílené teplo. [9] zde vychází z Newtonova ochlazovacího zákona, jenž nám říká, že elementární tepelný tok $d\dot{Q}$, který přestoupí ze stěny do tekutiny je dán empirickým vztahem

$$d\dot{Q} = \alpha(t_w - t_a)dA = \alpha(t_w - t_a)a_{fi}A_{fr} \quad (3.2.1.9)$$

Zároveň můžeme říct, že sdílené teplo je rovno přírůstku entalpie vzduchu

$$d\dot{Q} = \dot{m}_a dh_{x+1} \quad (3.2.1.10)$$

Vypeřením vody a vedením tepla do vzduchu je docíleno zvýšení entalpie vzduchu. Rovnice sdíleného tepla podle [9] vypadá následovně

$$\dot{m}_a dh_{x+1} = \alpha(t_w - t_a)a_{fi}A_{fr}dz + (l_0 + c_{pv}(t_w)t_w)d\dot{m}_w \quad (3.2.1.11)$$

Úpravou rovnice (3.2.1.11) do diferenciální podoby a dosazením vztahu (3.2.1.7) získáváme k (3.2.1.1), (3.2.1.2) a (3.2.1.7) poslední potřebnou diferenciální rovnici

$$\dot{m}_a \frac{dh_{x+1}}{dz} = [(l_0 + c_{pv}(t_w)t_w)\beta(x''(t_w) - x) + \alpha(t_w - t_a)]a_{fi}A_{fr} \quad (3.2.1.12)$$

Posledním krokem je upravit předcházející rovnice podoby čtyř diferenciálních rovnic vzájemně spojující čtyři závislé proměnné ve tvaru

$$\begin{aligned} \frac{dt_w}{dz} &= f_1(t_w, t_a, x, \dot{m}_w) \\ \frac{dt_a}{dz} &= f_1(t_w, t_a, x, \dot{m}_w) \\ \frac{dx}{dz} &= f_1(t_w, t_a, x, \dot{m}_w) \\ \frac{d\dot{m}_w}{dz} &= f_1(t_w, t_a, x, \dot{m}_w) \end{aligned} \quad (3.2.1.13)$$

Měrné tepelné kapacity c_{pa} , c_{pv} , c_{pw} a měrná entalpie vypařování vody při 0 °C h_0 jsou dobře známé veličiny, zatímco pro získání koeficientu přestupu tepla α a hmoty β využijeme Lewisova faktoru Le_f , jenž dle [9] pro případ nenasyceného vzduchu nabývá tvaru

$$Le_f = \frac{\alpha}{\beta(c_{pa} + xc_{pv})} \quad (3.2.1.14)$$

Pro sestavení první diferenciální rovnice popisující teplotu vody t_w dosadíme rovnice (3.2.1.12) a (3.2.1.7) do vztahu (3.2.1.2) a následným dosazením α vyjádřeným z Lewisova faktoru (3.2.1.14) získáváme rovnici

$$\begin{aligned} & [(l_0 + c_{pv}(t_w)t_w)\beta(x''(t_w) - x) \\ & + Le_f\beta(c_{pa}(t_a) + xc_{pv}(t_a))(t_w - t_a)]a_{fi}A_{fr} \\ & = c_{pw}(t_w)t_w\beta(x''(t_w) - x)a_{fi}A_{fr} + c_{pw}(t_w)\dot{m}_w \frac{dt_w}{dz} \end{aligned} \quad (3.2.1.15)$$

která upravená do konečné podoby vypadá následovně

$$\begin{aligned} \frac{dt_w}{dz} = & \beta a_{fi} A_{fr} [(l_0 + c_{pv}(t_w)t_w - c_{pw}(t_w)t_w)(x''(t_w) - x) \\ & + Le_f(t_w - t_a)(c_{pa}(t_a) + xc_{pv}(t_a))] / c_{pw}(t_w)\dot{m}_w \end{aligned} \quad (3.2.1.16)$$

Pro další diferenciální rovnici popisující teplotu vzduchu t_a budeme potřebovat rovnici pro vlhkost vzduchu $\frac{dx}{dz}$. Tu získáváme v [9] tak, dosadíme-li vztah (3.2.1.7) do (3.2.1.1)

$$\frac{dx}{dz} = \frac{\beta(x''(t_w) - x)a_{fi}A_{fr}}{\dot{m}_a} \quad (3.2.1.17)$$

Rovnici pro teplotu vzduchu t_a získáme tak, převedeme-li podle [9] vztah pro entalpii vlhkého vzduchu (3.2.1.4.) do diferenciální podoby a jeho následným porovnáním se změnou entalpie v rovnici (3.2.1.12)

$$\begin{aligned} \dot{m}_a \left[(c_{pa}(t_a) + xc_{pv}(t_a)) \frac{dt_a}{dz} + (l_0 + c_{pv}(t_a)t_a) \frac{dx}{dz} \right] \\ = [(l_0 + c_{pv}(t_w)t_w)\beta(x''(t_w) - x) + \alpha(t_w - t_a)]a_{fi}A_{fr} \end{aligned} \quad (3.2.1.18)$$

do které dosadíme (3.2.1.17) a opět s pomocí Lewisova faktoru (3.2.1.14) ji upravíme

$$\begin{aligned} \frac{dt_a}{dz} = & \beta a_{fi} A_{fr} [(x''(t_w) - x)(c_{pv}(t_w)t_w - c_{pv}(t_a)t_a) \\ & + Le_f(c_{pa}(t_a) + xc_{pv}(t_a))(t_w - t_a)] / [\dot{m}_a(c_{pa}(t_a) + xc_{pv}(t_a))] \end{aligned} \quad (3.2.1.19)$$

Nyní již máme k dispozici všechny čtyři potřebné diferenciální rovnice pro popis přestupu tepla a hmoty při uvažování stavu s nenasyceným vzduchem. Jsou jimi rovnice (3.2.1.7), (3.2.1.16), (3.2.1.17) a (3.2.1.19).

3.2.2. Rovnice pro přesycený vzduch

Druhým případem, který potřebujeme vyšetřit, je stav, kdy je vzduch proudící v chladičí věži přesycený. Jedná se o směs, v níž se kromě suchého vzduchu a syté vodní páry vyskytuje kondenzovaná voda ve formě kapiček mlhy. I v tomto stavu se voda při kontaktu s přesyceným vzduchem odpařuje a nadále ochlazuje.

Jak uvádí [9], důvodem je rozdíl koncentrací vodní páry na rozhraní s vodou a v objemu vzduchu ($x''(t_w) - x''(t_a)$). Člen $x''(t_w)$ označuje vlhkost nasyceného vzduchu při teplotě vody a člen $x''(t_a)$ vlhkost nasyceného vzduchu při teplotě okolního vzduchu v objemu. K samotnému výparu vody, a tedy i k jejímu ochlazení, bude docházet až do doby, kdy teplota vody t_w nedosáhne hodnoty stejné nebo vyšší než teplota objemu vzduchu t_a .

První tři rovnice, které si uvedeme – rovnice přenosu hmoty, rovnice bilance energie a vztah pro vlhkost vzduchu – jak zjistíme v [9], mají stejný tvar jako při uvažování vzduchu v nenasyčeném stavu. Musíme v nich však upravit měrné vlhkosti, případně upravit způsob indexace tak, aby odpovídaly našemu problému.

$$\frac{d\dot{m}_w}{dz} = \beta(x''(t_w) - x''(t_a))a_{fi}A_{fr} \quad (3.2.2.1)$$

$$\dot{m}_a \frac{dh_{x+1}}{dz} = c_{pw}(t_w)t_w \frac{d\dot{m}_w}{dz} + c_{pw}(t_w)\dot{m}_w \frac{dt_w}{dz} \quad (3.2.2.2)$$

$$\frac{dx}{dz} = \frac{\beta(x''(t_w) - x''(t_a))a_{fi}A_{fr}}{\dot{m}_a} \quad (3.2.2.3)$$

Přičtením jednoho členu k rovnici popisující entalpii nenasyčeného vzduchu (3.2.1.4) a úpravou jako v případě rovnic (3.2.2.1) a (3.2.2.2) získává [9] vztah pro entalpii přesyceného vzduchu ve tvaru

$$h_a = c_{pa}(t_a)t_a + x''(t_a)(c_{pv}(t_a)t_a + l_0) + (x - x''(t_a))c_{pw}(t_a)t_a \quad (3.2.2.4)$$

Jak můžeme vidět v (3.2.1.8), vlhkost přesyceného vzduchu je funkcí teploty vzduchu, a proto můžeme dle [9] napsat následující rovnice

$$\frac{dx''(t_a)}{dz} = \frac{dx''(t_a)}{dt_a} \frac{dt_a}{dz} \quad (3.2.2.5)$$

$$\frac{dx''(t_a)}{dt_a} = 0,622 \frac{p}{(p - p_s)^2} \frac{dp_s}{dt_a} \quad (3.2.2.6)$$

Vztah (3.2.2.4) využijeme k tomu, že pomocí něj upravíme derivovanou rovnici entalpie přesyceného vzduchu (3.2.2.3) do tvaru

$$\begin{aligned} \frac{dh_{x+1}}{dz} = & \left[(l_0 + c_{pv}(t_a)t_a - c_{pw}(t_a)t_a) \frac{dx''(t_a)}{dz} + x''(t_a)(c_{pv}(t_a) \right. \\ & \left. - c_{pw}(t_a)) + c_{pa}(t_a) + xc_{pw}(t_a) \right] \frac{dt_a}{dz} + c_{pw}(t_a)t_a \frac{dx}{dz} \end{aligned} \quad (3.2.2.7)$$

Podobně jako v kapitole 3.2.1 získáme rovnici pro teplotu vody t_w kombinací tří rovnic, v tomto případě dosazením vztahů (3.2.2.1) a (3.2.2.7) do (3.2.2.2) a získáme

$$\begin{aligned} \frac{dt_w}{dz} = & \{a_{fi}A_z[(l_0 + c_{pv}(t_w)t_w - c_{pw}(t_w)t_w)\beta(x''(t_w) - x''(t_a)) \\ & + \alpha(t_w - t_a)]\} / \dot{m}_w c_{pw}(t_w) \end{aligned} \quad (3.2.2.8)$$

Do této rovnice opět dosadíme α vyjádřené z Lewisova faktoru, jenž pro případ přesyceného vzduchu nabývá podoby

$$Le_f = \frac{\alpha}{\beta [c_{pa}(t_a) + x''(t_a)c_{pv}(t_a) + c_{pw}(t_a)(x - x''(t_a))]} \quad (3.2.2.9)$$

a dostáváme výslednou diferenciální rovnici pro teplotu vody t_w dle [9] ve tvaru

$$\begin{aligned} \frac{dt_w}{dz} = & \{ \beta a_{fi} A_{fr} [(l_0 + c_{pv}(t_w)t_w - c_{pw}(t_w)t_w)(x''(t_w) - x''(t_a)) \\ & + Le_f(t_w - t_a)(c_{pa}(t_a) + c_{pw}(t_a)(x - x''(t_a)) \\ & + x''(t_a)c_{pv}(t_a))] \} / \dot{m}_w c_{pw}(t_w) \end{aligned} \quad (3.2.2.10)$$

Nyní zderivujeme již použitý vztah (3.2.1.11) a dosadíme do něj (3.2.2.1)

$$\dot{m}_a \frac{dh_a}{dz} = [(l_0 + c_{pv}(t_w)t_w)\beta(x''(t_w) - x''(t_a)) + \alpha(t_w - t_a)] a_{fi} A_{fr} \quad (3.2.2.11)$$

Kombinací tohoto vztahu s rovnicemi (3.2.2.3) a (3.2.2.7) získáváme poslední potřebnou diferenciální rovnici, konkrétně popisující teplotu vzduchu t_a , kterou pomocí Lewisova faktoru a [9] upravíme do finální podoby

$$\begin{aligned} \frac{dt_a}{dz} = & - \left(\beta a_{fi} A_{fr} [c_{pa}(t_a)Le_f(t_a - t_w) - x''(t_w)(l_0 + c_{pv}(t_w)t_w) \right. \\ & + c_{pw}(t_w) (Le_f(t_a - t_w)(x - x''(t_a)) \\ & + t_a(x''(t_w) - x''(t_a))) + x''(t_a)(l_0 + c_{pv}(t_a)Le_f(t_a - t_w) \\ & \left. + c_{pv}(t_w)t_w] \right) \\ & / \dot{m}_a \left[(l_0 + c_{pv}(t_a)t_a - c_{pw}(t_a)t_a) \frac{dx''(t_a)}{dz} \right. \\ & \left. + x''(t_a)(c_{pv}(t_a) - c_{pw}(t_a)) + c_{pa}(t_a) + xc_{pw}(t_a) \right] \end{aligned} \quad (3.2.2.12)$$

Získané rovnice (3.2.2.1), (3.2.2.3), (3.2.2.10) a (3.2.2.13) tvoří soustavu čtyř diferenciálních rovnic pro čtyři neznámé pro stav, kdy uvažujeme přesycený vzduch.

4. Merkelův model

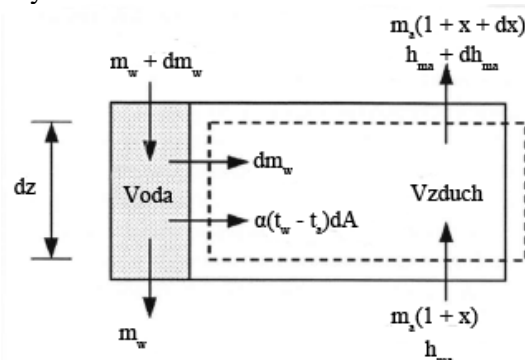
4.1. Merkelovo číslo

Před samotným řešením diferenciálních rovnic je nutné zjistit hodnotu alespoň jednoho z koeficientů přestupu tepla α a přenosu hmoty β . Dle Klimanka a Bialeckého [9] je jediným způsobem, jak tyto hodnoty zjistit, experiment. Vhodným způsobem, jak tyto koeficienty z experimentálních měření získat, je využití Merkelova čísla.

Zároveň můžeme říct, že řešení této soustavy čtyř obyčejných diferenciálních rovnic pro čtyři neznámé je namáhavé a časově náročné. Proto si při popisu Merkelova modelu za použití tří předpokladů [12] a za pomoci prací [11] a [13] ukážeme zjednodušený model přestupu tepla a hmoty, jenž je ale pro řešení problematiky této práce naprosto dostačující. Jedná se o následující předpoklady:

1. Vzduch opouštějící chladicí věž je nasycený a je charakterizován pouze jeho entalpií
2. Změna hmotnostního toku vody z důvodu vypařování je u bilance energie zanedbána
3. Lewisův faktor Le_f je roven 1

Stejně jako při popisu přestupu tepla a hmoty dle Klimanka a Bialeckého [9], i zde vycházíme z Obrázku 11 pro kontrolní objem. Ten ještě doplníme o Obrázek 9 znázorňující přestup hmoty a tepla z vody do okolního vzduchu



Obrázek 9: Kontrolní objem výplně chladicí věže (převzato z [12] a upraveno)

Z porovnání vstupu a výstupu do kontrolního objemu výplně na Obrázku 11 získáme rovnici pro bilanci hmoty

$$d\dot{m}_w = \dot{m}_a dx \quad (4.1.1)$$

Změna hmotnostního toku vody může být vyjádřena pomocí následujícího vztahu

$$d\dot{m}_w = \beta(x''(t_w) - x)dA \quad (4.1.2)$$

kde člen x'' představuje měrnou vlhkost vlhkého vzduchu na mezi sytosti při teplotě t_w .

Pro bilanci energie můžeme psát

$$\dot{m}_a dh_{1+x} = \dot{m}_w dh_w + h_w d\dot{m}_w \quad (4.1.3)$$

kde h_{1+x} udává entalpii směsi vzduchu a vodní páry. Entalpii vody označujeme h_w .

Tuto rovnici můžeme za použití druhého předpokladu zjednodušit na tvar

$$dh_{1+x} = \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} dh_w \quad (4.1.4)$$

Za pomoci Obrázku 9 můžeme vyjádřit i změnu celkové entalpie podobně jako u rovnice (4.3)

$$\dot{m}_a dh_{1+x} = \alpha(t_w - t_a) dA + h_v(t_w) d\dot{m}_w \quad (4.1.5)$$

kde člen $h_v(t_w)$ představuje entalpii vodní páry.

Dosazením rovnice (4.3) do (4.5) získáváme vztah

$$\dot{m}_a dh_{1+x} = \alpha(t_w - t_a) dA + h_v(t_w) \beta (x''(t_w) - x) dA \quad (4.1.6)$$

Entalpii nenasyčeného vlhkého vzduchu můžeme dle [7] vyjádřit jako

$$h_{1+x} = (c_{pa} + xc_{pv})t_a + xl_0 \quad (4.1.7)$$

respektive po roznásobení a následné úpravě

$$h_{1+x} = c_{pa}t_a + x(l_0 + c_{pv}t_a) \quad (4.1.8)$$

l_0 představuje výparné teplo vody.

[13] udává entalpii nasyceného vlhkého vzduchu jako

$$h''_{1+x}(t_w) = c_{pa}t_w + xh_v(t_w) + (x''(t_w) - x)h_v(t_w) \quad (4.1.9)$$

Odečtením rovnice (4.7) od (4.9) a zanedbáním rozdílných hodnot tepelných kapacit vyjádřených při různých teplotách dostáváme vztah pro rozdíl teplot

$$t_w - t_a = \frac{h''_{1+x}(t_w) - h_{1+x} - (x''(t_w) - x)h_v(t_w)}{c_{pa} + xc_{pv}} \quad (4.1.10)$$

Dosazením (4.1.10) do rovnice (4.1.6) a za použití vztahu pro Lewisův faktor (3.1.9) získáváme vztah, jenž po úpravě vypadá následovně

$$\frac{dh_{1+x}}{dA} = \frac{\beta}{\dot{m}_a} [Le_f(h''_{1+x}(t_w) - h_{1+x}) + (1 - Le_f)(x''(t_w) - x)h_v(t_w)] \quad (4.1.11)$$

Aplikujeme-li na tento vztah třetí předpoklad, tedy že $Le_f = 1$, získáváme

$$\frac{dh_{1+x}}{dA} = \frac{\beta}{\dot{m}_a} (h''_{1+x}(t_w) - h_{1+x}) \quad (4.1.12)$$

Rovnici (4.5) můžeme ještě pomocí (3.2.1.3) upravit do podoby

$$\frac{dh_{1+x}}{dA} = c_{pw} \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} \frac{dt_w}{dA} \quad (4.1.13)$$

Konečně, kombinací vztahů (4.13) a (4.14) získáváme rovnici pro výpočet Merkelova čísla

$$Me = \int_0^A \frac{\beta}{\dot{m}_a} dA = \int_{t_{wo}}^{t_{wi}} \frac{c_{pw} dt_w}{(h''_{1+x}(t_w) - h_{1+x})} \quad (4.1.14)$$

kde hodnoty t_{wi} a t_{wo} udávají teplotu vody na vstupu, respektive na výstupu.

4.2. Aproximace Merkelova integrálu

Hodnotu Merkelova čísla můžeme spočítat pomocí rovnice (4.1.14)

$$Me = \int_{t_{wo}}^{t_{wi}} \frac{c_{pw} dt_w}{(h''_{1+x}(t_w) - h_{1+x})}$$

$$= \frac{c_{pwm}(t_{wi} - t_{wo})}{2} \left[\frac{1}{h''_{1+x}(t_{wi}) - h_{1+x}(t_{wi})} + \frac{1}{h''_{1+x}(t_{wo}) - h_{1+x}(t_{wo})} \right]$$

Měrná tepelná kapacita c_{pwm} je vypočtena pro teplotu $\frac{t_{wi} + t_{wo}}{2}$.

Jak však Kröger v [5] uvádí – jedná se pouze o přibližnou hodnotu a uvádí, že při použití numerické integrační metody můžeme získat přesnější aproximaci Merkelova integrálu. Jednou z v praxi nejvyužívanějších integračních metod je Chebyshevova metoda, jež dle [5] vychází z rovnice

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{(b-a)}{4} [f(x_1) + f(x_2) + f(x_3) + f(x_4)] \quad (4.2.1)$$

kde je zapotřebí hodnoty $f(k)$ vyčíslit pro hodnoty k , jež jsou rovny 0.102673, 0.406204, 0.593769 a 0.897327, v intervalu $(b-a)$.

Aplikací (4.2.1) na Merkelův integrál (4.1.14) získáváme

$$Me = \int_{t_{wo}}^{t_{wi}} \frac{c_{pw} dt_w}{(h''_{1+x}(t_w) - h_{1+x})}$$

$$= \frac{c_{pwm}(t_{wi} - t_{wo})}{4} \left[\frac{1}{\Delta h_1} + \frac{1}{\Delta h_2} + \frac{1}{\Delta h_3} + \frac{1}{\Delta h_4} \right] \quad (4.2.2)$$

Hodnoty entalpií závisí na teplotách vypočtených pomocí daných hodnot k

$$t_{w(1)} = t_{wo} + 0.102673(t_{wi} - t_{wo})$$

$$t_{w(2)} = t_{wo} + 0.406204(t_{wi} - t_{wo})$$

$$t_{w(3)} = t_{wo} + 0.593769(t_{wi} - t_{wo})$$

$$t_{w(4)} = t_{wo} + 0.897327(t_{wi} - t_{wo})$$

Následný rozdíl entalpií můžeme spočítat jako

$$\Delta h_{(k)} = h''_{1+x}(t_{w(k)}) - h_{(1+x)(k)} \quad (4.2.3)$$

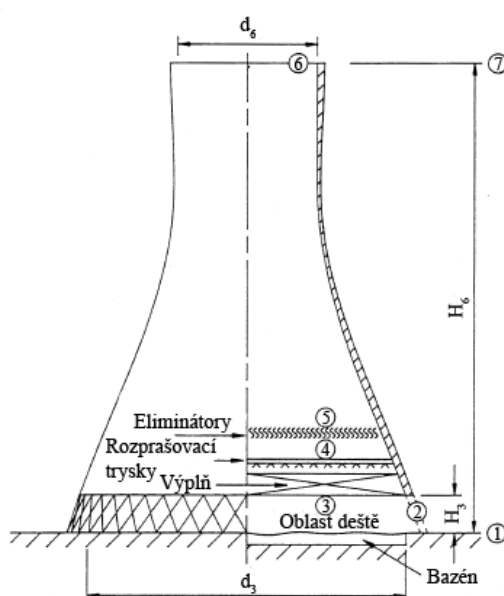
5. Rovnice tahu a ztráty při proudění

5.1. Rovnice tahu

V literatuře se objevuje velké množství různých přístupů, jak popsat charakteristiky chladicí věže. Jak ve své práci [14] uvádí Kloppers, jeden z nejjednodušších tvarů rovnice tahu věže s přirozeným tahem je

$$\Delta p_o - \Delta p_i = \rho \frac{v^2}{2} \Sigma K \quad (5.1.1)$$

Jak je v [14] uvedeno, rovnice (5.1.1) může být rozepsána a upravena do podoby zahrnující vliv jednotlivých komponent chladicí věže je jejich umístění. Číselná indexace v tomto vztahu vychází z Obrázku 10:



Obrázek 10: Schéma chladicí věže s přirozeným tahem (převzato z [15] a upraveno)

Tato upravená rovnice tahu podle Klopperse vypadá následovně

$$\begin{aligned} & (p_{a1} - p_{a7}) - (p_{a1} - p_{a34}) - (p_{a34} - p_{a6}) - (p_{a6} - p_{a7}) \\ & = (K_{tsfi} + K_{ctfi} + K_{rzfi} + K_{fsfi} + K_{ctcfi} + K_{ffi} + K_{ctefi} \\ & + K_{spfi} + K_{wdfi} + K_{defi}) \frac{\left(\frac{\dot{m}_{av15}}{A_{fr}}\right)^2}{2\rho_{av15}} + a_{e6} \frac{\left(\frac{\dot{m}_{av6}}{A_6}\right)^2}{2\rho_{av6}} \end{aligned} \quad (5.1.2)$$

Členy na levé straně rovnice představují rozdíly tlaků mezi jednotlivými pozicemi v chladicí věži. Rovnici pro rozdíl $(p_{a1} - p_{a7})$ získáme dle Krögera [15] dosazením dvou rovnic

$$T_a = T_{a1} - 0.00975z \quad (5.1.3)$$

$$\rho_{av} \approx 0.622 \frac{(x+1) p_a}{(x+0.622) RT_a} \quad (5.1.4)$$

kde z představuje polohu od země (pozice 1) a $R = 287.08 \text{ J/kgK}$, do vztahu

$$dp_a = -\rho_{av} g dz \quad (5.1.5)$$

který po integraci a úpravě za předpokladu konstantní měrné vlhkosti x dává výsledný rozdíl tlaků

$$(p_{a1} - p_{a7}) = p_{a1} \left[1 - \left(1 - 0.00975 \frac{H_6}{T_{a1}} \right)^{3.5(1+x_1)(1-\frac{x_1}{x_1+0.622})} \right] \quad (5.1.6)$$

Obdobně můžeme vyjádřit i rozdíl tlaků ($p_{a1} - p_{a34}$) pro střední polohu výplně

$$(p_{a1} - p_{a34}) = p_{a1} \left[1 - \left(1 - 0.00975 \frac{H_3 + \frac{L_{fi}}{2}}{T_{a1}} \right)^{3.5(1+x_1)(1-\frac{x_1}{x_1+0.622})} \right] \quad (5.1.7)$$

Rozdíl tlaků ($p_{a34} - p_{a6}$) můžeme podle Krögera [15] vypočítat jako

$$(p_{a34} - p_{a6}) \approx p_{a5} \left[1 - \left\{ 1 + \xi_{T_{a5}} \frac{H_6 - H_3 - \frac{L_{fi}}{2}}{T_{a5}} \right\}^{\frac{-0.021233(1+x_5)}{\xi_{T_{a5}}(x_5+0.622)}} \right] \quad (5.1.8)$$

Člen $\xi_{T_{a5}}$ představuje spádový koeficient pseudoadiabatického děje a v [15] je vyjádřen jako

$$\xi_{T_{a5}} = \frac{-(1+x_5)g \left[1 + 0.42216 \cdot 10^{-11} x_5^2 p_{a5} e^{\frac{5406.1915}{T_{a5}}} \frac{h_e}{x_5 + 0.622} \frac{1}{RT_{a5}} \right]}{c_{pma} + 3.6693 \cdot 10^{-8} x_5^2 p_{a5} e^{\frac{5406.1915}{T_{a5}}} \frac{h_e}{T_{a5}^2}} \quad (5.1.9)$$

Zároveň potřebujeme hodnotu tlaku p_{a5} nad eliminátory, která je dána vztahem

$$p_{a5} = p_{a1} \left[1 - 0.00975 \frac{H_3 + \frac{L_{fi}}{2}}{T_{a1}} \right]^{3.5(1+x_1)(1-\frac{x_1}{x_1+0.622})} - (K_{ts} + K_{il} + K_{ct} + K_{rz} + K_{fs} + K_{ctc} + K_{fi} + K_{cte} + K_{sp} + K_{wd} + K_{de})_{fi} \frac{\left(\frac{\dot{m}_{av15}}{A_{fr}} \right)^2}{2\rho_{av15}} \quad (5.1.10)$$

Poslední člen levé strany rovnice (5.1.2) můžeme vypočítat následující rovnicí

$$(p_{a6} - p_{a7}) = \left(0.02 Fr_D^{-1.5} - \frac{0.14}{Fr_D} \right) \frac{\left(\frac{\dot{m}_{av5}}{A_6} \right)^2}{\rho_{av6}} \quad (5.1.11)$$

Fr_D je Froudeho hustotní číslo, jenž můžeme dle [15] spočítat jako

$$Fr_D = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{av5}}{A_6}\right)^2}{\rho_{av6}(\rho_{av7} - \rho_{av6})gd_6} \quad (5.1.12)$$

Po všech těchto úpravách získáváme finální formu rovnice tahu dle Krögera [15]

$$p_{a1} \left[\begin{array}{l} \left\{ 1 - 0.00975 \frac{H_3 + \frac{L_{fi}}{2}}{T_{a1}} \right\}^{3.5(1+x_1)\left(1-\frac{x_1}{x_1+0.622}\right)} \\ \cdot \left\{ 1 + \xi_{T_{a5}} \frac{H_6 - H_3 - \frac{L_{fi}}{2}}{T_{a5}} \right\}^{\frac{-0.021233(1+x_5)}{\xi_{T_{a5}}(x_5+0.622)}} \\ - \left\{ 1 - 0.00975 \frac{H_6}{T_{a1}} \right\}^{3.5(1+x_1)\left(1-\frac{x_1}{x_1+0.622}\right)} \end{array} \right] \\ - \left(0.02Fr_D^{-1.5} - \frac{0.14}{Fr_D} \right) \frac{\left(\frac{\dot{m}_{av5}}{A_6}\right)^2}{\rho_{av6}} \quad (5.1.13) \\ = (K_{ts} + K_{il} + K_{ct} + K_{rz} + K_{fs} + K_{ctc} + K_{fi} + K_{cte} + K_{sp} \\ + K_{wd} \\ + K_{de})_{fi} \frac{\left(\frac{\dot{m}_{av15}}{A_{fr}}\right)^2}{2\rho_{av15}} \left[1 + \xi_{T_{a5}} \frac{H_6 - H_3 - \frac{L_{fi}}{2}}{T_{a5}} \right]^{\frac{-0.021233(1+x_5)}{\xi_{T_{a5}}(x_5+0.622)}} \\ + a_{e6} \frac{\left(\frac{\dot{m}_{av6}}{A_6}\right)^2}{2\rho_{av6}}$$

5.2. Ztráty při proudění ve věži

5.2.1. Ztráty ve výplni

Jelikož se ve výplni odehrává většina přestupu tepla a hmoty, dá se očekávat, že výplň bude mít výrazný vliv i co se ztrát týče. Jak jsem však uvedl, existuje velké množství různých druhů výplní, jejich konstrukcí a materiálů, z nichž jsou zhotoveny.

Vlastnosti jednotlivých výplní se zjišťují experimentálně (samozřejmě s určitou přesností). Kröger v [5] uvádí tabulku 41 experimentálně naměřených výplní, ve které uvádí koeficienty pro výpočet přenosu hmoty a pro tlakové ztráty vztažené na metr výplně. Právě z důvodu určení přesného typu výplně je důležité co nejpřesněji vyčíslit hodnotu Merkelova čísla.

Pro přenos hmoty uvádí Kröger následující vztah

$$\frac{Me}{L_{fi}} = \frac{h_d a_{fi} A_{fr}}{\dot{m}_w} = \frac{h_d a_{fi}}{G_w} = a_d \left(\frac{G_w}{G_a} \right)^{-b_d} \quad (5.2.1.1)$$

kde G_w a G_a představují hustotu hmotnostního toku vody, respektive vzduchu. Tyto hodnoty zjistíme vydělením příslušného hmotnostního toku plochou

$$G_w = \frac{\dot{m}_w}{A_{fr}} \quad (5.2.1.2)$$

$$G_a = \frac{\dot{m}_a}{A_{fr}} \quad (5.2.1.3)$$

Ztrátový koeficient pro výplň je definován následovně

$$K_{fi} = a_p \frac{G_w}{G_a} + b_p \quad (5.2.1.4)$$

Odpovídající hodnoty koeficientů a_d , b_d , a_p a b_p jsou uvedeny v [5].

5.2.2. Ztráty v oblasti deště

Další významnou oblastí je oblast deště. Podle [5] může v této oblasti pod výplní dojít k odvedení 10 až 20 % celkového tepla. Vzhledem k těmto číslům je důležité tuto oblast vhodným způsobem popsat.

Přesný popis pomocí numerických metod by byl velice náročný, proto Kröger [5] uvažuje 6 předpokladů, jenž tuto problematiku zjednoduší. Předpokládáme, že nedochází ke shlukování vodních kapek, že průtok vody výplní je stálý, průměr všech kapek je stejný, kapky vstupují do oblasti deště s nulovou rychlostí, že padající kapky nemají žádný vliv na rozložení rychlosti vzduchu a že se termo-fyzikální vlastnosti kapek v oblasti deště nijak nemění. Poté můžeme psát

$$\begin{aligned} K_{rz} = & 3a_v v_{w3} \frac{H_3}{d_d} \left[0.2246 - 0.31467 a_p \rho_{av1} + 5263.04 a_\eta \eta_{av1} \right. \\ & + 0.775526 \{ 1.4824163 e^{71.52 a_L d_d} - 0.91 \} \{ 0.39064 e^{0.010912 a_L d_i} \\ & - 0.17 \} \{ 2.08915 (a_v v_{av3})^{-1.3944} + 0.14 \} \\ & \left. \cdot e^{\{ 0.8449 \ln(\frac{a_L d_3}{2}) - 2.312 \} \{ 0.3724 \ln(a_v v_{av3}) + 0.7263 \} \ln 206.757 (a_L H_3)^{-2.8344} + 0.433} \right] \end{aligned} \quad (5.2.2.1)$$

Koeficient K_{rz} vztažený k podmínkám ve výplni spočítáme jako

$$K_{rzfi} \approx K_{rz} \frac{\rho_{av15}}{\rho_{av1}} \left(\frac{\dot{m}_{av1}}{\dot{m}_{av15}} \right)^2 \quad (5.2.2.2)$$

5.2.3. Ztráty na eliminátorech

Poslední „překážkou“ proudění v chladicí věži jsou eliminátory. Podobně jako u výplní, i u eliminátorů se setkáváme s více rozličnými druhy a jejich vlastnosti můžeme zjistit experimentálně.

Pro výpočet ztrátového koeficientu pro eliminátory uvádí Kröger [5] vztah

$$K_{de} = a_{de} R_y^{b_{de}} \quad (5.2.3.1)$$

kde a_{de} a b_{de} představují experimentálně zjištěné konstanty a R_y můžeme podle [14] spočítat následujícím vztahem

$$R_y = \frac{\dot{m}_{av5}}{\eta_{av5} A_{fr}} \quad (5.2.3.2)$$

Upravený koeficient tedy spočítáme podobně jako v případě (5.2.2.2)

$$K_{defi} = a_{de} \left(\frac{\dot{m}_{av5}}{\eta_{av5} A_{fr}} \right)^{b_{de}} \frac{\rho_{av15}}{\rho_{av5}} \left(\frac{\dot{m}_{av5}}{\dot{m}_{av15}} \right)^2 \quad (5.2.3.3)$$

5.2.4. Ostatní ztráty

V této kapitole, poslední věnující se ztrátám při proudění ve věži, si uvedeme zbývající ztrátové koeficienty tak, jak je ve svých publikacích [5] a [15] uvádí Kröger, případně Kloppers [14].

Prvním z těchto koeficientů je ztrátový koeficient podpor věže vztažený k podmínkám ve výplni

$$K_{tsfi} = \frac{C_{Dts} L_{ts} d_{ts} n_{ts} A_{fr}^2}{(\pi d_3 H_3)^3} \left(\frac{\rho_{av15}}{\rho_{av1}} \right) \left(\frac{\dot{m}_{av1}}{\dot{m}_{av15}} \right)^2 \quad (5.2.4.1)$$

kde C_{Dts} představuje součinitel odporu. Jeho hodnota je dána geometrií podpor a jeho hodnotu můžeme určit pomocí [5].

Dalším koeficient je koeficient pro vstupní mřížování, jenž bývá instalováno na vstupu vzduchu do chladicí věže, aby se zabránilo nežádoucímu vystříknutí vody mimo prostor věže. Jak uvádí [15], tento koeficient můžeme podle Kellyho považovat za roven 5

$$K_{ilfi} = 5 \frac{\rho_{av15}}{\rho_{av1}} \left(\frac{\dot{m}_{av1}}{\dot{m}_{av15}} \right)^2 \quad (5.2.4.2)$$

Výplň bývá z pravidla ve věži nějakým způsobem uchycena a je zároveň uložena v podpurné konstrukci. Pokud není určeno jinak, předpokládáme, že $K_{fs} + K_{ctc} = 0.5$ Souhrnný součinitel vztažený k podmínkám ve výplni pro tyto ztráty vypočteme podle [14] jako

$$K_{fsfi} + K_{ctcfi} = 0.5 \frac{\rho_{av15}}{\rho_{av1}} \left(\frac{\dot{m}_{av1}}{\dot{m}_{av15}} \right)^2 \quad (5.2.4.3)$$

Koeficient zohledňující rozpínání za výplni vztažený k výplni nám [14] udává následovně

$$K_{ctefi} = \left(1 - \frac{A_{fr}}{A_3} \right)^2 \frac{\rho_{av15}}{\rho_{av5}} \left(\frac{\dot{m}_{av5}}{\dot{m}_{av15}} \right)^2 \quad (5.2.4.4)$$

Rozprašovače vody se nacházejí ve výšce L_{sp} nad výplní. Upravený ztrátový koeficient pro tuto oblast spočítáme pomocí vztahu

$$K_{spfi} = L_{sp} \left[0.4 \frac{G_w}{G_a} + 1 \right] \frac{\rho_{av15}}{\rho_{av5}} \left(\frac{\dot{m}_{av5}}{\dot{m}_{av15}} \right)^2 \quad (5.2.4.5)$$

Podobně jako u rovnice (5.2.4.3), i u ztrát kvůli systému distribuce vody předpokládáme hodnotu K_{wd} rovnu 0.5 a koeficient zohledňující podmínky ve výplni vypadá následovně

$$K_{wdfi} = 0.5 \frac{\rho_{av15}}{\rho_{av1}} \left(\frac{\dot{m}_{av1}}{\dot{m}_{av15}} \right)^2 \quad (5.2.4.6)$$

Posledním ztrátovým koeficientem, který je potřeba vyjádřit, je K_{ct} k jehož vyčíslení využijeme součet některých již vyjádřených koeficientů

$$K_{HE} = K_{fsfi} + K_{ctcfi} + K_{fi} + K_{ctefi} + K_{spfi} + K_{wdfi} + K_{Kdefi} \quad (5.2.4.7)$$

Vzhledem k hodnotě tohoto koeficientu a vzhledem ke konstrukčnímu uspořádání chladicí věže je možné dle [15] vybrat vhodnou rovnici pro koeficient K_{ct} , pro kterou budou charakteristiky vyšetřované věže v rozmezí intervalu použitelnosti.

6. Výpočty

6.1. Přestup tepla a hmoty v chladicí věži

Mějme dle [5] zadanou chladicí věž s následujícími parametry:

Atmosférický tlak	$p_a = 101\,712.27\text{ N/m}^2$
Teplota vzduchu na vstupu	$t_{ai} = 9.7\text{ °C}$ ($T_{ai} = 282.85\text{ K}$)
Adiabatická saturační teplota	$t_{wb} = 8.23\text{ °C}$ ($T_{wb} = 281.38\text{ K}$)
Hmotnostní tok suchého vzduchu	$\dot{m}_a = 4.134\text{ kg/s}$
Teplota vody na vstupu	$t_{wi} = 39.67\text{ °C}$ ($T_{wi} = 312.82\text{ K}$)
Teploty vody na výstupu	$t_{wo} = 27.77\text{ °C}$ ($T_{wo} = 300.92\text{ K}$)
Hmotnostní tok vody na vstupu	$\dot{m}_w = 3.999\text{ kg/s}$

Pro výpočet Merkelova čísla využijeme Chebyshevovu metodu popsanou v kapitole 4.2.

Prvním krokem je zjištění měrné tepelné kapacity c_{pwm} :

$$T_{wm} = (T_{wi}/T_{wo})/2 = (312.82/300.92)/2 = 306.87\text{ K}$$
$$c_{pwm} = 8.15599 \cdot 10^3 - 2.80627 \cdot 10 \cdot T_{wm} + 5.11283 \cdot 10^{-2} \cdot T_{wm}^2 - 2.17582$$
$$\cdot 10^{-13} \cdot T_{wm}^6 = 4.1774 \cdot 10^3\text{ J/kg}$$

Následně vypočteme teploty, na kterých jsou závislé rozdíly entalpií

$$t_{w(1)} = t_{wo} + 0.102673(t_{wi} - t_{wo}) = 28.99\text{ °C}$$

$$t_{w(2)} = t_{wo} + 0.406204(t_{wi} - t_{wo}) = 32.60\text{ °C}$$

$$t_{w(3)} = t_{wo} + 0.593769(t_{wi} - t_{wo}) = 34.84\text{ °C}$$

$$t_{w(4)} = t_{wo} + 0.897327(t_{wi} - t_{wo}) = 38.45\text{ °C}$$

Měrné tepelné kapacity suchého vzduchu a vodní páry zjistíme z teploty

$$T_a = (T_{ai} + 273.15)/2 = 278\text{ K}$$

$$c_{pa} = 1.045356 \cdot 10^3 - 3.161783 \cdot 10^{-1} \cdot T_a + 7.083814 \cdot 10^{-4} \cdot T_a^2 - 2.705209$$
$$\cdot 10^{-7} \cdot T_a^3 = 1.0064 \cdot 10^3\text{ J/kg}$$

$$c_{pv} = 1.3605 \cdot 10^3 + 2.31334 \cdot T_a - 2.46784 \cdot 10^{-10} \cdot T_a^5 + 5.91332 \cdot 10^{-13} \cdot T_a^6$$
$$= 1.8298 \cdot 10^3\text{ J/kg}$$

Tlak vodních par při teplotě T_{wb} určíme pomocí koeficientu z jako

$$z = 10.79586 \cdot (1 - 273.16/T_{wb}) + 5.02808 \cdot \log_{10}(273.16/T_{wb}) + 1.50474 \cdot 10^{-4} \\ \cdot [1 - 10^{-8.29692 \cdot \{(T_{wb}/273.16) - 1\}}] + 4.2873 \cdot 10^{-4} \\ \cdot [10^{4.76955 \cdot (1 - 273.16/T_{wb})} - 1] + 2.786118312 = 3.0370 \\ p_{vwb} = 10^z = 1.0889 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$$

Odpovídající vodní obsah je podle [5]

$$x = \left(\frac{2501.6 - 2.3263 \cdot t_{wb}}{2501.6 + 1.8577 \cdot t_{ai} - 4.184 \cdot t_{wb}} \right) \cdot \left(\frac{0.62509 \cdot p_{vwb}}{p_a - 1.005 \cdot p_{vwb}} \right) \\ - \left(\frac{1.00416 \cdot (t_{ai} - t_{wb})}{2501.6 + 1.8577 \cdot t_{ai} - 4.184 \cdot t_{wb}} \right) = 0.0062 \text{ kg/kg}$$

Měrné skupenské teplo při teplotě $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ získáme pomocí vztahu

$$l_0 = 3.4831814 \cdot 10^6 - 5.8627703 \cdot 10^3 \cdot T_0 + 12.139568 \cdot T_0^2 - 1.40290431 \cdot 10^{-2} \cdot T_0^3 \\ = 2.5016 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$$

Z předchozích hodnot nyní můžeme vypočítat entalpii vstupujícího vzduchu

$$h_a = c_{pa} \cdot t_{ai} + x \cdot (l_0 + c_{pv} \cdot t_{ai}) = 2.5290 \cdot 10^4 \text{ J/kg}$$

Nyní již přejdeme na výpočet hodnot v rámci intervalu daného použitou metodou.

Nejdříve vyjádříme hodnoty měrných tepelných kapacit pro teplotu

$$T'_{w(1)} = (T_{w(1)} + 273.15)/2 = 287.65 \text{ K} \\ c_{pa(1)} = 1.045356 \cdot 10^3 - 3.161783 \cdot 10^{-1} \cdot T'_{w(1)} + 7.083814 \cdot 10^{-4} \cdot T'_{w(1)}^2 \\ - 2.705209 \cdot 10^{-7} \cdot T'_{w(1)}^3 = 1.0066 \cdot 10^3 \text{ J/kg} \\ c_{pv(1)} = 1.3605 \cdot 10^3 + 2.31334 \cdot T'_{w(1)} - 2.46784 \cdot 10^{-10} \cdot T'_{w(1)}^5 + 5.91332 \cdot 10^{-13} \\ \cdot T'_{w(1)}^6 = 1.8749 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$$

Tlak vodních par a následně jejich tlak při teplotě $T_{w(1)}$ spočítáme obdobně jako pro teplotu T_{wb}

$$z_{(1)} = 3.6024 \\ p_{v(1)} = 10^{z_{(1)}} = 4.0032 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$$

Odpovídající vodní obsah je

$$x''_{(1)} = \left(\frac{0.62509 \cdot p_{v(1)}}{p_a - 1.005 \cdot p_{v(1)}} \right) = 0.0256 \text{ kg/kg}$$

Následně spočteme entalpii nasyceného vzduchu

$$h''_{w(1)} = c_{pa(1)} \cdot t_{w(1)} + x''_{(1)} (l_0 + c_{pv(1)} \cdot t_{w(1)}) = 9.4654 \cdot 10^4 \text{ J/kg}$$

Odpovídající entalpie vzduchu je

$$h_{a(1)} = \dot{m}_w \cdot c_{pwm} \cdot (t_{w(1)} - t_{wo}) / \dot{m}_a = 3.0227 \cdot 10^4 \text{ J/kg}$$

Výsledný rozdíl entalpií je tedy roven

$$\Delta h_1 = h''_{w(1)} - h_{a(1)} = 6.4427 \cdot 10^4 \text{ J/kg}$$

Obdobně spočteme i další rozdíly

$$\Delta h_2 = h''_{w(2)} - h_{a(2)} = 6.9436 \cdot 10^4 \text{ J/kg}$$

$$\Delta h_3 = h''_{w(3)} - h_{a(3)} = 7.4256 \cdot 10^4 \text{ J/kg}$$

$$\Delta h_4 = h''_{w(4)} - h_{a(4)} = 8.5361 \cdot 10^4 \text{ J/kg}$$

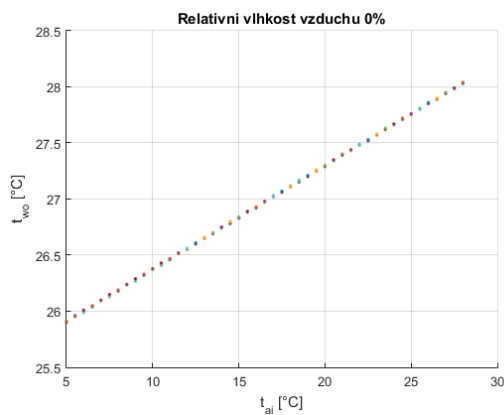
Výsledné Merkelovo číslo získáme jako

$$M_e = \frac{c_{pwm}(t_{wi} - t_{wo})}{4} \left[\frac{1}{\Delta h_1} + \frac{1}{\Delta h_2} + \frac{1}{\Delta h_3} + \frac{1}{\Delta h_4} \right] = 0.6848$$

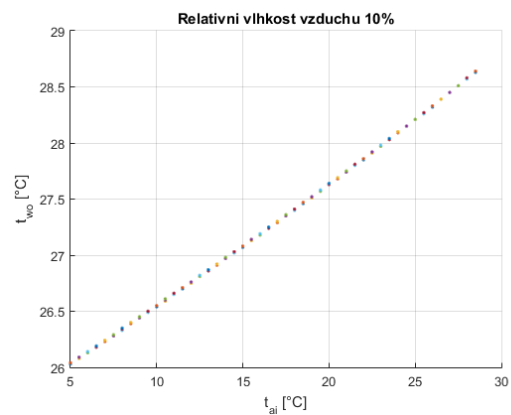
Odvedené teplo chladicí věži vypočteme jako

$$\dot{Q} = \dot{m}_w \cdot c_{pwm} \cdot (t_{wi} - t_{wo}) = 1.9879 \cdot 10^5 \text{ W}$$

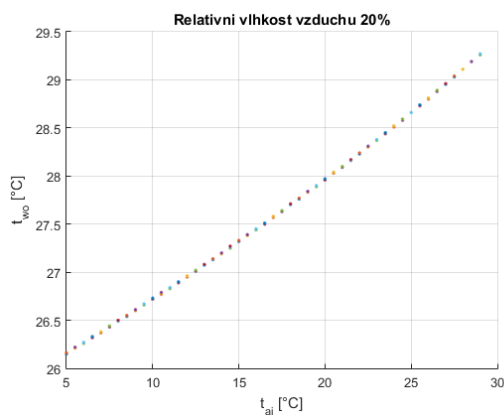
Těchto výsledků, jelikož si jejich přesností můžeme být díky referenci [5] poměrně jistí, zároveň můžeme využít k tomu, abychom si ukázali vliv atmosférických podmínek, přesněji relativní vlhkosti vzduchu φ a teploty vzduchu vstupujícího do chladicí věže t_{ai} na teplotě vody t_{wo} vystupující z věže, a tedy i na jejím tepelném výkonu.



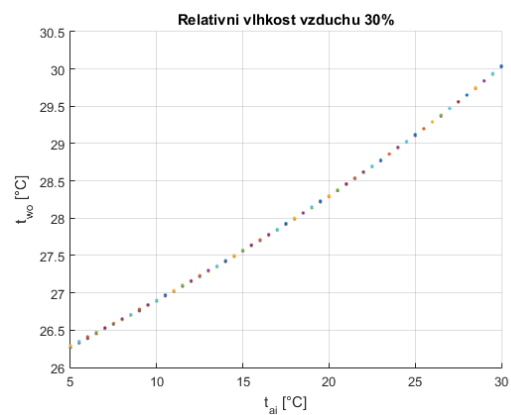
Graf 1: Závislost t_{wo} na t_{ai} pro $\varphi = 0\%$



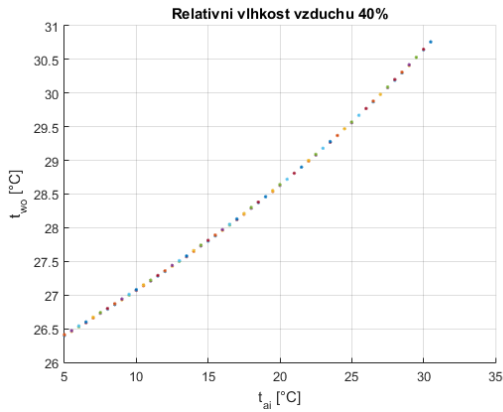
Graf 2: Závislost t_{wo} na t_{ai} pro $\varphi = 10\%$



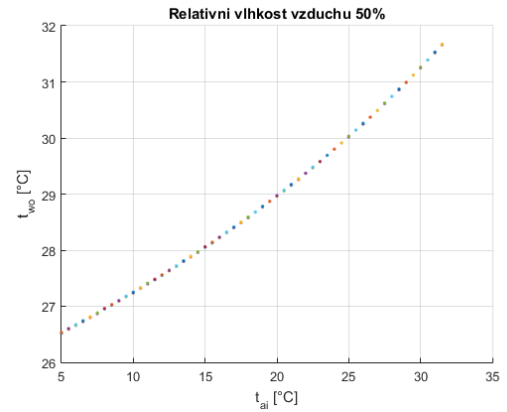
Graf 3: Závislost t_{wo} na t_{ai} pro $\varphi = 20\%$



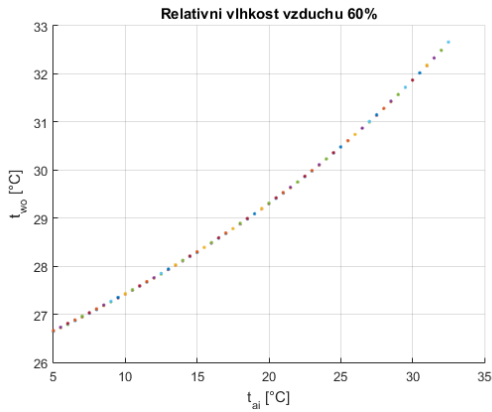
Graf 4: Závislost t_{wo} na t_{ai} pro $\varphi = 30\%$



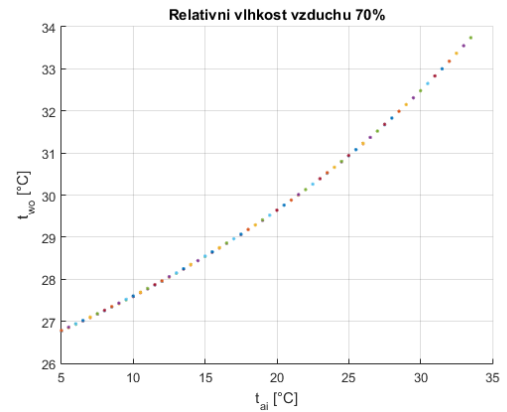
Graf 5: Závislost t_{wo} na t_{ai} pro $\varphi = 40\%$



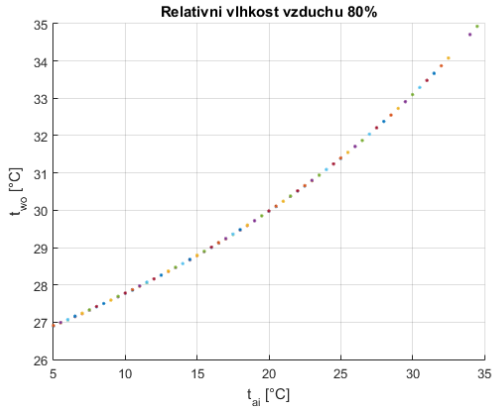
Graf 6: Závislost t_{wo} na t_{ai} pro $\varphi = 50\%$



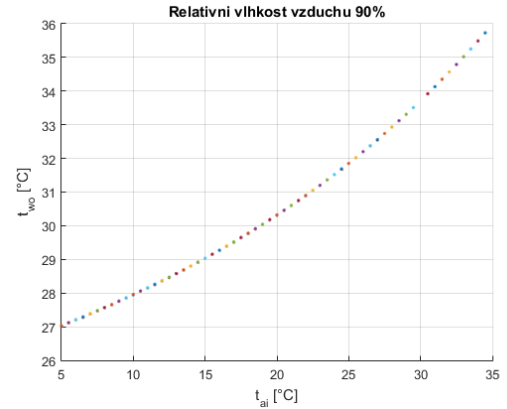
Graf 7: Závislost t_{wo} na t_{ai} pro $\varphi = 60\%$



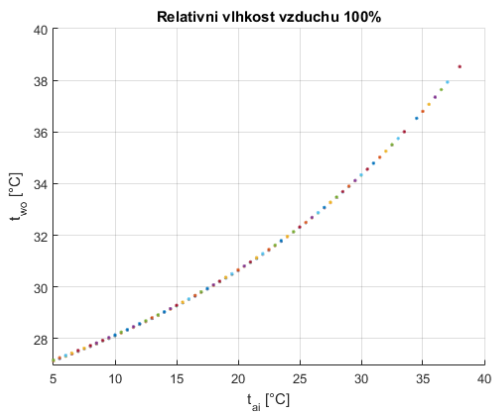
Graf 8: Závislost t_{wo} na t_{ai} pro $\varphi = 70\%$



Graf 9: Závislost t_{wo} na t_{ai} pro $\varphi = 80\%$



Graf 10: Závislost t_{wo} na t_{ai} pro $\varphi = 90\%$



Graf 11: Závislost t_{wo} na t_{ai} pro $\varphi = 100\%$

6.2. Ztrátový součinitel věže

Mějme dle zadání vedoucího chladicí věž s následujícími parametry:

Hmotnostní tok suchého vzduchu	$\dot{m}_w = 17\,099.5 \text{ kg/s}$
Hmotnostní tok vody na vstupu	$\dot{m}_a = 18\,036.5 \text{ kg/s}$
Teplotu vody na vstupu	$t_{wi} = 34.9 \text{ }^\circ\text{C} (T_{wi} = 308.05 \text{ K})$
Teplotu vzduchu na vstupu	$t_{ai} = 15.7 \text{ }^\circ\text{C} (T_{ai} = 288.85 \text{ K})$
Adiabatickou saturační teplotu	$t_{wb} = 11.84 \text{ }^\circ\text{C} (T_{wb} = 284.99 \text{ K})$
Atmosférický tlak	$p_a = 98\,100 \text{ N/m}^2$
Výška věže	$H_6 = 150 \text{ m}$
Umístění výplně	$L_{fi} = 12.5 \text{ m}$
Průřez věži v závislosti na z	$A(z) = \frac{\pi}{4} (0.006977z^2 - 1.2764z + 131.61)^2$
Charakteristika věže (Me)	$Me = 2.2 \left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_w}\right)^{1.1}$

Jako první si určíme hodnotu Merkelova čísla

$$Me = 2.2 \left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_w}\right)^{1.1} = 2.333$$

Teplota vody na výstupu je

$$t_{wo} = 21.07 \text{ }^\circ\text{C}$$

a po spočtení c_{pwm} můžeme určit i odvedené teplo věži

$$\begin{aligned} T_{wm} &= (T_{wi}/T_{wo})/2 = (308.05/294.22)/2 = 301.135 \text{ K} \\ c_{pwm} &= 8.15599 \cdot 10^3 - 2.80627 \cdot 10 \cdot T_{wm} + 5.11283 \cdot 10^{-2} \cdot T_{wm}^2 - 2.17582 \\ &\quad \cdot 10^{-13} \cdot T_{wm}^6 = 4.1795 \cdot 10^3 \text{ J/kg} \\ \dot{Q} &= \dot{m}_w \cdot c_{pwm} \cdot (t_{wi} - t_{wo}) = 9.884 \cdot 10^8 \text{ W} \end{aligned}$$

Následně můžeme pomocí [5] a hodnot hustot hmotnostního toku $G_w = 1.6355$ a $G_a = 1.7251$ určit typ výplně, který nejlépe odpovídá našemu problému

$$\frac{Me}{L_{fi}} = 0.9332$$

Této charakteristice přenosu hmoty nejlépe odpovídá výplň 27 – azbestové žebrování.

Ztrátový koeficient K_{fi} pro tento daný typ spočteme pomocí koeficientů $a_p = 2.78$ a $b_p = 12.0$ jako

$$K_{fi} = a_p \frac{G_w}{G_a} + b_p = 12.9481$$

Pro výpočet dalších ztrátových koeficientů budeme potřebovat parametry v několika místech chladicí věže. K jejich výpočtu využijeme stejných rovnic jako u příkladu (6.1), proto zde uvedu pouze vypočtené hodnoty, případně potřebné rovnice získáme z [5].

$$\begin{aligned}
\rho_{av1} &= 1.1760 \text{ kg/m}^3 \\
\rho_{av15} &= 1.1629 \text{ kg/m}^3 \\
\rho_{av5} &= 1.1502 \text{ kg/m}^3 \\
\rho_{wo} &= 997.9336 \text{ kg/m}^3 \\
\eta_{av1} &= 1.7848 \cdot 10^{-5} \text{ kg/sm} \\
\sigma_{wo} &= 0.0726 \text{ N/m} \\
v_{w3} &= 0.0016 \text{ m/s} \\
v_{av3} &= 1.4816 \text{ m/s} \\
\dot{m}_{av1} &= 1.8216 \cdot 10^4 \text{ kg/s} \\
\dot{m}_{av15} &= 1.8331 \cdot 10^4 \text{ kg/s} \\
\dot{m}_{av5} &= 1.0846 \cdot 10^4 \text{ kg/s}
\end{aligned}$$

Pro výpočet ztrátového koeficientu v oblasti deště potřebujeme ještě získat koeficienty a_v , a_p , a_η a a_L . Potřebné rovnice zjistíme z [14]. Některé parametry, například velikost kapek vody d_d , však musíme odhadnout

$$\begin{aligned}
a_v &= 73.298(g^5 \sigma_{wo}^3 / \rho_{wo}^3)^{0.25} = 1.0026 \\
a_p &= 998 / \rho_{wo} = 1.0001 \\
a_\eta &= 3.061 \cdot 10^{-6} (\rho_{wo}^4 g^9 / \sigma_{wo})^{0.25} = 1.0022 \\
a_L &= 6.122(g \sigma_{wo} / \rho_{wo})^{0.25} = 1.0007
\end{aligned}$$

Ztrátový koeficient pro oblast deště se dle (5.2.2.1) respektive (5.2.2.2) rovná

$$K_{rzfi} = 7.99$$

Dalším koeficientem je koeficient pro oblast eliminátoru. Jelikož neznáme přesný typ použitého eliminátoru, nebo zda byl vůbec použit, pro výpočet K_{defi} využijeme konstant, které ve své práci Kröger uvádí jako příklad [5]

$$K_{de} = 27.4892 R y^{-0.14247}$$

a výsledný koeficient spočteme pomocí (5.2.3.3)

$$K_{defi} = 2.0387$$

Podobně jako u oblasti deště nebo u eliminátorů, i při výpočtu koeficientu K_{ts} nemáme zadány všechny potřebné informace. Po dosažení známých i odhadnutých hodnot do (5.2.4.1) dostáváme

$$K_{tsfi} = 1.558$$

Další koeficienty z rovnic (5.2.4.2), (5.2.4.3) a (5.2.4.4) jsou rovny

$$\begin{aligned}
K_{ilfi} &= 4.883 \\
K_{fsfi} + K_{ctc fi} &= 0.4883 \\
K_{ctefi} &= 1.9173 \cdot 10^{-4}
\end{aligned}$$

Pro určení ztráty v oblasti mezi rozprašovači a výplní odhaduji $L_{sp} = 0.5 \text{ m}$ a výsledný koeficient je tedy roven

$$K_{spfi} = 0.2441$$

Z poslední rovnice, kterou jsem uvedl v kapitole 5.2.4 dostáváme

$$K_{wdfi} = 0.177$$

Nyní můžeme vypočítat souhrnný koeficient K_{HE} , díky kterému budeme moci určit vhodný postup pro výpočet koeficientu K_{ct}

$$K_{HE} = 20.7794$$

Jelikož tento koeficient spadá do intervalu $5 \leq K_{HE} \leq 25$ a zároveň rozměrové charakteristiky věže spadají do intervalu $7.5 \leq d_3/H_3 \leq 15$ volím dle Krögera [15] následující vztah

$$\begin{aligned} K_{ct(norz)} = & 0.011266e^{0.093d_3/H_3}K_{HE}^2 - 0.3105e^{0.1085d_3/H_3}K_{HE} - 1.7522 \\ & + 4.5614e^{0.131d_3/H_3} \\ & + \sinh^{-1} \left[\left\{ \frac{(10970.2e^{-0.2442K_{HE}} + 1391.3)}{(d_3/H_3 - 15.7258)} \right. \right. \\ & \left. \left. + 1205.54e^{-0.23K_{HE}} + 109.314 \right\} \left\{ 2r_i/d_3 \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{0.01942}{(d_3/H_3 - 27.929)} - 0.016866 \right\} \right] \end{aligned} \quad (6.2.1)$$

Jelikož se však jedná o výpočet pro oblast bez zóny deště, musíme $K_{ct(norz)}$ vynásobit opravným faktorem

$$\begin{aligned} & C_{rz} \\ = & \left[0.2394 + 80.1 \left\{ 0.0954/(d_3/H_3) + d_d \right\} e^{\frac{0.395G_w}{G_a}} - 0.3195 \left(\frac{G_w}{G_a} \right) \right. \\ & \left. - 966 \left\{ \frac{d_d}{(d_3/H_3)} \right\} e^{\frac{0.686G_w}{G_a}} \right] (1 - 0.06825G_w) K_{HE}^{0.09667} e^{8.7434 \left(\frac{1}{d_3} - 0.01 \right)} \end{aligned} \quad (6.2.2)$$

Po vynásobení (6.2.1) a (6.2.2) a následnou úpravou pro podmínky ve výplni získáváme

$$K_{ctfi} = 7.3914$$

Součtem všech vypočtených ztrátových koeficientů získáváme hodnotu $\sum K$ vystupující ve zjednodušené rovnici tahu (5.1.1)

$$\begin{aligned} \sum K = & K_{fi} + K_{rzfi} + K_{defi} + K_{tsfi} + K_{ilfi} + K_{fsfi} + K_{ctcfi} + K_{ctefi} + K_{spfi} + K_{wdfi} + K_{ctfi} \\ = & 37.9628 \end{aligned}$$

7. Závěr

Hlavním tématem této bakalářské práce byly chladicí věže využívané k odvedení přebytečného tepla. V úvodu práce byly stručně popsány typy věží, jejich konstrukční vlastnosti a některé z jejich komponent. Bylo uvedeno, že největší část přestupu tepla a hmoty probíhá ve výplni, jež existuje velké množství druhů. Byly uvedeny dva základní – výplň typu splash a filmová výplň, která je nejčastěji využívaným typem výplně.

V další části práce jsme se seznámili s Lewisovým faktorem a byly zde popsány diferenciální rovnice pro přestup tepla a hmoty. Tento popis byl proveden na základě práce Klimanka a Bialeckého [9]. Jedná se o diferenciální rovnice pro teplotu vody t_w , teplotu vzduchu t_a , vlhkost vzduchu x a hmotnostní tok vody \dot{m}_w . Tyto rovnice byly odvozeny pro dva stavy – prvním je stav, kdy je vzduch nenasyčený, ve druhém případě jsme uvažovali vzduch přesycený.

Následně byl v práci podrobně popsán Merkelův model, u kterého jsme si ukázali jednodušší přístup k vyjádření přestupu tepla a hmoty, než jsou diferenciální rovnice. Na závěr 4. kapitoly byla uvedena přesnější metoda aproximace Merkelova integrálu – Chebyshevova metoda.

V poslední teoretické kapitole byla za pomoci Klopperse [14] a Krögera [15] uvedena zjednodušená a následně i rozepsaná rovnice tahu chladicí věže s přirozeným tahem. Poté byly pomocí již zmíněných prací [14] a [15] vyjádřeny vztahy pro výpočet ztrátových koeficientů jednotlivých částí a komponent chladicí věže.

Na závěr této bakalářské práce byly v programu MATLAB vypočteny dva příklady. Prvním z nich byl příklad na přestup tepla a hmoty, kde byly vstupní hodnoty přebrány z [5]. Pomocí již zmíněné Chebyshevovy metody bylo vypočteno Merkelovo číslo $Me = 0.6848$. Rozdíl oproti referenci, kde bylo Merkelovo číslo vyčísleno jako $Me^r = 0.68468$ je zanedbatelný a s velkou pravděpodobností je způsoben pouze případným zaokrouhlením, zejména při výpočtu teplot $T_{w(k)}$, kde Kröger využil koeficientů zaokrouhlených na jedno desetinné číslo.

Poté, už mimo referenci, a tedy bez možnosti kontroly, bylo vypočteno teplo odvedené chladicí věží $\dot{Q} = 1.9879 \cdot 10^5 W$. Také je na konci kapitoly 6.1 uvedeno 11 grafů popisujících závislost teploty vody na výstupu t_{wo} na teplotě vzduchu vstupujícího do chladicí věže t_{ai} a na relativní vlhkosti vzduchu φ . Jak můžeme vidět, s přibývajícím hodnotou relativní vlhkosti vzduchu se hodnoty teploty vody t_{wo} při určité teplotě vzduchu na vstupu t_{ai} začínají z přibližně lineární závislosti přesouvat na mírně zakřivenou křivku. Můžeme vidět, že při stejné změně teploty t_{ai} s rostoucím φ dochází k horšímu ochlazení teploty vody a tím pádem je nižší i účinnost chladicí věže.

Ve druhém příkladu byly dle podkladů vedoucího práce zadány určité parametry zkušební chladicí věže. Z nich bylo vypočteno Merkelovo číslo $Me = 2.333$, teplota vody na výstupu $t_{wo} = 21.07 \text{ }^\circ\text{C}$ a následně i tepelný výkon věže $\dot{Q} = 9.884 \cdot 10^8 \text{ W}$.

Hlavním úkolem tohoto příkladu bylo určit ztrátový koeficient věže. K tomu bylo využito rovnic popsaných v kapitole (5.2). Vypočtený koeficient $\Sigma K = 37.9628$ je o 43,28 % menší než ztrátový koeficient uvedený v podkladech. Tento rozdíl, pomineme-li případnou chybu v zadávání rovnic do MATLABu, které se samozřejmě taky mohly stát, je zcela určitě způsoben faktem, že pro výpočet jednotlivých ztrátových koeficientů bylo zapotřebí odhadnout parametry, jež nebyly zadány. Vzhledem k téměř padesátiprocentnímu rozdílu nebyly tyto odhady vůbec přesné.

Co se rovnice tahu týče, levá strana dává hodnotu 32.9205 Pa a pravá 51.3284 Pa. Nelze tedy říct, že by vypočítané parametry chladicí věže byly správné, jelikož je hodnota na pravé straně o téměř 56 % větší. Opět je možné, že tato chyba byla způsobena buď chybným zápisem některé z rovnic v MATLABu nebo nevhodným odhadem potřebných parametrů.

Zdroje

- [1] C. HENSLEY, John, 2009. Cooling Tower Fundamentals [online]. Second edition. Overland Park, Kansas USA: SPX Cooling Technologies. Dostupné také z: spxcooling.com/pdf/Cooling-Tower-Fundamentals.pdf
- [2] Types of Towers, 2011. In: HVAC Troubleshooting [online]. Dostupné z: <http://www.hvacspecialists.info/condensers/types-of-towers.html>
- [3] Omega Crossflow Splash Fill, In: SPX Cooling [online]. Dostupné z: <http://spxcooling.com/parts/omega-crossflow-splash-fill>
- [4] PVC Film Type Cooling Tower Fill, In: Ensotek [online]. Dostupné z: http://www.ensotek.com.tr/pvc_film_type_cooling_tower_fill-583_en_lc.html
- [5] KRÖGER, Detlev G, 2004. Air-cooled heat exchangers and cooling towers: thermal-flow performance evaluation and design. Volume I. Tulsa, Okla.: PennWell. ISBN 0-87814-896-5.
- [6] Cooling Towers: Understanding Key Components of Cooling Towers and How to Improve Water Efficiency, 2011. In: Office of Energy Efficiency & Renewable Energy [online]. Washington, DC. Dostupné z: https://www1.eere.energy.gov/femp/.../waterfs_coolingtowers.pdf
- [7] NOŽIČKA, Jiří, 2001. Základy termomechaniky. Dotisk prvního vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-010-2409-1.
- [8] C. KLOPPERS, Johannes a Detlev G. KRÖGER, 2005. The Lewis factor and its influence on the performance prediction of wet-cooling towers. International Journal of Thermal Sciences [online]. 27 April 2005, 44(9), 879-884. ISSN 1290-0729. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1290072905000943>
- [9] KLIMANEK, A a R.A. BIAŁECKI, 2009. Solution of heat and mass transfer in counterflow wet-cooling tower fills. International Communications in Heat and Mass Transfer [online]. 36(6), 547-553. ISSN 0735-1933. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0735193309000712>
- [10] Cooling Tower Efficiency Calculations, 2018. Chemical Engineering Site [online]. Dostupné z: <http://chemicalengineeringsite.in/cooling-tower-efficiency-calculations/>
- [11] H. ALSUWAIDI, Jasem, Omar R. AL HAMDAN a M. M. I. HAMMAD, 2015. Natural Draft Cooling Tower Performance Evaluation. International Journal of Scientific & Engineering Research [online]. 6(4). ISSN 2229-5518. Dostupné z: <https://www.ijser.org/researchpaper/Natural-Draft-Cooling-Tower-Performance-Evaluation.pdf>

- [12] C. KLOPPERS, Johannes a Detlev G. KRÖGER, 2004. Cooling Tower Performance: A Critical Evaluation of the Merkel Assumptions. R&D Journal [online]. 24-29. Dostupné z: https://c.ymcdn.com/sites/www.saimeche.org.za/resource/collection/86D6C55A-EC4D-4087-8D0E-E589C14E4AEF/Kloppers_and_Kr_ger-2004_20__600_dpi_-_2004__20_1__24-29.pdf
- [13] HYHLÍK, Tomáš, Calculation of Merkel Number in the Merkel's Model of Counterflow Wet Cooling Tower Fill. Conference Topical Problems of Fluid Mechanics. Prague, 2013, 29-32.
- [14] C. KLOPPERS, Johannes, 2003. A Critical Evaluation and Refinement of the Performance Prediction of Wet-Cooling Towers. Stellenbosch. Dissertation. University of Stellenbosch.
- [15] KRÖGER, Detlev G, 2004. Air-cooled heat exchangers and cooling towers: thermal-flow performance evaluation and design. Volume II. Tulsa, Okla.: PennWell. ISBN 1-59370-019-9.