

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



**REKUPERAČNÍ VÝMĚNÍKY TEPLA S KŘÍŽOVÝM
PROUDEM**

Josef Procházka

**REKUPERAČNÍ VÝMĚNÍKY TEPLA S KŘÍŽOVÝM
PROUDEM**

Diplomová práce

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra energetických strojů a zařízení

Studijní program : **Magisterský - M2301 – strojní inženýrství**

Studijní obor : **2302T1010 - Konstrukce strojů a zařízení**

Studijní zaměření : **Tepelná technika**

Téma práce :

REKUPERAČNÍ VÝMĚNÍKY TEPLA S KŘÍŽOVÝM PROUDEM

Diplomant :

Bc. Josef Procházka

Vedoucí diplomové práce :

Prof. Ing. Josef Olehla, CSc.

Rok obhajoby diplomové práce: 2005

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146134462

Počet stran : 48

Počet příloh : 6

Počet obrázků : 22

V Liberci 2005



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení **Josef Procházka**

Studijní program **magisterský -M2301 strojní inženýrství**

Obor **2302T010 Konstrukce strojů a zařízení**

Zaměření **Tepelná technika**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Rekuperační výměníky tepla s křížovým proudem

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Provést přehled výpočtových metod pro zvýšení tepelného toku žebrových výměníků tepla.
2. Porovnání výsledků uvedených výměníků tepla.
3. Výpočet provozních charakteristik výměníků a zjištění účinnosti.
4. Závěr.

chybí CD!

KEZ/TT

48s, 10 s. vol. přel.

Diplomová práce KEZ – M2301

TÉMA: REKUPERAČNÍ VÝMĚNÍKY TEPLA S KŘÍŽOVÝM PROUDEM

ANOTACE:

Cílem diplomové práce je přehled jednotlivých výpočtových metod pro zjištění tepelného toku žebrovaných výměníků tepla uváděných v literatuře, porovnání těchto výsledků s naměřenými hodnotami a vyjádření závislosti $N_u = f(R_e)$.

Dále je proveden výpočet pomocí provozních charakteristik výměníku a zjištění účinnosti výměníku.

THEME: RECUPERATIVE CROSS-FLOW HEAT EXCHANGERS

ANOTATION:

The aim of diploma work is overview of individual calculating methods for detection of heat flow of ribbed heat exchangers used in literature, comparison with measured values and expression of function $N_u = f(R_e)$.

Further is presented calculating using characteristic values of heat exchanger and expression of efficiency of heat exchanger.

Klíčová slova : výměník tepla, křížový proud, tepelný tok, účinnost výměníku, provozní charakteristiky, tlakové ztráty

Zpracovatel : TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra energetických strojů a zařízení

Dokončeno : 20.05.2005

Archivní ozn. zprávy :

Počet stran : 48

Počet příloh : 6

Počet obrázků : 22

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon **č. 121/2000** o právu autorském, zejména **§ 60** (školní dílo) a **§ 35** (o nevýdělečném užití díla k vnitřní potřebě školy). Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce, a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na náhradu nákladů, vynaložených na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Datum : 20.05.2005

Podpis :



Obsah

Seznam použitých značek, indexů a podobnostních čísel	9
1. Úvod	12
2. Teoretická část	
2.1. Průtok potrubím	14
2.2. Tlakové ztráty (průtočné odpory) v potrubí	14
2.3. Ztráty tepla v potrubí	15
2.4. Proudění kolem svazku žebrovaných trubek	15
2.5. Součinitel přestupu tepla	15
a) Přestup tepla na vnitřním povrchu trubky	16
b) Přestup tepla při obtékání svazku trubek	17
c) Přestup tepla na vnějším povrchu žebrovaných trubek	18
2.6. Součinitel prostupu tepla	20
2.7. Výpočet výměníku pomocí charakteristik	21
2.8. Výpočetní vztahy pro další termofyzikální veličiny	24
3. Vlastní měření a výpočet	
3.1. Měřicí trať a parametry výměníku	25
3.2. Výpočet výměníku podle naměřených hodnot	27
3.3. Výpočet výměníku podle normy VDI (SRN)	30
3.4. Výpočet výměníku podle kritériálních rovnic	31
3.5. Výpočet součinitele prostupu tepla	33
3.6. Výpočet účinnosti výměníku pomocí provozních charakteristik	34
3.7. Kontrolní výpočet výstupních teplot tekutin	38
3.8. Tlakové ztráty výměníku	42
4. Závěr	45
Seznam literatury, příloh a obrázků	47

Seznam použitých značek

a	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	teplotní vodivost
b	[m]	mezera mezi žebry
B	[m]	šířka kanálu
c	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	měrná tepelná kapacita
C	$[J \cdot K^{-1}]$	tepelná kapacita
C'	$[W \cdot K^{-1}]$	tok tepelné kapacity
d	[m]	průměr trubky
D	[m]	průměr žebra
h	[m]	výška žebra
H	[m]	výška kanálu
k	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel prostupu tepla
L	[m]	délka trubky
m	[kg]	hmotnost
m'	$[kg \cdot s^{-1}]$	hmotnostní tok
n_1	[-]	počet trubek v řadě
n_2	[-]	počet řad trubek
n_c	[-]	celkový počet trubek
n_z	[-]	počet žeber
N	[-]	tepelná charakteristika výměníku
O	[m]	smočený obvod
p	[Pa]	tlak
q'	$[W \cdot m^{-2}]$	hustota tepelného toku
Q'	[W]	tepelný tok
r	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	měrná plynová konstanta
R	[-]	průtoková charakteristika výměníku
R	$[J \cdot kmol^{-1} \cdot K^{-1}]$	univerzální plynová konstanta
s	[m]	tloušťka
s_1	[m]	vzdálenost trubek v řadě
s_2	[m]	vzdálenost řad trubek
S	$[m^2]$	plocha, průřez a povrch
t	$[^{\circ}C]$	teplota
V'	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	objemový tok
w	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost

α	$[\text{W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$	součinitel přestupu tepla
δ	$[\%]$	relativní chyba
δ	$[\text{m}]$	střední tloušťka
η	$[-]$	účinnost
η	$[\text{Pa} \cdot \text{s}]$	dynamická viskozita
κ	$[-]$	adiabatický exponent (Poissonova konstanta)
λ	$[\text{W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti
λ	$[-]$	součinitel třecích ztrát
ζ	$[-]$	součinitel místních ztrát
ν	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	kinematická viskozita
ρ	$[\text{kg.m}^{-3}]$	hustota
τ	$[\text{s}]$	čas
Δ	$[-]$	konečný rozdíl
Δ	$[\text{m}]$	drsnost povrchu
Φ	$[-]$	provozní charakteristika výměníku

Seznam použitých indexů

A	výstup
celk	celkové
E	vstup
e	nejužší, vnější
ch	charakteristický
i	vnitřní
kont	kontrolní
kříž	křížový
L, vzd	vzduch
lam	laminární
log	logaritmický
mís	místní
o	vztaženo na hladký povrch
p	při konstantním tlaku
pom	pomocný
rce	rovnice

stř	střední
t	trubky
tek	tekutina
tř	třecí
turb	turbulentní
výp	výpočtový
W	voda
ž	žebra

Seznam použitých podobnostních čísel

Nu	[-]	$Nu = \frac{\alpha \cdot d_{ch}}{\lambda}$	Nusseltovo číslo
Pr	[-]	$Pr = \frac{\nu}{a}$	Prandtlovo číslo
Re	[-]	$Re = \frac{w \cdot d_{ch}}{\nu}$	Reynoldsovo číslo

1) Úvod

Výměníky tepla jsou zařízení sloužící ke zprostředkování přenosu tepla (popřípadě přenosu hmoty) mezi teplotonosnými látkami – většinou tekutinami. V nejjednodušších případech se jedná např. o topná tělesa, chladiče, či ohřívače, kde nedochází k fázovým ani chemickým změnám.

Základní rozdělení podle vzájemného kontaktu látek :

- **Povrchové (rekuperační) výměníky** – pracovní látky jsou odděleny pevnou tepelně vodivou stěnou, která tvoří teplosměnný povrch výměníku.

Dělení podle směru toku pracovních látek - souproudé
- protiproudé
- s příčným (křížovým) proudem

Dělení podle konstrukce - deskové výměníky
- výměníky z hladkých trubek
- výměníky se zvětšeným povrchem

- **Regenerační výměníky** – přenos tepla mezi dvěma hlavními látkami zajišťuje látka třetí (tzv. akumulátor), která se střídavě ohřívá a ochlazuje, a tím předává (odebírá) teplo pracovním tekutinám.

Lze dělit na dvě základní skupiny - rotační s pohyblivým akumulátorem
- přepínací se stacionárním akumulátorem

- **Výměníky kontaktní (směšovací)** – přenos energie je zprostředkován přímým kontaktem teplotonosných medií (např. okruh chladicí věže v tepelných elektrárnách).

Výparníky a kondenzátory jsou příkladem výměníků, kdy dochází k fázovým změnám, a proto mají tato zařízení speciální konstrukci.

Přenos tepla ve výměnících je kombinovaný proces skládající se ze všech možných druhů přenosů tepla. Nejčastěji jde o konvektivní přenos tepla - přirozený, či vynucený, doplněný o vedení tepla a tepelné záření.

Významným ukazatelem výměníků tepla jsou kromě účinnosti zařízení η [-] také tlakové ztráty Δp [Pa] všech zúčastněných tekutin.

Teplosměnný povrch je vytvářen spojením různého počtu teplosměnných elementů. Mezi nejpoužívanější patří hladké trubky kruhového průřezu ve svazcích. Trubky s vnějšími žebry kruhového či obdélníkového průřezu se používají v případě výrazně menšího součinitele přestupu tepla α z jedné či druhé strany. Cílem je zvětšení teplosměnného povrchu. Tento typ je často používán u výměníků typu kapalina – plyn.

Podmínky pro správnou funkci žebrování jsou :

- dobrý kontakt žebor se základní trubkou.
- pro zajištění rostoucího tepelného toku musí platit : $\frac{2 \cdot \lambda}{\alpha \cdot s} > 5$

λ [W.m⁻¹ . K⁻¹] – součinitel tepelné vodivosti žebra

s [m] – tloušťka žebra

α [W.m⁻² . K⁻¹] – součinitel přestupu tepla

- teoretická šířka mezi žebry by měla být (aby nedošlo ke spojení mezních vrstev při proudění vzduchu) :

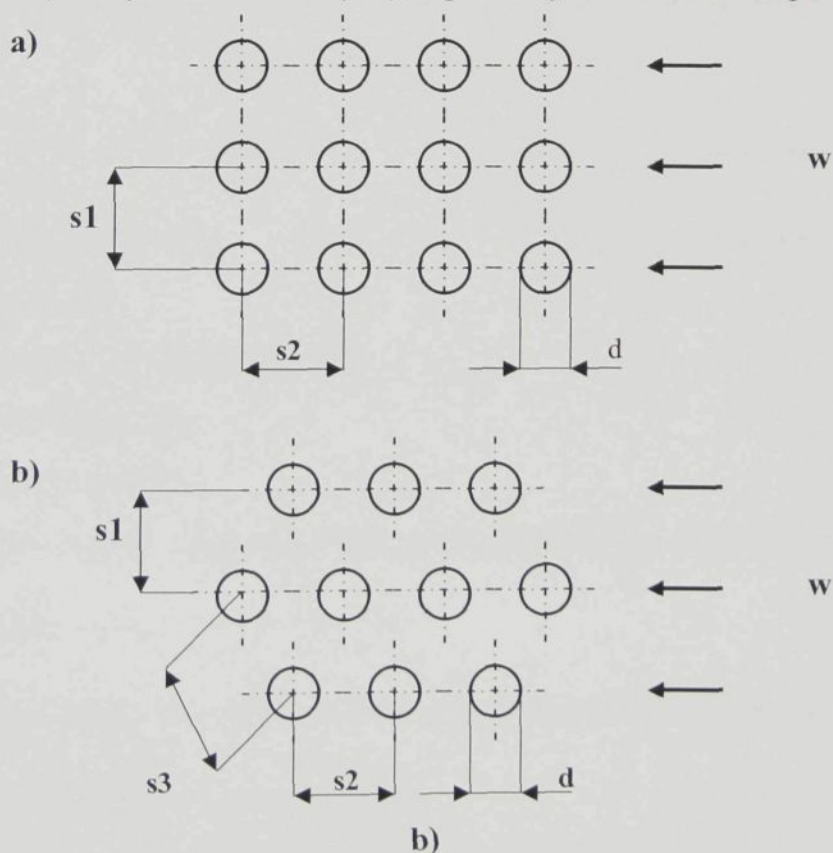
$$b \geq 9,28 \cdot \sqrt{\frac{D \cdot \nu}{w}}$$

ν [m² . s⁻¹] – kinematická viskozita vzduchu

D [m] – průměr žebra

w [m . s⁻¹] – rychlost vzduchu

U svazků trubek (hladkých či žebrovaných) se používají dvě základní uspořádání :



Obr. 1-1. Uspořádání svazků trubek : a) za sebou, b) vystřídané

Vystřídané uspořádání svazku trubek vykazuje lepší hodnotu součinitele přestupu tepla, ale vyšší hydraulické ztráty. Pro uspořádání trubek za sebou platí opak.

- viz. [L1, L3, L6]

2) Teoretická část

2.1. Průtok potrubím

Převážnou většinu tekutin dopravovaných potrubím lze považovat za tzv. tekutiny „newtonské“, které mohou proudit laminárně nebo turbulentně (+ přechodové stavy). Druh proudění má značný vliv na velikost tlakových ztrát a na rychlostní profil v průtočném průřezu potrubí.

Turbulentní proudění vzniká, je-li Reynoldsovo číslo proudu Re vyšší než kritická hodnota tohoto čísla Re_{krit} . Tato hodnota je pro kruhové potrubí zhruba $Re_{krit} = 2300$. V mezních případech lze udržet laminární proudění až do hodnoty $Re = 10\,000$. Voda a vzduch dopravované potrubím proudí zpravidla turbulentně (laminární proud může nastat např. v potrubí o malém průměru nebo při velmi zmenšeném průtoku).

2.2. Tlakové ztráty (průtočné odpory) v potrubí

Tlakové ztráty vznikají třením proudu při průtoku přímých částí potrubí Δp_{tr} a v místních odporech (hlavně změny směru proudu a změny průtočného průřezu) $\Delta p_{mís}$.

$$\Delta p_{celk} = \Delta p_{tr} + \Delta p_{mís} \quad (2.1)$$

$$\Delta p_{tr} = \lambda \cdot \frac{L}{d_{ch}} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho \quad [\text{Pa}] \quad (2.1a)$$

$$\Delta p_{mís} = \zeta \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho \quad [\text{Pa}] \quad (2.1b)$$

λ [-] – součinitel třecích ztrát

ζ [-] – součinitel místních ztrát

L [m] – délka potrubí

d_{ch} [m] – charakteristický rozměr potrubí

w [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] – rychlost tekutiny

ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] – hustota tekutiny

Součinitel třecích ztrát λ pro laminární proudění a hydraulicky hladké potrubí závisí

$$\text{jen na Reynoldsově čísle : } \lambda = \frac{64}{Re} \quad [-] \quad (2.2)$$

Součinitel třecích ztrát λ pro turbulentní proudění a hydraulicky hladké potrubí je také

$$\text{úměrné Reynoldsově čísle : } \lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} \quad [-] \quad (2.3)$$

Součinitel třecích ztrát λ pro turbulentní proudění a hydraulicky drsné potrubí můžeme

$$\text{počítat dle vztahu : } \frac{1}{\lambda} = -2 \cdot \log \left[\frac{1}{3,7} \cdot \frac{\Delta}{d_{ch}} + \left(\frac{6,81}{Re} \right)^{0,9} \right] \quad [-] \quad (2.4)$$

Δ [m] – drsnost povrchu obtékané plochy

Doporučené hodnoty drsnosti povrchu dle Tab. 6-II viz. L2 :

- hladké trubky $\Delta = 0,01 \text{ mm}$
- ocelové trubky bezešvé válcované (tažené) $\Delta = 0,03\text{-}0,06 \text{ mm}$
- litinové trouby $\Delta = 0,2 - 0,6 \text{ mm}$.

Součinitele místních ztrát ζ [-] možno orientačně volit dle Tab. 6-III viz. L2 :

- ostrohranný kolmý vtok do potrubí $\zeta = 0,8$
- 180° hladký ohyb $\zeta = 0,8$
- přímý výtok z potrubí $\zeta = 1,2$.

2.3. Ztráty tepla v potrubí

V potrubí, ve kterém protéká tekutina o teplotě vyšší než je teplota prostředí, dochází k tepelným ztrátám. Pokud je naopak teplota protékající tekutiny v potrubí nižší než teplota okolí, tekutina se ohřívá a na povrchu potrubí může docházet ke kondenzaci (je-li tato teplota nižší než rosný bod obklopující tekutiny).

- viz. [L2]

2.4. Proudění kolem svazku žebrovaných trubek

Žebrováním se zvětšuje teplosměnná plocha na straně menšího přestupu tepla. Pro optimální funkci výměníku a spotřebu materiálu (ocel, měď, hliník,...) by mělo platit: $\alpha_i \cdot S_i = \alpha_e \cdot S_e$.

V praxi se poměr vnějšího žebrovaného povrchu k povrchu uvnitř trubky pohybuje v rozmezí: $S_e / S_i = 10 \div 20$.

Proudění kolem žebrovaného svazku trubek lze rozdělit na tři základní úseky – proudění s šikmým náběhem, proudění v mezerách mezi žebry a proudění s šikmým výstupem.

2.5. Součinitel přestupu tepla

Součinitel přestupu tepla se stanovuje podle různých kriteriálních závislostí (rovníc). Složitost těchto vztahů je především odvislá od tvarové složitosti geometrie žebrování. Primární roli při sestavování či výběru použití těchto kriteriálních rovnic hraje určující charakteristický rozměr (např. vnitřní průměr trubky d_{ch} , nejkratší přímá vzdálenost mezi žebry nebo hydraulický průměr $D_h = 4 \cdot S / O$) a rozsah platnosti Reynoldsových a Prandtlových čísel .

V nauce o tepelné konvekci se obvykle vyjadřuje součinitel přestupu tepla α pomocí bezrozměrného podobnostního čísla Nusseltova, které je všeobecně funkcí dalších podobnostních čísel $Nu = Nu(Re, Gr, Pr, Fo)$

[Re – Reynoldsovo číslo, Gr – Grashofovo číslo, Pr – Prandtlovo číslo, Fo – Fourierovo číslo]. Je nutné také rozlišovat, zda jde o přirozenou, či nucenou konvekci.

a) Přestup tepla na vnitřním povrchu trubky

Pro výpočet střední hodnoty součinitele přestupu tepla pro laminární, nucené proudění tekutiny v trubce je v literatuře - viz. [L6] uváděn vztah:

$$Nu = 1,86 \cdot (Re \cdot Pr \cdot \frac{d_{ch}}{L})^{1/3} \cdot \left(\frac{\eta_{tek}}{\eta_{st}} \right)^{0,14} \quad [-] \quad (2.5)$$

Rozsah platnosti: $Re \cdot Pr \cdot (d_{ch} / L) > 7,17$

$$\eta_{st} / \eta_{tek} = 0,004 \div 14$$

d_{ch} [m] – vnitřní průměr trubky

L [m] – délka trubky

η_{tek} [Pa .s] – dynamická viskozita při střední vztažné teplotě tekutiny

η_{st} [Pa .s] – dynamická viskozita při střední vztažné teplotě stěny

Pro výpočet střední hodnoty součinitele přestupu tepla pro turbulentní, nucené proudění (včetně přechodové oblasti) tekutiny v trubce jsou v literatuře - viz. [L1, L3, L6] uváděny vztahy:

$$Nu = 0,116 \cdot (Re^{2/3} - 125) \cdot Pr^{1/3} \cdot \left[1 + \left(\frac{d_{ch}}{L} \right)^{2/3} \right] \cdot \left(\frac{\eta_{tek}}{\eta_{st}} \right)^{0,14} \quad [-] \quad (2.6)$$

Rozsah platnosti: $Re = 2300 \div 1 \cdot 10^6$

$$Pr = 0,6 \div 1000$$

$$Nu = \varepsilon_{turb} \frac{0,023 \cdot Pr^{0,4} \cdot Re^{0,8}}{1 + 2,14 \cdot Re^{-0,1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \cdot K \quad [-] \quad (2.7)$$

Rozsah platnosti: $Re = 7000 \div 2 \cdot 10^6$

$$Pr = 0,7 \div 200$$

K [-] – součinitel závislý na poměru teploty stěny a střední teploty tekutiny

$$t_{st} / t_{tek} = (0,5 \div 1) \quad \rightarrow K = 1,27 - 0,27 \cdot (t_{st} / t_{tek})$$

$$t_{st} / t_{tek} = (1 \div 3,5) \quad \rightarrow K = (t_{st} / t_{tek})^{-0,55}$$

ε_{turb} [-] – hodnoty součinitele - viz. [L6, tab.6.4]

$$Nu = 0,024 \cdot \left[1 + \left(\frac{d_{ch}}{L} \right)^{2/3} \right] \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \left(\frac{\eta_{tek}}{\eta_{st}} \right)^{0,14} [-] \quad (2.8)$$

Rozsah platnosti: $Re = 7 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^6$

$Pr = 0,7 \div 10$

$L / d_{ch} = 1 \div \text{nekonečno}$

$$Nu = \left(\frac{\frac{\xi}{8} \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8} \cdot (Pr^{2/3} - 1)}} \right) \cdot \left[1 + \left(\frac{d_{ch}}{L} \right)^{2/3} \right] [-] \quad (2.9)$$

$\xi [-] = (1,82 \cdot \log Re - 1,64)^{-2}$

Rozsah platnosti: $Re = 2300 \div 1 \cdot 10^8$

$$Nu = 0,032 \cdot \left[\left(\frac{L}{d_{ch}} \right)^{-0,054} \right] \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n [-] \quad (2.10)$$

$n = 0,37 \dots$ pro ohřev tekutiny

$n = 0,30 \dots$ pro ochlazování tekutiny

Rozsah platnosti: $Re = > 1 \cdot 10^4$

$Pr = 0,7 \div 2500$

$$Nu = 0,037 \cdot (Re^{0,75} - 180) \cdot Pr^{0,42} \cdot \left[1 + \left(\frac{d_{ch}}{L} \right)^{2/3} \right] \cdot \left(\frac{\eta_{tek}}{\eta_{st}} \right)^{0,14} [-] \quad (2.11)$$

b) Přestup tepla při obtékání svazku trubek

Pro výpočet střední hodnoty součinitele přestupu tepla ze svazku trubek do tekutiny je uváděn v literatuře - viz. [L6] obecný vztah:

$$Nu = K \cdot Re^m \cdot \left(\frac{Pr_{tek}}{Pr_{vzd}} \right)^{0,31} [-] \quad (2.12)$$

Rozsah platnosti: $Re = 2000 \div 40000$

$Pr = 0,5 \div 500$

Určujícím rozměrem je v tomto případě vnější průměr trubky, určující teplotou je střední průtočná teplota tekutiny a za rychlost dosazujeme maximální hodnotu v nejužším průtočném průřezu.

Hodnoty součinitele K a exponentu m - viz. [L6, tab.6.7].

Další vztahy:

- Pro uspořádání trubek za sebou:

$$Nu = 0,202 \cdot K_1 \cdot Re^{0,64} \cdot Pr^{0,4} [-] \quad (2.13)$$

- Pro vystřídání uspořádání trubek:

$$Nu = 0,308.K_2.Re^{0,6}.Pr^{0,4} [-] \quad (2.14)$$

Součinitelé K_1 a K_2 závisí na počtu řad trubek ve svazku - viz. [L6, Obr. 6.16].

- viz. [L6]

c) Přestup tepla na vnějším povrchu žebrovaných trubek

Součinitel přestupu tepla na vnějším povrchu žebrovaných trubek je definován vztahem:

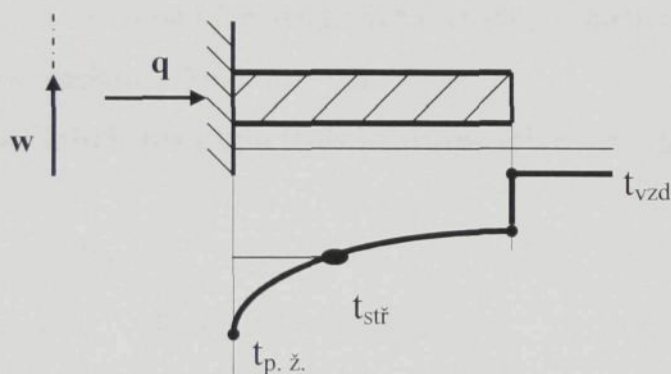
$$\alpha_e = \alpha_z \cdot \left(1 - \frac{\delta_z}{s_z}\right) + \alpha^* \cdot \frac{\delta_z}{s_z} \quad [W.m^{-2} . K^{-1}] \quad (2.15)$$

δ_z [m] – střední tloušťka žebra

s_z [m] – rozteč žeber

α_z [$W.m^{-2} . K^{-1}$] – střední přestup tepla v prostoru mezi žebry a trubkou

Problematické je ovšem stanovení hodnoty α^* - viz. [L6, Obr. 7.5], vyjadřující vliv vedení tepla v žebře.



Obr. 2-1. Průběh teploty na žebře trubky

Jiný vztah, který vede k určení součinitele přestupu tepla na žebrovaných trubkách skrze účinnost žebra, je :

$$\alpha_e = \alpha_z \cdot \frac{S_z}{S_{celk}} \cdot \left[\eta_z - \left(1 - \frac{S_{celk}}{S_z}\right) \right] \quad [W.m^{-2} . K^{-1}] \quad (2.16)$$

α_z [$W.m^{-2} . K^{-1}$] – součinitel přestupu tepla na žebrech

S_z [m^2] – povrch žeber

S_{celk} [m^2] – celkový povrch (žebrování + trubky)

η_z [-] – účinnost žebra

Účinnost žebra – je definována jako poměr rozdílů střední teploty žebra a okolního vzduchu ku rozdílu teplot mezi patou žebra a okolním vzduchem.

$$\eta_z = \frac{t_{stř} - t_{vzd}}{t_{pž} - t_{vzd}} [-] \quad (2.17)$$

Pro žebra konstantního průřezu platí vztah: $\eta_z = \frac{tgh(m.h)}{m.h} [-]$ (2.18)

$$m = \sqrt{\frac{2.\alpha_z}{s.\lambda}} [-] \quad (2.19)$$

h [m] – výška žebra

s [m] – tloušťka žebra

λ [W.m⁻¹ . K⁻¹] – součinitel tepelné vodivosti žebra

α_z [W.m⁻² . K⁻¹] – součinitel přestupu tepla na žebrech.

Kruhová žebra stálé tloušťky se nahrazují žebry stálého průřezu pomocí ekvivalentní

výšky: $h' = h \cdot \left(1 + 0,35 \cdot \ln \left(\frac{D_e}{d_e} \right) \right)$ [m] (2.20)

$$h = \frac{(D_e - d_e)}{2} \text{ [m]} \quad (2.21)$$

d_e [m] – vnější průměr trubky

D_e [m] – vnější průměr žebra.

Účinnost žebra závisí na výše uvedených čtyřech parametrech a dále také na kvalitě spoje žebra s trubicí. Běžně: $\eta_z = 0,8 \div 0,99$.

Výpočet součinitele přestupu tepla žebrovaných trubek pomocí kritériálních rovnic:

$$Nu = 0,251 \cdot Re^{0,67} [-] \quad \text{- viz. [L7]} \quad (2.22)$$

Rozsah platnosti: $Re = 1000 \div 100000$

$$Nu = 2,147 \cdot Re^{0,46} \cdot \left(\frac{s_2 - d_e}{d_e} \right)^{-0,2} \cdot \left(\frac{s_2 - d_e}{b} + 1 \right)^{-0,2} [-] \quad \text{- viz. [L7]} \quad (2.23)$$

s_2 [m] – vzdálenost řad trubek

d_e [m] – vnější průměr trubky

b [m] – mezera mezi žebry

Charakteristický rozměr (v Re čísle) pro vztahy (2.22) a (2.23) (dle Harissona):

$$d_{ch} = \frac{S_o \cdot d_e + S_z \cdot \sqrt{S_z / 2 \cdot n_z}}{S_o + S_z} \text{ [m]} \quad (2.24)$$

S_o [m²] – vnější povrch trubky (bez žeber)

S_z [m²] – žebrovaný povrch

n_z [-] – počet žeber

d_e [m] – vnější průměr trubky

Velikost rychlosti (v Re čísle) pro vztahy (2.22) a (2.23) se vypočte pro nejužší místo protékaného průřezu.

$$Nu = C \cdot Re_e^{0,625} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{b}{s_2} \right)^{0,214} [-] \quad - \text{viz. [L1]} \quad (2.25)$$

Součinitel C pro: - vystřídáné trubky $C = 0,191$
 - trubky za sebou $C = 0,124$

s_2 [m] – vzdálenost řad trubek

b [m] – mezera mezi žebry

Charakteristickým rozměrem je zde mezera mezi žebry b [m].

$$Nu = C' \cdot Re_e^{0,625} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{S_e}{S_o} \right)^{0,375} [-] \quad - \text{viz. [L1]} \quad (2.26)$$

Součinitel C' pro: - vystřídáné trubky $C' = 0,4$
 - trubky za sebou $C' = 0,26$

S_e [m²] – celkový vnější povrch (trubka + žebrování)

S_o [m²] – celkový vnější povrch hladké trubky

Charakteristickým rozměrem je zde vnější průměr trubky d_e [m].

Výpočet součinitele přestupu tepla žebrovaných trubek podle normy VDI (SRN):

1/ výpočet svazku nežebrovaných trubek

2/ korekce na žebrovaný povrch

$$\frac{\alpha_z}{\alpha_t} = 1 - 0,18 \cdot \left(\frac{h}{s_R} \right)^{0,63} [-] \quad (2.27)$$

h [m] – výška žebra

s_R [m] – rozteč žeber

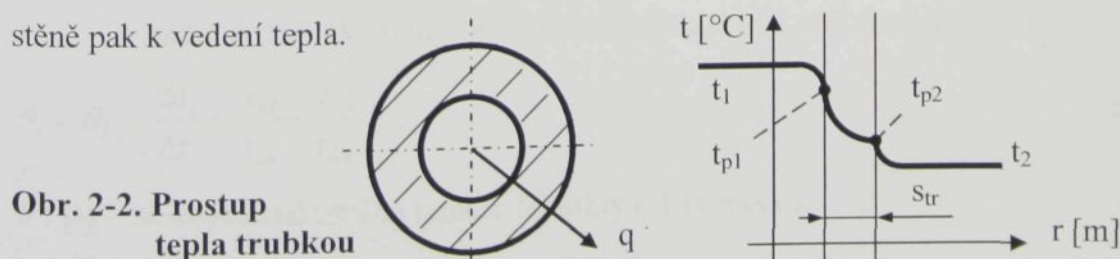
$$Nu_o = 0,21 \cdot Re_e^{0,61} \cdot Pr^{0,33} \cdot f_a [-] \quad (2.28)$$

f_a [-] – opravný faktor pro hladkou trubku (nomogramy)

$f_a \cong 1,02$

2.6. Součinitel prostupu tepla

Sdílení tepla mezi dvěma tekutinami oddělenými jednoduchou či složenou pevnou stěnou, která je nepropustná, nazýváme prostupem (průchodem) tepla. Jde tedy o složený proces, kde na obou smáčených površích dochází k přestupu tepla, v tuhé stěně pak k vedení tepla.



Obr. 2-2. Prostup tepla trubkou

$t_{1,2} [^{\circ}\text{C}]$ – teploty proudících tekutin

$q \cdot [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$ – hustota tepelného toku

$t_{p1,2} [^{\circ}\text{C}]$ – teploty povrchů stěn

$s_{tr} [\text{m}]$ – tloušťka stěny (trubky)

Součinitel prostupu tepla se u výměníků většinou vztahuje na velikost jejich vnějšího povrchu S_e .

$$\dot{Q} = k \cdot S_e \cdot (t_1 - t_2) = k \cdot S_e \cdot \Delta t_{stř, \log} [\text{W}] \quad (2.29)$$

$$\Delta t_{stř, \log} = \frac{\Delta t_{větší} - \Delta t_{menší}}{\ln \frac{\Delta t_{větší}}{\Delta t_{menší}}} [^{\circ}\text{C}] \quad (2.30)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{S_e}{S_i} + \frac{1}{\lambda_s} \cdot \frac{S_e}{S_{et}} + \frac{1}{\alpha_e \cdot \eta_z}} \cong \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{S_e}{S_i} + \frac{1}{\alpha_e \cdot \eta_z}} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (2.31)$$

Tepelný odpor styku žebra a trubky ($1/\lambda_s$) se obvykle zanedbává.

$\dot{Q} [\text{W}]$ – tepelný tok

$q \cdot [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$ - hustota tepelného toku

$k [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$ – součinitel prostupu tepla

$\alpha_i [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$ – součinitel přestupu tepla na vnitřním povrchu trubky ($= \alpha_w$)

$\alpha_e [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$ – součinitel přestupu tepla na vnějším povrchu žebra, trubek ($= \alpha_L$)

$\lambda_s [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ – součinitel tepelné vodivosti stěny trubky

$S_e [\text{m}^2]$ – celkový vnější povrch ($S_e = S_{et} + S_z$)

$S_{et} [\text{m}^2]$ – celkový vnější povrch nežebrované části trubky

$S_i [\text{m}^2]$ – vnitřní povrch trubky

$t_1, t_2 [^{\circ}\text{C}]$ – teploty protékajících tekutin

$t_{p1}, t_{p2} [^{\circ}\text{C}]$ – teploty obtékaných povrchů

$t_{stř, \log} [^{\circ}\text{C}]$ – střední teplotní logaritmický spád

$\Delta t_{větší}, \Delta t_{menší} [^{\circ}\text{C}]$ – teplotní rozdíly tekutin na vstupu a výstupu

$\eta_z [-]$ – účinnost žebra

$s_t [\text{m}]$ – tloušťka trubky

- viz. [L1, L6]

2.7. Výpočet výměníku pomocí charakteristik

Výměníky charakterizují bezrozměrná čísla, která plní funkci kritérií:

$$\mathcal{G}_1 = \mathcal{G}_L = \frac{\Delta t_1}{\Delta t} = \frac{t_{LE} - t_{LA}}{t_{LE} - t_{WE}} [-] \quad (2.32)$$

$\mathcal{G}_1 [-]$ – bezrozměrná změna teploty tekutiny č.1 (vzduchu)

$$g_2 = g_w = \frac{\Delta t_2}{\Delta t'} = \frac{t_{WA} - t_{WE}}{t_{LE} - t_{WE}} [-] \quad (2.33)$$

g_2 [-] – bezrozměrná změna teploty tekutiny č.2 (vody)

$\Delta t_1, \Delta t_2$ [-] – změna teplot tekutin č.1 a č.2

$\Delta t'$ [-] – rozdíl vstupních teplot obou tekutin

$t_{LE}, t_{LA}, t_{WE}, t_{WA}$ [°C] – teploty vzduchu a vody na vstupu a výstupu

$$N_L = \frac{k \cdot S_e}{C_L^*} [-] \quad (2.34)$$

$$N_w = \frac{k \cdot S_e}{C_w^*} [-] \quad (2.35)$$

$$C_L^* = \dot{m}_L \cdot c_{pL} [\text{W.K}^{-1}] \quad (2.36)$$

$$C_w^* = \dot{m}_w \cdot c_{pw} [\text{W.K}^{-1}] \quad (2.37)$$

$$R_L = \frac{C_L^*}{C_w^*} [-] \quad (2.38)$$

$$R_w = \frac{C_w^*}{C_L^*} [-] \quad (2.39)$$

N_L, N_w [-] – **tepelné charakteristiky výměníku** (ze strany vzduchu a vody)

k [$\text{W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] – součinitel prostupu tepla

S_e [m^2] – celkový vnější povrch výměníku

$C_{L,w}^*$ [W.K^{-1}] - tok tepelné kapacity vzduchu a vody

$\dot{m}_{L,w}$ [kg.s^{-1}] – hmotnostní toky vzduchu a vody

$c_{pL,w}$ [$\text{J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] – měrné tepelné kapacity vzduchu a vody

R_L, R_w [-] – průtokové charakteristiky výměníku (ze strany vzduchu a vody)

$$\Phi_L = f(N_L, R_L)$$

$$\Phi_w = f(N_w, R_w)$$

Φ_L, Φ_w [-] – provozní charakteristiky výměníku (ze strany vzduchu a vody)

Účinnost výměníku je poté rovna provozní charakteristice pro slabší proud ($C_L^* < C_w^*$, $C_L^* > C_w^*$):

Definice účinnosti výměníku pomocí teplot:

$$\eta = \frac{t_{LE} - t_{LA}}{t_{LE} - t_{WE}} [-] \dots \text{pokud } C_L^* < C_w^*, \quad \eta = \frac{t_{WA} - t_{WE}}{t_{LE} - t_{WE}} [-] \dots \text{pokud } C_w^* < C_L^* \quad (2.40)$$

Definice účinnosti výměníku pomocí charakteristik:

- pro souprůdý výměník platí:

$$\eta_L = \frac{1 - e^{[-N_L \cdot (1+R_L)]}}{1 + R_L} [-] \dots \text{pokud } C_L^* < C_w^* \text{ (obdobně pro } C_w^* < C_L^*) \quad (2.41)$$

- pro protiprůdý výměník platí:

$$\eta_L = \frac{1 - e^{[-N_L \cdot (1-R_L)]}}{1 - R_L \cdot e^{[-N_L \cdot (1-R_L)]}} [-] \dots \text{pokud } C_L^* < C_w^* \text{ (obdobně pro } C_w^* < C_L^*) \quad (2.42)$$

- **pro křížový výměník** s nemísícími se tekutinami platí:

$$\eta_L = 1 - e^{-\frac{\eta_{Pom}}{R_L} \cdot N_L^{0,22}} \quad [-] \dots \text{pokud } C'_L < C'_W \text{ (obdobně pro } C'_W < C'_L) \quad (2.43)$$

$$\eta_{Pom} = 1 - e^{(-R_L \cdot N_L^{0,78})} \quad [-] \dots \text{pokud } C'_L < C'_W \text{ (obdobně pro } C'_W < C'_L) \quad (2.44)$$

- viz. [L1]

Výpočty provozních charakteristik slouží k určení výstupních teplot obou tekutin,

pokud známe: - vstupní teploty obou tekutin

- hmotnostní průtoky obou tekutin

- součinitele prostupu tepla

- teplosměnné plochy.

Bilanční rovnice: $Q_L^* = C_L^* \cdot (t_{LE} - t_{LA}) [W] \quad (2.45)$

$$Q_W^* = C_W^* \cdot (t_{WA} - t_{WE}) [W] \quad (2.46)$$

Pokud ($C'_L < C'_W$): $\eta = \frac{t_{LE} - t_{LA}}{t_{LE} - t_{WE}} \rightarrow t_{LA} = t_{LE} - \eta \cdot (t_{LE} - t_{WE}) [^{\circ}C] \quad (2.47)$

Pokud ($C'_L > C'_W$): z rovnosti bilančních rovnic (2.45) a (2.46) plyne:

$$C_L^* \cdot (t_{LE} - t_{LA}) = C_W^* \cdot (t_{WA} - t_{WE})$$

$$(t_{LE} - t_{LA}) = \frac{C_W^*}{C_L^*} \cdot (t_{WA} - t_{WE})$$

$$t_{LA} = t_{LE} - R_W \cdot (t_{WA} - t_{WE}) [^{\circ}C] \quad (2.48)$$

Pokud ($C'_L > C'_W$): $\eta = \frac{t_{WA} - t_{WE}}{t_{LE} - t_{WE}} \rightarrow t_{WA} = t_{WE} + \eta \cdot (t_{LE} - t_{WE}) [^{\circ}C] \quad (2.49)$

Pokud ($C'_L < C'_W$): z rovnosti bilančních rovnic (2.45) a (2.46) plyne:

$$C_L^* \cdot (t_{LE} - t_{LA}) = C_W^* \cdot (t_{WA} - t_{WE})$$

$$(t_{WA} - t_{WE}) = \frac{C_L^*}{C_W^*} \cdot (t_{LE} - t_{LA})$$

$$t_{WA} = t_{WE} + R_L \cdot (t_{LE} - t_{LA}) [^{\circ}C] \quad (2.50)$$

V dalším výpočtu je dále také uveden empirický vztah pro výpočet výstupní teploty vzduchu pomocí vstupních teplot a rychlostí obou tekutin - viz. [L4]:

$$t_{LA} = -1,74 + 4,72 \cdot \ln w_L - 5,15 \cdot w_W + 0,64 \cdot t_{LE} + 0,28 \cdot t_{WE} [^{\circ}C] \quad (2.51)$$

2.8. Výpočetní vztahy pro další termofyzikální veličiny

Fyzikální vlastnosti vody budeme v dalším výpočtu považovat vzhledem k naměřeným teplotám vody za konstantní:

- hustota (pro teplotu 20°C): $\rho_w = 998,2 \text{ kg.m}^{-3}$
- kinematická viskozita (pro teplotu 20°C): $\nu_w = 1,004 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- součinitel tepelné vodivosti (pro teplotu 20°C): $\lambda_w = 0,599 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- měrná tepelná kapacita při konst. tlaku (pro teplotu 20°C): $c_{pw} = 4183 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Prandtlovo číslo: $Pr = 7,00$

Fyzikální vlastnosti vzduchu budeme dále počítat dle následujících empirických vztahů pro suchý vzduch - viz. [L5]:

$$\text{- hustota: } \rho_L = \frac{1,2764}{\left(1 + \frac{t}{273,15}\right) \cdot (-1,744 \cdot 10^{-5} \cdot t + 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot t^2)} [\text{kg.m}^{-3}] \quad (2.52)$$

$$\text{- kinematická viskozita: } \nu_L = \frac{(17,13 + 0,505 \cdot t - 3,004 \cdot 10^{-5} \cdot t^2) \cdot 10^{-6}}{\rho_L} [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.53)$$

$$\text{- souč. tepelné vodivosti: } \lambda_L = (24,19 + 0,0807 \cdot t - 4,1 \cdot 10^{-5} \cdot t^2) \cdot 10^{-3} [\text{W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (2.54)$$

$$\text{- měrná tepelná kapacita při konst. tlaku: } c_{pL} = 1005,8 + 0,0191 \cdot t + 3,94 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 \quad (2.55)$$

$$[\text{J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\text{- teplotní vodivost: } a_L = \frac{\lambda_L}{\rho_L \cdot c_{pL}} [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.56)$$

$$\text{- Prandtlovo číslo: } Pr_L = \frac{\nu_L}{a_L} = \frac{\rho_L \cdot c_{pL} \cdot \nu_L}{\lambda_L} [-] \quad (2.57)$$

- hodnoty tepelných toků:

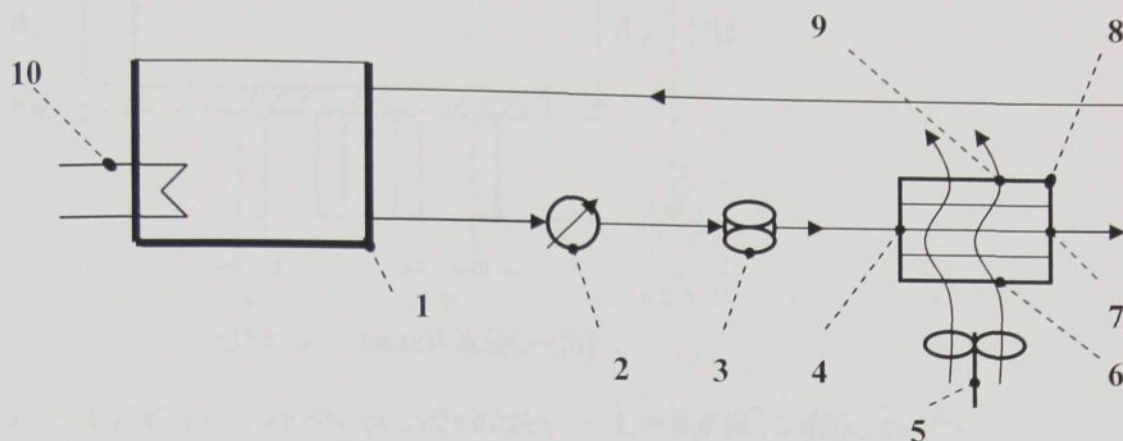
$$Q_L^* = \frac{m_{LE}}{3600} \cdot c_{pL} \cdot (t_{LE} - t_{LA}) [\text{W}] \quad (2.58)$$

$$Q_W^* = \frac{m_W}{3600} \cdot c_{pW} \cdot (t_{WA} - t_{WE}) [\text{W}] \quad (2.59)$$

3) Vlastní měření a výpočet

3.1. Měřicí trať a parametry výměníku

Schéma měřicí tratě:

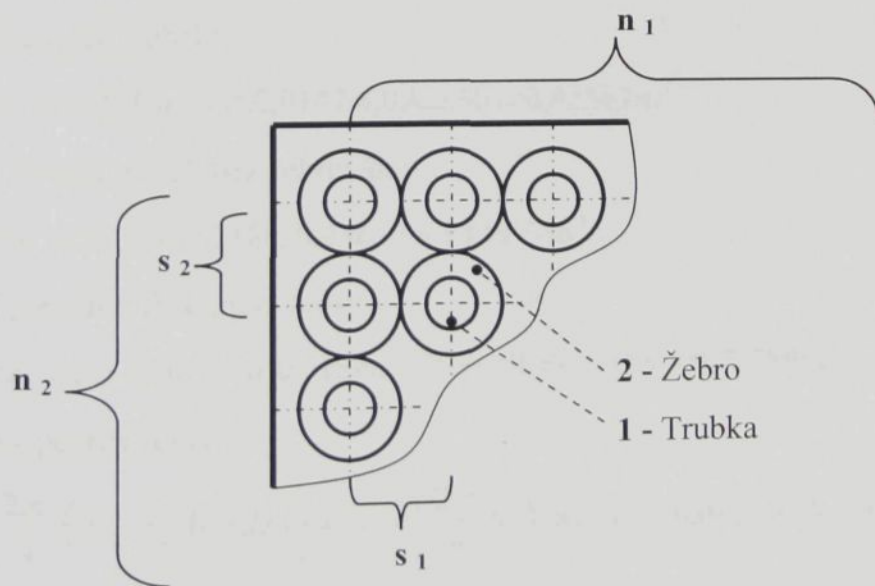


- 1 ... Izolovaný zásobník vody s víkem
 2 ... Čerpadlo
 3 ... Průtokoměr ($\dot{m}_w$)
 4 ... Teploměr (t_{WE})
 5 ... Ventilátor ($\dot{m}_{LE}$)

- 6 ... Teploměr (t_{LE})
 7 ... Teploměr (t_{WA})
 8 ... Výměník tepla
 9 ... Teploměr (t_{LA})
 10 .. Ohřívák vody

Obr. 3-1. Schéma měřicí tratě

Uspořádání trubek ve výměníku:



Obr. 3-2. Uspořádání žebrovaných trubek

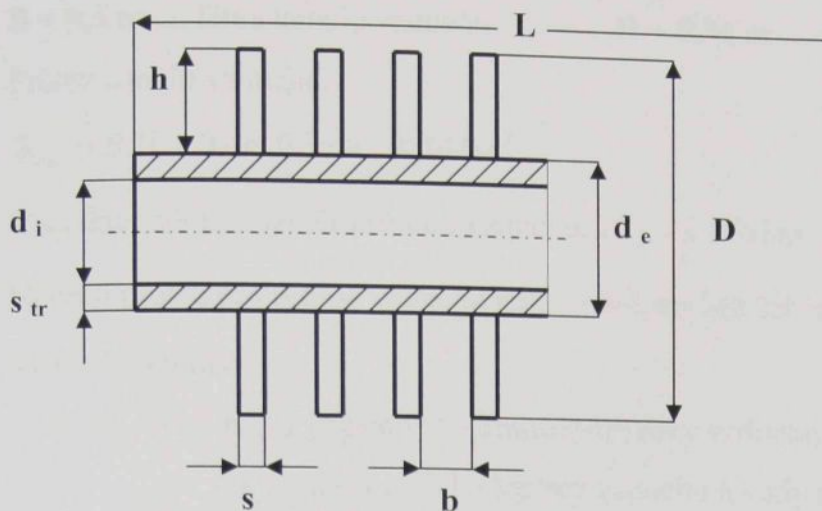
$n_1 = 10$... počet trubek v řadě

$s_1 = 0,04 \text{ m}$... vzdálenost trubek v řadě

$n_2 = 5$... počet řad trubek

$s_2 = 0,04 \text{ m}$... vzdálenost řad trubek

$n_c = 50$... celkový počet trubek



Obr. 3-3. Detail žebrování

$d_i = 0,0147 \text{ m}$... vnitřní průměr trubky

$L = 0,4 \text{ m}$... délka trubky

$d_e = 0,0180 \text{ m}$... vnější průměr trubky

$s = 0,001 \text{ m}$... tloušťka žebra

$D = 0,0387 \text{ m}$... vnější průměr žebra

$b = 0,0026 \text{ m}$... mezera mezi žebry

$s_{tr} = 0,00165 \text{ m}$... tloušťka trubky

$h = 0,01035 \text{ m}$... výška žebra

$n_z = 100$... počet žebor jedné trubky

$s_R = b + s = 0,0036 \text{ m}$... rozteč žebor

- materiál trubky i žebra : **hliník** - $\lambda = 180 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ - součinitel tepelné vodivosti

Vnitřní průřez trubky:

$$S_{i,tr} = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,0147^2 \text{ m}^2}{4} = 0,00017 \text{ m}^2$$

Vnitřní povrch trubek:

$$S_w = S_i = \pi \cdot d_i \cdot L \cdot n_c = \pi \cdot 0,0147 \text{ m} \cdot 0,4 \text{ m} \cdot 50 = 0,92363 \text{ m}^2$$

Vnější povrch trubek bez žebrování:

$$S_o = \pi \cdot d_e \cdot L \cdot n_c = \pi \cdot 0,018 \text{ m} \cdot 0,4 \text{ m} \cdot 50 = 1,13097 \text{ m}^2$$

Vnější povrch trubek mezi žebry:

$$S_t = \pi \cdot d_e \cdot b \cdot (n_z - 1) \cdot n_c = \pi \cdot 0,018 \text{ m} \cdot 0,0026 \text{ m} \cdot (100 - 1) \cdot 50 = 0,72780 \text{ m}^2$$

Celkový povrch žebor:

$$S_z = \left(\frac{2 \cdot \pi}{4} \cdot (D^2 - d_e^2) + \pi \cdot D \cdot s \right) \cdot n_z \cdot n_c = \left(\frac{2 \cdot \pi}{4} \cdot (0,0387^2 \text{ m}^2 - 0,018^2 \text{ m}^2) + \pi \cdot 0,0387 \text{ m} \cdot 0,001 \text{ m} \right) \cdot$$

$$100 \cdot 50 = 9,8260 \text{ m}^2$$

Celkový vnější (obtékáný) povrch:

$$S_e = S_t + S_z = 0,72780 + 9,8260 = 10,5540 \text{ m}^2$$

$$\frac{S_e}{S_i} = \frac{10,5540 \text{ m}^2}{0,92363 \text{ m}^2} = 11,427 [-]$$

B = 0,4 m ... šířka kanálu vzduchu

H = 0,36 m ... výška kanálu vzduchu

Průřez kanálu vzduchu:

$$S_{kan} = B.H = 0,4m.0,36m = \mathbf{0,144m^2}$$

Charakteristický rozměr průtoku vzduchu: $d_{Le} = \mathbf{0,0592m}$

Nejužší průřez pro průtok vzduchu mezi trubkami bez žeber: $S_{et} = \mathbf{0,072m^2}$

Měřené hodnoty:

- $\dot{m}_{L, W} [kg.hod^{-1}]$ – hmotnostní toky vzduchu a vody
- $t_{LE, LA, WE, WA} [^{\circ}C]$ – teploty vzduchu a vody na vstupu a výstupu

3.2. Výpočet výměníku podle naměřených hodnot

Postup výpočtu dle naměřených hodnot - viz. příloha [P1] – číslo měření 3:

1/ Tepelné toky vzduchu a vody (+ střední hodnota a relativní chyba):

$$Q_L = \frac{m_{LE}}{3600} \cdot c_{pL} \cdot (t_{LE} - t_{LA}) = \frac{700kg.hod^{-1}}{3600} \cdot 1006,5J.kg^{-1}.K^{-1} \cdot (30 - 21,2)^{\circ}C = \mathbf{1722,3W}$$

$$Q_W = \frac{m_W}{3600} \cdot c_{pW} \cdot (t_{WA} - t_{WE}) = \frac{240kg.hod^{-1}}{3600} \cdot 4183,0J.kg^{-1}.K^{-1} \cdot (19,6 - 13,1)^{\circ}C = \mathbf{1812,6W}$$

$$\delta(Q) = 5,24\%$$

$$Q_{stř} = \frac{Q_L + Q_W}{2} = \frac{1722,3W + 1812,6W}{2} = \mathbf{1767,45W}$$

2/ Střední hodnoty teplot tekutin:

$$t_{L, stř} = \frac{t_{LE} + t_{LA}}{2} = \frac{30^{\circ}C + 21,2^{\circ}C}{2} = \mathbf{25,6^{\circ}C}$$

$$t_{W, stř} = \frac{t_{WA} + t_{WE}}{2} = \frac{19,6^{\circ}C + 13,1^{\circ}C}{2} = \mathbf{16,35^{\circ}C}$$

3/ Rychlost proudu vody:

$$w_W = \frac{V_W^*}{S_{i, tr}} = \frac{m_W^*}{\rho_W \cdot S_{i, tr}} = \frac{(240/3600)kg.s^{-1}}{998,2kg.m^{-3} \cdot 0,00017m^2} = \mathbf{0,394m.s^{-1}}$$

4/ Reynoldsovo číslo ze strany vody:

$$Re_W = \frac{w_W \cdot d_i}{\nu_W} = \frac{0,394m.s^{-1} \cdot 0,0147m}{1,004 \cdot 10^{-6} m^2.s^{-1}} = \mathbf{5761,7 [-]} \rightarrow \text{jde o turbulentní proudění}$$

5/ Nusseltovo číslo ze strany vody - dle vztahu (2.10):

$$Nu_W = 0,032 \cdot \left[\left(\frac{L}{d_i} \right)^{-0,054} \right] \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,37} = 0,032 \cdot \left[\left(\frac{0,4m}{0,0147m} \right)^{-0,054} \right] \cdot 5761,7^{0,8} \cdot 7,0^{0,37}$$

$$Nu_W = \mathbf{56,07 [-]}$$

6/ Součinitel přestupu tepla ze strany vody:

$$\alpha_w = \frac{Nu_w \cdot \lambda_w}{d_i} = \frac{56,07 \cdot 0,599 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}{0,0147 m} = 2284,96 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

7/ Střední teplotní logaritmický spád - dle vztahu (2.30):

$$\Delta t_{stř, \log} = \frac{(t_{LE} - t_{WA}) - (t_{LA} - t_{WE})}{\ln \frac{(t_{LE} - t_{WA})}{(t_{LA} - t_{WE})}} = \frac{(30^\circ C - 19,6^\circ C) - (21,2^\circ C - 13,1^\circ C)}{\ln \frac{(30^\circ C - 19,6^\circ C)}{(21,2^\circ C - 13,1^\circ C)}} = 9,20^\circ C$$

8/ Součinitel prostupu tepla - dle vztahu (2.29):

$$k = \frac{Q_{stř}^*}{S_e \cdot \Delta t_{stř, \log}} = \frac{1767,5 W}{10,554 m^2 \cdot 9,20 K} = 18,20 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

9/ Součinitel přestupu tepla ze strany vzduchu - dle vztahu (2.31):

$$\alpha_L = \frac{1}{\frac{1}{k} - \frac{1}{\alpha_w} \cdot \frac{S_e}{S_w}} = \frac{1}{\frac{1}{18,2 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}} - \frac{1}{2284,96 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}} \cdot \frac{10,554 m^2}{0,92363 m^2}} = 20,02 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

10/ Účinnost žebra - dle vztahů (2.19) a (2.18) :

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_L}{s \cdot \lambda}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 20,02 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}{0,001 m \cdot 180 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}} = 14,915 m^{-1}$$

$$\eta_z = \frac{tgh(m \cdot h)}{m \cdot h} = \frac{tgh(14,915 m^{-1} \cdot 0,01035 m)}{14,915 m^{-1} \cdot 0,01035 m} = \frac{0,15315127}{0,15436582} = 0,99 [-]$$

11/ Rychlost vzduchu:

$$w_L = \frac{V_L^*}{S_{kan}} = \frac{m_{LE}^*}{\rho_L \cdot S_{kan}} = \frac{(700 / 3600) kg \cdot s^{-1}}{1,168 kg \cdot m^{-3} \cdot 0,144 m^2} = 1,157 m \cdot s^{-1}$$

12/ Reynoldsovo číslo ze strany vzduchu:

$$Re_L = \frac{w_L \cdot d_{Le}}{\nu_L} = \frac{1,157 m \cdot s^{-1} \cdot 0,0592 m}{1,576 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}} = 4343,7 [-]$$

13/ Nusseltovo číslo ze strany vzduchu:

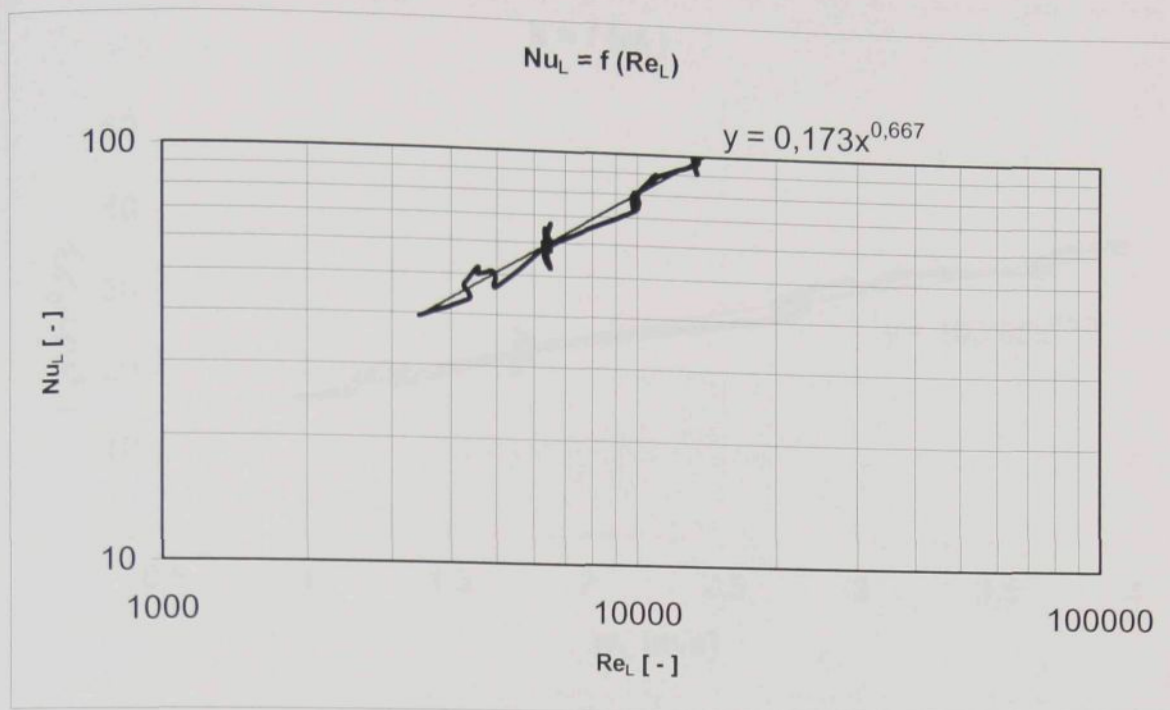
$$Nu_L = \frac{\alpha_L \cdot d_{Le}}{\lambda_L} = \frac{20,02 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot 0,0592 m}{0,0262 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}} = 45,19 [-]$$

Všechny naměřené (celkem 45 měření) a vypočtené hodnoty měřeného výměníku jsou uvedeny v příloze - viz. příloha [P1]. Z výsledků byly sestrojeny závislosti :

$Nu_L = f(Re_L)$ + proložení křivky a získání exponentů **C** a **m** - viz. příloha [P3]

$\alpha_L = f(w_L)$ + proložení křivky a získání exponentů - viz. příloha [P4]

$k = f(w_L)$ + proložení křivky a získání exponentů - viz. příloha [P5] .



Obr. 3-4. Závislost $Nu_L = f(Re_L)$

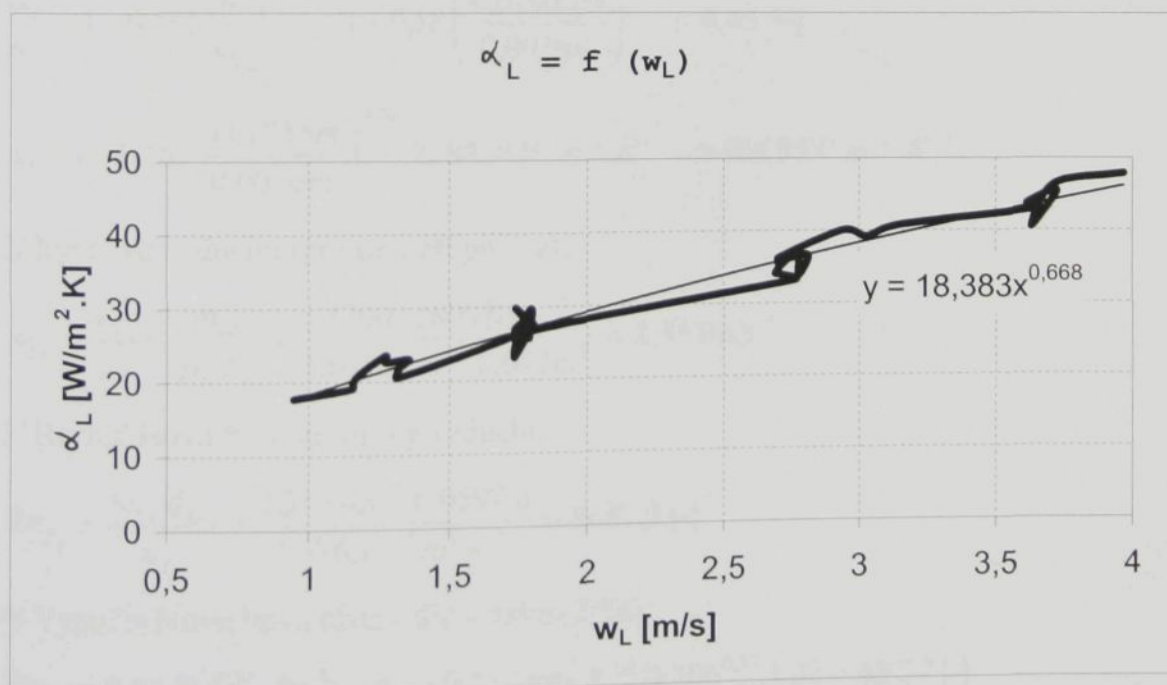
Proložení křivky mocninnou spojnicí trendu získáme : $y = 0,173x^{0,667} \rightarrow$

$$Nu_L = C \cdot Re_L^m = 0,173 \cdot Re_L^{0,667} \dots \text{vlastní kritériální rovnice} \quad (2.60)$$

Pro měření číslo 3: $Nu_{L,rce} = 0,173 \cdot 4343,7^{0,667} = 46,19 [-]$ (vypočteno $Nu_L = 45,19 [-]$).

Maximální relativní chyba ze všech měření $Nu_L - Nu_{L,rce}$ činí : $\delta_{\max} = 16,1\%$ (měř. č.27).

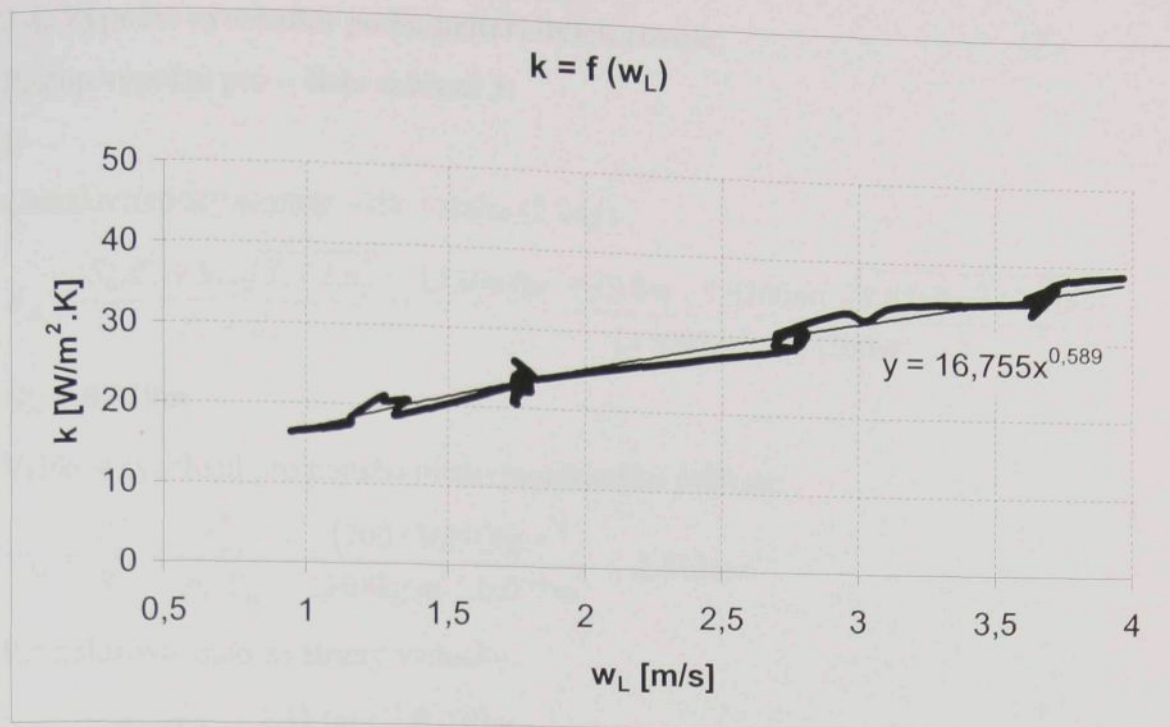
Průměrná hodnota relativní chyby $Nu_L - Nu_{L,rce}$ je však : $\delta_{\text{stř}} = 3,7\%$.



Obr. 3-5. Závislost $\alpha_L = f(w_L)$

Proložení křivky mocninnou spojnicí trendu získáme : $y = 18,383x^{0,668} \rightarrow$

$$\alpha_L = 18,383 \cdot w_L^{0,668} \quad (2.61)$$



Obr. 3-6. Závislost $k = f(w_L)$

Proložením křivky mocninou spojnicí trendu získáme : $y = 16,755x^{0,589} \rightarrow$
 $k = 16,755 \cdot w_L^{0,589}$

(2.62)

3.3. Výpočet výměníku podle normy VDI (SRN):

Postup výpočtu pro – číslo měření 3:

1/ Výpočet součinitele přestupu tepla žebrovaných trubek - dle vztahu (2.27):

$$\frac{\alpha_z}{\alpha_w} = 1 - 0,18 \cdot \left(\frac{h}{s_R} \right)^{0,63} = 1 - 0,18 \cdot \left(\frac{0,01035m}{0,0036m} \right)^{0,63} = 0,65 [-]$$

$$\alpha_z = 1 - 0,18 \cdot \left(\frac{0,01035m}{0,0036m} \right)^{0,63} \cdot 2284,96 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} = 1484,95 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

2/ Rychlost vzduchu (pro nejužší průřez):

$$w_{Le} = \frac{V_L^*}{S_{et}} = \frac{m_{LE}^*}{\rho_L \cdot S_{et}} = \frac{(700/3600) kg \cdot s^{-1}}{1,168 kg \cdot m^{-3} \cdot 0,072 m^2} = 2,313 m \cdot s^{-1}$$

3/ Reynoldsovo číslo ze strany vzduchu:

$$Re_{Le} = \frac{w_{Le} \cdot d_{Le}}{\nu_L} = \frac{2,313 m \cdot s^{-1} \cdot 0,0592 m}{1,576 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}} = 8687,5 [-]$$

4/ Výpočet Nusseltova čísla - dle vztahu (2.28):

$$Nu_{Le} = 0,21 \cdot Re_{Le}^{0,61} \cdot Pr_L^{0,33} \cdot f_a = 0,21 \cdot 8685,3^{0,61} \cdot 0,706^{0,33} \cdot 1,02 = 48,27 [-]$$

($Nu_L = 45,19 [-]$ – dle vlastního výpočtu).

Maximální relativní chyba ze všech měření $Nu_L - Nu_{L, VDI}$ činí: $\delta_{max} = 15,7\%$.

Průměrná hodnota relativní chyby $Nu_L - Nu_{L, VDI}$ je však : $\delta_{stř} = 4,3\%$.

Diplomová práce

3.4. Výpočet výměníku podle kritériálních rovnic:

Postup výpočtu pro – číslo měření 3:

I/

Charakteristický rozměr – dle vztahu (2.24) :

$$d_{ch} = \frac{S_o \cdot d_e + S_z \cdot \sqrt{S_z / 2 \cdot n_z}}{S_o + S_z} = \frac{1,13097m^2 \cdot 0,018m + 9,8260m^2 \cdot \sqrt{9,8260m^2 / 2 \cdot 5000}}{1,13097m^2 + 9,8260m^2}$$

$$d_{ch} = 0,030m$$

Velikost rychlosti pro nejužší místo protékaného průřezu:

$$w_{Le} = \frac{V_L^*}{S_{et}} = \frac{m_{LE}^*}{\rho_L \cdot S_{et}} = \frac{(700 / 3600)kg \cdot s^{-1}}{1,168kg \cdot m^{-3} \cdot 0,072m^2} = 2,313m \cdot s^{-1}$$

Reynoldsovo číslo ze strany vzduchu:

$$Re_{Le} = \frac{w_{Le} \cdot d_{ch}}{\nu_L} = \frac{2,313m \cdot s^{-1} \cdot 0,030m}{1,576 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}} = 4402,4 [-]$$

Nusseltovo číslo – dle vztahu (2.22):

$$Nu_L = 0,251 \cdot Re_{Le}^{0,67} = 0,251 \cdot 4402,4^{0,67} = 69,33 [-] \quad (Nu_L = 45,19 [-])$$

Maximální relativní chyba ze všech měření $Nu_L - Nu_{L,1}$ činí: $\delta_{\max} = 42,7\%$.

Průměrná hodnota relativní chyby $Nu_L - Nu_{L,1}$ je: $\delta_{\text{str}} = 33,6\%$.

II/

Charakteristický rozměr – dle vztahu (2.24) :

$$d_{ch} = 0,030m$$

Velikost rychlosti pro nejužší místo protékaného průřezu:

$$w_{Le} = 2,313m \cdot s^{-1}$$

Reynoldsovo číslo ze strany vzduchu:

$$Re_{Le} = \frac{w_{Le} \cdot d_{ch}}{\nu_L} = \frac{2,313m \cdot s^{-1} \cdot 0,030m}{1,576 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}} = 4402,4 [-]$$

Nusseltovo číslo – dle vztahu (2.23):

$$Nu = 2,147 \cdot Re^{0,46} \cdot \left(\frac{s_2 - d_e}{d_e} \right)^{-0,2} \cdot \left(\frac{s_2 - d_e}{b} + 1 \right)^{-0,2} = 2,147 \cdot 4402,4^{0,46} \cdot \left(\frac{0,04m - 0,018m}{0,018m} \right)^{-0,2} \cdot \left(\frac{0,04m - 0,018m}{0,0026m} + 1 \right)^{-0,2} = 62,42 [-]$$

($Nu_L = 45,19 [-]$ – dle vlastního výpočtu)

Maximální relativní chyba ze všech měření $Nu_L - Nu_{L, II}$ činí: $\delta_{\max} = 30,8\%$.

Průměrná hodnota relativní chyby $Nu_L - Nu_{L, II}$ je: $\delta_{\text{stř}} = 17,4\%$.

III/

Rychlost vzduchu:

$$w_L = \frac{V_L^*}{S_{kan}} = \frac{m_{LE}^*}{\rho_L \cdot S_{kan}} = \frac{(700/3600) \text{ kg.s}^{-1}}{1,168 \text{ kg.m}^{-3} \cdot 0,144 \text{ m}^2} = 1,157 \text{ m.s}^{-1}$$

Reynoldsovo číslo ze strany vzduchu:

$$Re_L = \frac{w_L \cdot d_{Le}}{\nu_L} = \frac{1,157 \text{ m.s}^{-1} \cdot 0,0592 \text{ m}}{1,576 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}} = 4343,7 \text{ [-]}$$

Prandtlovo číslo: $Pr_L = 0,706 \text{ [-]}$

Součinitel C pro trubky za sebou $C = 0,124$

Nusseltovo číslo – dle vztahu (2.25):

$$Nu_L = C \cdot Re_L^{0,625} \cdot Pr_L^{0,33} \cdot \left(\frac{b}{s_2} \right)^{0,214} = 0,124 \cdot 4343,7^{0,625} \cdot 0,706^{0,33} \cdot \left(\frac{0,0026 \text{ m}}{0,04 \text{ m}} \right)^{0,214} = 11,57 \text{ [-]}$$

($Nu_L = 45,19 \text{ [-]}$ – dle vlastního výpočtu)

Maximální relativní chyba ze všech měření $Nu_L - Nu_{L, III}$ činí: $\delta_{\max} = 77,8\%$.

Průměrná hodnota relativní chyby $Nu_L - Nu_{L, III}$ je: $\delta_{\text{stř}} = 75,4\%$.

IV/

Rychlost vzduchu:

$$w_L = \frac{V_L^*}{S_{kan}} = \frac{m_{LE}^*}{\rho_L \cdot S_{kan}} = \frac{(700/3600) \text{ kg.s}^{-1}}{1,168 \text{ kg.m}^{-3} \cdot 0,144 \text{ m}^2} = 1,157 \text{ m.s}^{-1}$$

Reynoldsovo číslo ze strany vzduchu:

$$Re_L = \frac{w_L \cdot d_{Le}}{\nu_L} = \frac{1,157 \text{ m.s}^{-1} \cdot 0,0592 \text{ m}}{1,576 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}} = 4343,7 \text{ [-]}$$

Prandtlovo číslo: $Pr_L = 0,706 \text{ [-]}$

Nusseltovo číslo – dle vztahu (2.26):

Součinitel C' pro trubky za sebou $C' = 0,26$

$$Nu = C' \cdot Re_L^{0,625} \cdot Pr_L^{0,33} \cdot \left(\frac{S_e}{S_o} \right)^{0,375} = 0,26 \cdot 4343,7^{0,625} \cdot 0,706^{0,33} \cdot \left(\frac{10,554 \text{ m}^2}{1,13097 \text{ m}^2} \right)^{0,375} =$$

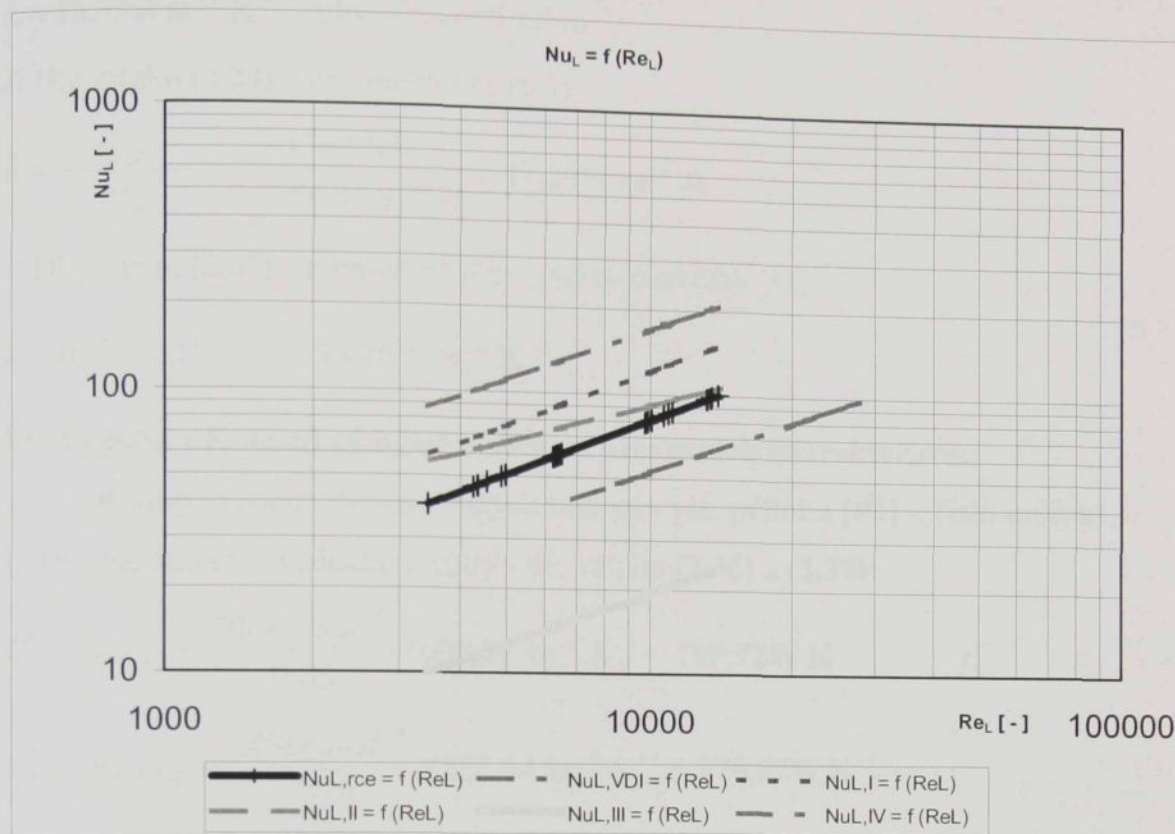
$$Nu = 100,58 \text{ [-]} \quad (Nu_L = 45,19 \text{ [-]} \text{ – dle vlastního výpočtu})$$

Maximální relativní chyba ze všech měření $Nu_L - Nu_{L, IV}$ činí: $\delta_{\max} = 59,8\%$.

Průměrná hodnota relativní chyby $Nu_L - Nu_{L, IV}$ je: $\delta_{\text{stř}} = 53,1\%$.

Vhodnost použití jednotlivých kritériálních rovnic pro měřený výměník vyplývá z přehledu závislosti $Nu_L = f(Re_L)$ na obr. 3-7, vzhledem k závislosti:

$Nu_L = 0,173 \cdot Re_L^{0,667}$ – spojnice trendů z vypočtených hodnot.



Obr. 3-7. Přehled závislostí $Nu_L = f(Re_L)$

Výsledky :

Jako nejpresnější metoda výpočtu pro měřený výměník, vzhledem k vypočteným hodnotám Nusseltova čísla, se jeví kritériální rovnice dle německé normy

VDI : $Nu_{Le} = 0,21 \cdot Re_{Le}^{0,61} \cdot Pr_L^{0,33} \cdot f_a$, s průměrnou relativní chybou: $\delta_{stř} = 4,3\%$.

Další poměrně přesnou rovnicí je vztah - viz. [L7]:

$$Nu = 2,147 \cdot Re^{0,46} \cdot \left(\frac{s_2 - d_e}{d_e} \right)^{-0,2} \cdot \left(\frac{s_2 - d_e}{b} + 1 \right)^{-0,2}, \text{ s prům. relativní chybou: } \delta_{stř} = 17,4\%.$$

Jako naprosto nevyhovující pro tento typ výměníku vyšla kritériální rovnice - viz. [L1]:

$$Nu_L = C \cdot Re_L^{0,625} \cdot Pr_L^{0,33} \cdot \left(\frac{b}{s_2} \right)^{0,214}, \text{ s průměrnou relativní chybou: } \delta_{stř} = 75,4\%.$$

3.5. Výpočet součinitele prostupu tepla:

1/ Dle vztahu (2.31) – pro měření číslo 3:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_w} \cdot \frac{S_e}{S_i} + \frac{1}{\alpha_L \cdot \eta_z}} = \frac{1}{\frac{1}{2284,96 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}} \cdot \frac{10,5540 m^2}{0,92363 m^2} + \frac{1}{20,02 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot 0,99}}$$

$k = 18,03 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ - vliv účinnosti žebra

2/ Dle vztahu (2.29) – pro měření číslo 3:

$$k = \frac{Q_{stř}^*}{S_e \cdot \Delta t_{stř, \log}} = \frac{1767,5 W}{10,554 m^2 \cdot 9,20 K} = 18,20 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

3/ Dle vztahu (2.62), spojnice trendu – pro měření číslo 3:

$$k = 16,755 \cdot 1,157^{0,589} = 18,26 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

3.6. Výpočet účinnosti výměníku pomocí provozních charakteristik:

Postup výpočtu dle naměřených hodnot - viz. příloha [P1] – číslo měření 3:

1/ Tepelné kapacity vzduchu a vody - dle vztahu (2.36) a (2.37):

$$C_L^* = m_L^* \cdot c_{PL} = \frac{700 kg \cdot hod^{-1}}{3600} \cdot 1006,5 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1} = 195,72 W \cdot K^{-1}$$

$$C_W^* = m_W^* \cdot c_{PW} = \frac{240 kg \cdot hod^{-1}}{3600} \cdot 4183,0 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1} = 278,87 W \cdot K^{-1}$$

$$C_L^* < C_W^*$$

2/ Průtokové charakt. výměníku ze strany vzduchu a vody - dle vztahu (2.38) a (2.39):

$$R_L = \frac{C_L^*}{C_W^*} = \frac{195,72 W \cdot K^{-1}}{278,87 W \cdot K^{-1}} = 0,70 [-]$$

$$R_W = \frac{C_W^*}{C_L^*} = \frac{278,87 W \cdot K^{-1}}{195,72 W \cdot K^{-1}} = 1,42 [-]$$

3/ Tepelné charakt. výměníku ze strany vzduchu a vody - dle vztahu (2.34) a (2.35):

$$N_L = \frac{k \cdot S_e}{C_L^*} = \frac{18,20 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot 10,554 m^2}{195,72 W \cdot K^{-1}} = 0,98 [-]$$

$$N_W = \frac{k \cdot S_e}{C_W^*} = \frac{18,20 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot 10,554 m^2}{278,87 W \cdot K^{-1}} = 0,69 [-]$$

4/ Účinnost výměníku pro slabší proud vzduchu ($C_L^* < C_W^*$):

a) Pomocí naměřených teplot - dle vztahu (2.40):

$$\eta = \frac{t_{LE} - t_{LA}}{t_{LE} - t_{WE}} = \frac{30^\circ C - 21,2^\circ C}{30^\circ C - 13,1^\circ C} = 0,52 [-] \rightarrow \eta = 52\%$$

b) Pomocí charakteristik - dle vztahu (2.44) a (2.43):

$$\eta_{Pom} = 1 - e^{(-R_L \cdot N_L^{0,78})} = 1 - e^{(-0,70 \cdot 0,98^{0,78})} = 0,50 [-]$$

$$\eta_L = 1 - e^{\frac{\eta_{Pom} \cdot N_L^{0,22}}{R_L}} = 1 - e^{\frac{0,50}{0,70} \cdot 0,98^{0,22}} = 0,51 [-] \rightarrow \eta = 51\%$$

4' / Účinnost výměníku pro slabší proud vody ($C'_w < C'_L$) – např. měření číslo 10:

$$C_L^* = 288,09 \text{ W.K}^{-1}, \quad C_W^* = 246,3 \text{ W.K}^{-1} \rightarrow C'_w < C'_L$$

$$R_L = 1,17 [-], \quad R_W = 0,86 [-]$$

$$N_L = 0,84 [-], \quad N_W = 0,98 [-]$$

a) Pomocí naměřených teplot - dle vztahu (2.40):

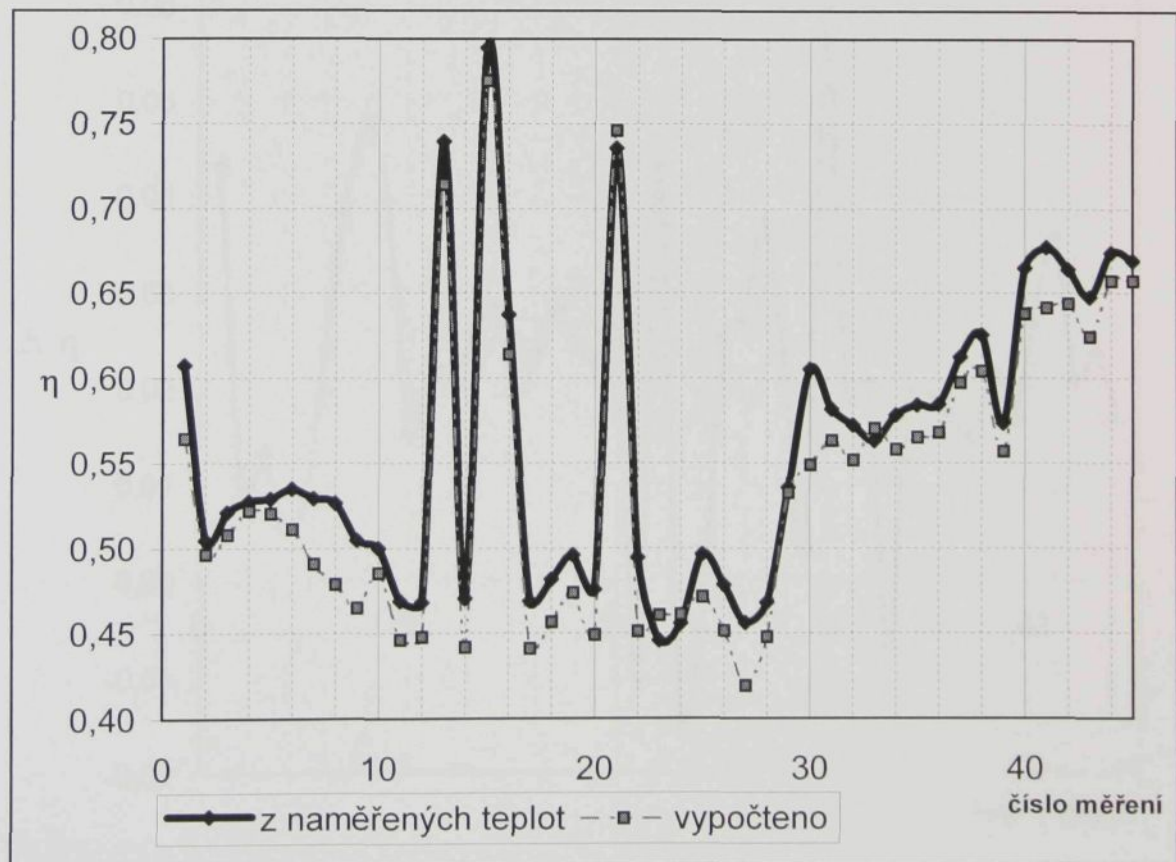
$$\eta = \frac{t_{WA} - t_{WE}}{t_{LE} - t_{WE}} = \frac{26,7^\circ\text{C} - 13,0^\circ\text{C}}{40,4^\circ\text{C} - 13,0^\circ\text{C}} = 0,50 [-] \rightarrow \eta = 50\%$$

b) Pomocí charakteristik - dle vztahu (2.44) a (2.43):

$$\eta_{Pom} = 1 - e^{(-R_W \cdot N_W^{0,78})} = 1 - e^{(-0,86 \cdot 0,98^{0,78})} = 0,57 [-]$$

$$\eta_L = 1 - e^{\frac{\eta_{Pom} \cdot N_W^{0,22}}{R_W}} = 1 - e^{\frac{0,57}{0,86} \cdot 0,98^{0,22}} = 0,49 [-] \rightarrow \eta = 49\%$$

Všechny vypočtené hodnoty měřeného výměníku jsou uvedeny v příloze - viz. příloha [P2]. Z výsledků byl sestrojen následující graf:



Obr. 3-8. Účinnosti měřeného výměníku

Z Obr. 3-8. jsou patrné čtyři vysoké hodnoty účinnosti zařízení η – měření č.: 13, 15, 16 a 21. Tyto vysoké hodnoty účinnosti byly způsobeny velmi malým protékajícím množstvím vody m'_w , a proto teplý proudící vzduch dokázal ohřát množství vody na vyšší teploty než v ostatních případech.

Průběh účinnosti se dá rozdělit do tří etap:

1/ Měření č. 1 ÷ 12: Klesající průběh účinnosti zařízení z důvodů nárůstu vstupní teploty vody, při přibližně konstantních vstupních hodnotách teploty vzduchu.

2/ Měření č. 13 ÷ 28: Přibližně konstantní průběh účinnosti výměníku (kromě špiček).

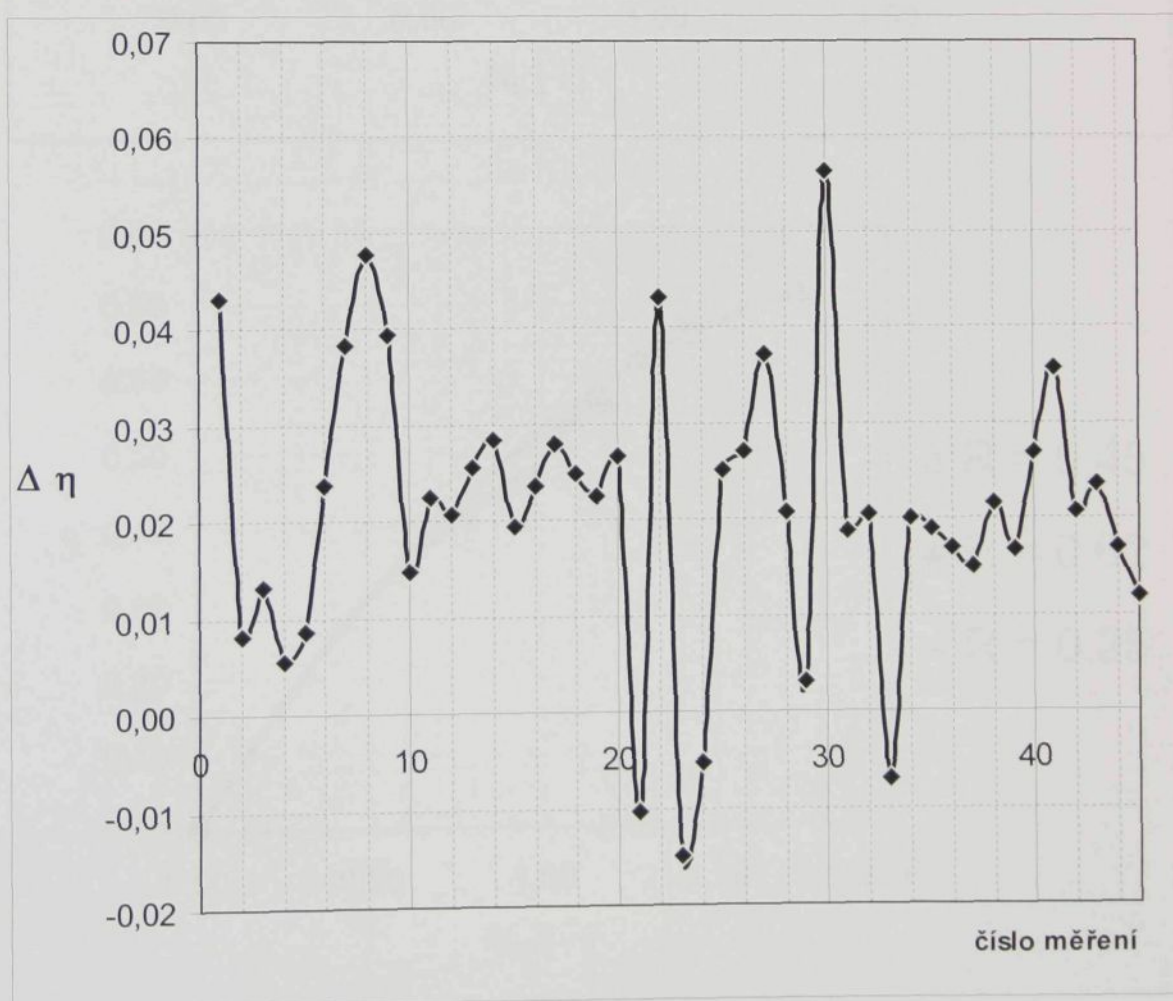
3/ Měření č. 29 ÷ 45: Rostoucí průběh účinnosti zařízení způsobený skokovou změnou množství proudícího vstupního vzduchu m'_{LE} .

Průměrná vypočtená hodnota účinnosti měřeného výměníku tepla je :

$\eta = 56\%$... z naměřených teplot proudících tekutin ($\eta = 50\%$... bez špiček)

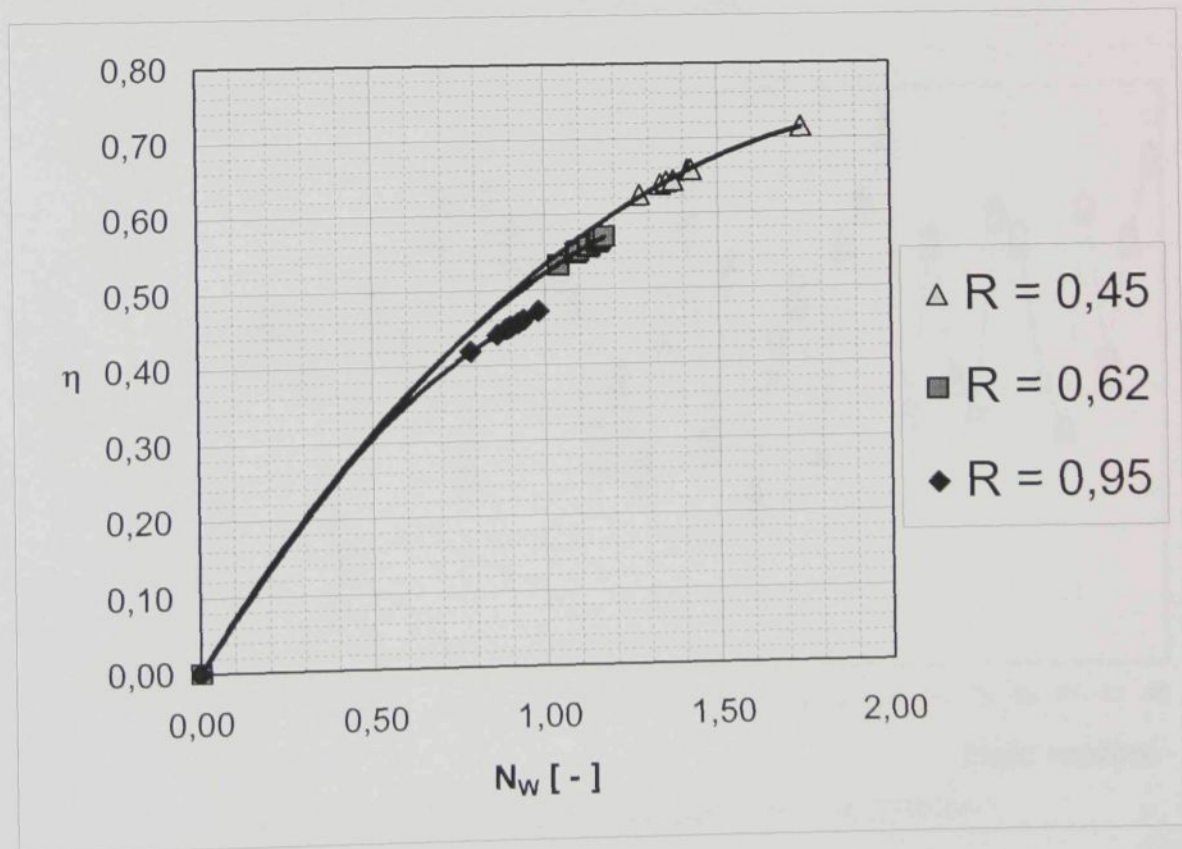
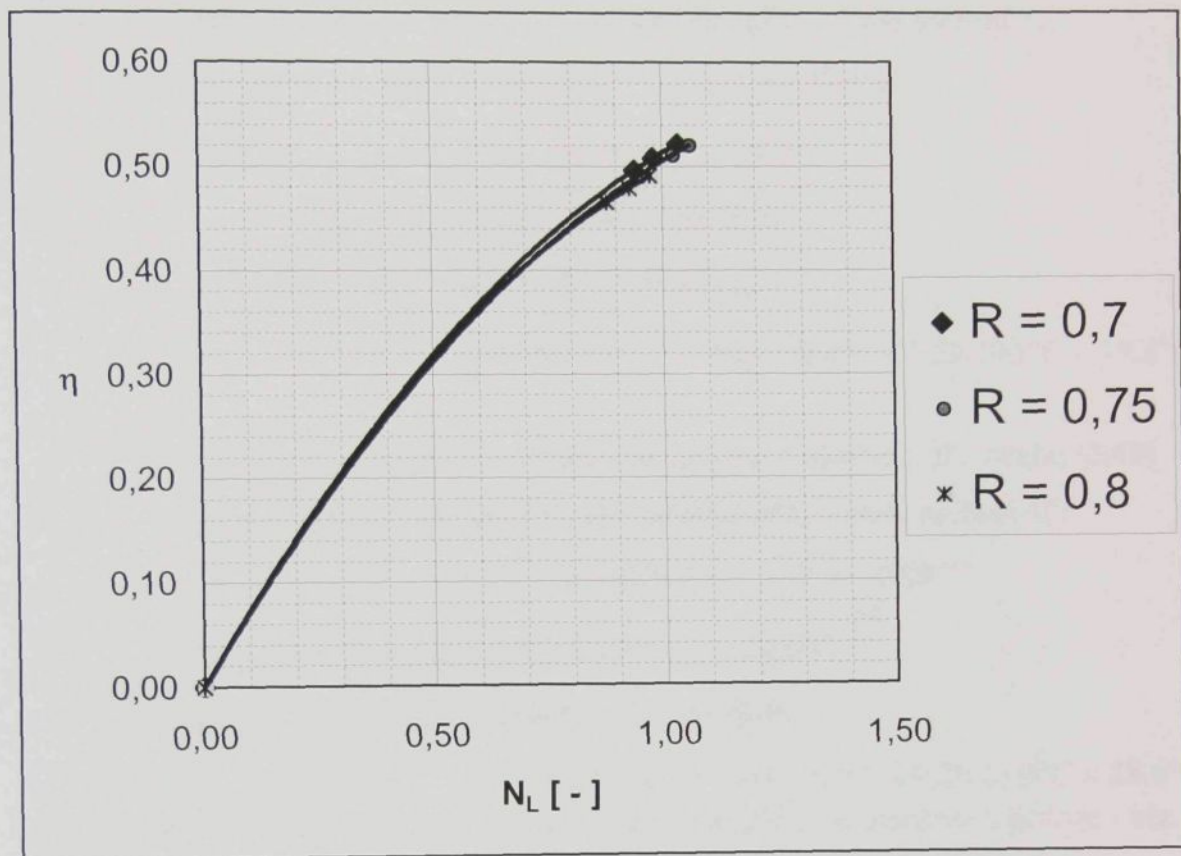
$\eta = 54\%$... z provozních charakteristik výměníku ($\eta = 48\%$... bez špiček).

Maximální odchylka účinností zjištěných pomocí teplot tekutin anebo pomocí provozních charakteristik činí max. 5,6% (měření číslo 30) – viz. Obr.3-9.



Obr. 3-9. Odchylky účinností

Pro snazší orientaci lze provozní charakteristiky výměníku – průtokovou R a tepelnou N zanést do společného grafu spolu s účinností η (rozděleno podle druhu slabšího proudu):



Obr. 3-10. Závislosti η - R - N

Diplomová práce

3.7. Kontrolní výpočet výstupních teplot tekutin

a/ Výstupní teplota proudícího vzduchu:

Pokud ($C^*_L < C^*_w$): výstupní teplota proudícího vzduchu – dle vztahu (2.47)

Postup výpočtu dle naměřených hodnot - viz. příloha [P1] – číslo měření 3:

$$t_{LA,výp} = t_{LE} - \eta \cdot (t_{LE} - t_{WE}) = 30^\circ C - 0,51 \cdot (30^\circ C - 13,1^\circ C) = 21,4^\circ C$$

- skutečná naměřená výstupní teplota vzduchu: $t_{LA} = 21,2^\circ C$

- výstupní teplota vzduchu – dle vztahu (2.51) - viz. [L4]:

$$t_{LA} = -1,74 + 4,72 \cdot \ln w_L - 5,15 \cdot w_W + 0,64 \cdot t_{LE} + 0,28 \cdot t_{WE}$$

$$t_{LA} = -1,74 + 4,72 \cdot \ln 1,157 m \cdot s^{-1} - 5,15 \cdot 0,394 m \cdot s^{-1} + 0,64 \cdot 30,0^\circ C + 0,28 \cdot 13,1^\circ C = 19,8^\circ C$$

Pokud ($C^*_L > C^*_w$): výstupní teplota proudícího vzduchu – dle vztahu (2.48)

Postup výpočtu dle naměřených hodnot - viz. příloha [P1] – číslo měření 10:

$$t_{LA,výp} = t_{LE} - R_W \cdot (t_{WA} - t_{WE}) = 40,4^\circ C - 0,86 \cdot (26,7^\circ C - 13^\circ C) = 29,0^\circ C$$

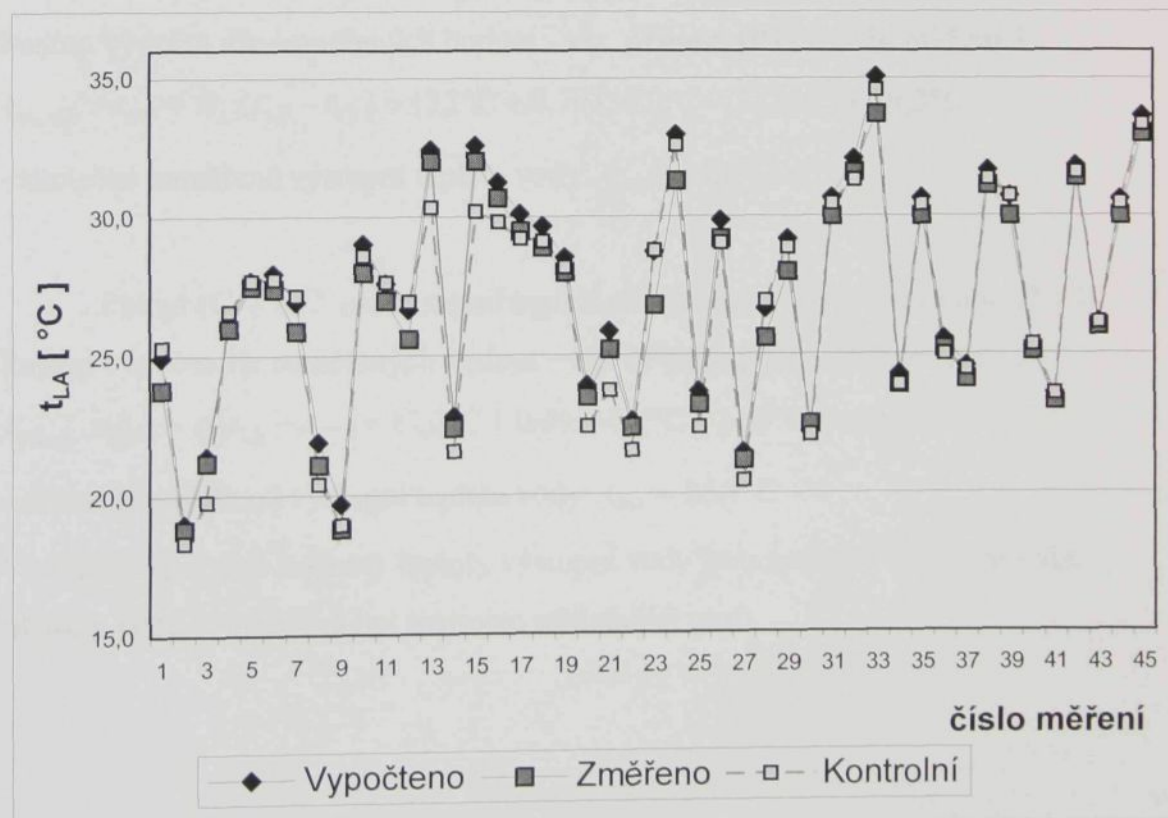
- skutečná naměřená výstupní teplota vzduchu: $t_{LA} = 28,0^\circ C$

- výstupní teplota vzduchu – dle vztahu (2.51) - viz. [L4]:

$$t_{LA} = -1,74 + 4,72 \cdot \ln 1,751 m \cdot s^{-1} - 5,15 \cdot 0,348 m \cdot s^{-1} + 0,64 \cdot 40,4^\circ C + 0,28 \cdot 13,0^\circ C = 28,6^\circ C$$

Všechny vypočtené hodnoty teploty výstupního vzduchu jsou uvedeny v příloze - viz.

příloha [P2]. Z výsledků byl sestrojen následující graf:

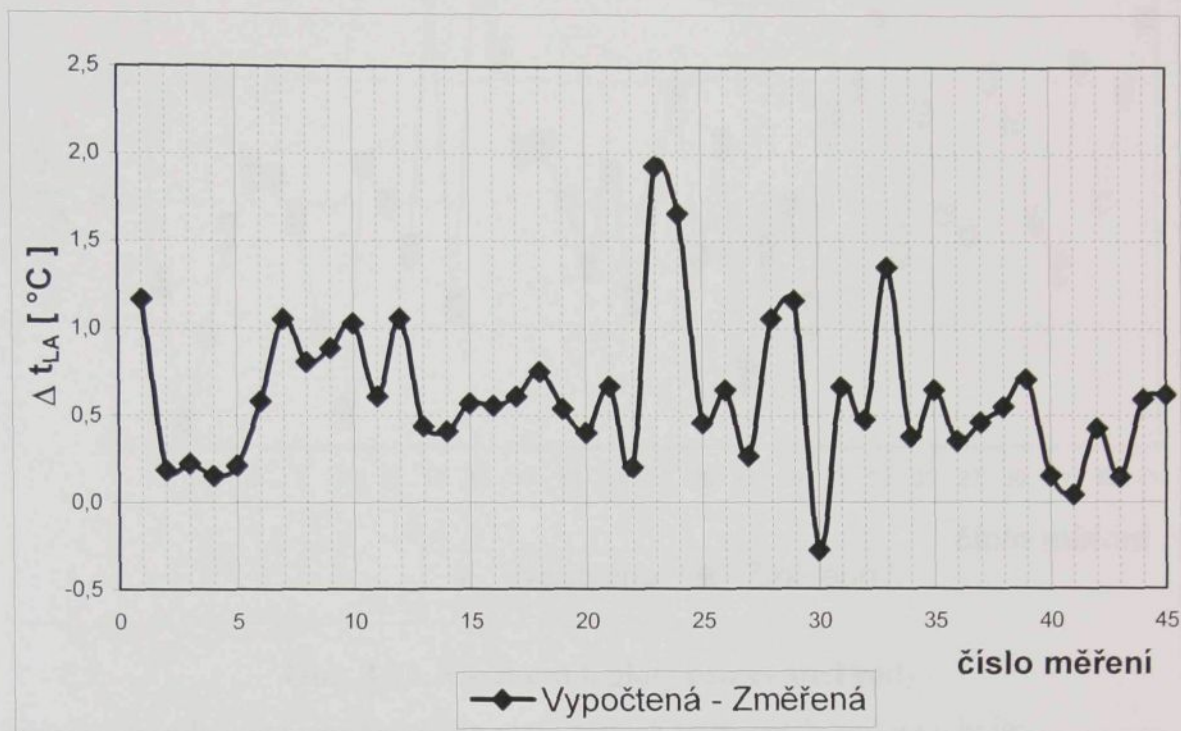


Obr. 3-11. Výstupní teploty proudícího vzduchu

Diplomová práce

Maximální odchylka naměřených a vypočtených výstupních teplot vzduchu je:

$\Delta t_{LA,max} = 1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (měření číslo 23), průměrná odchylka je rovna $\Delta t_{LA,stř} = 0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 3-12. Odchylky teplot proudícího vzduchu

b/ Výstupní teplota protékající vody:

Pokud ($C^*_L < C^*_w$): výstupní teplota protékající vody – dle vztahu (2.50)

Postup výpočtu dle naměřených hodnot - viz. příloha [P1] – číslo měření 3:

$$t_{WA,výp} = t_{WE} + R_L \cdot (t_{LE} - t_{LA}) = 13,1^{\circ}\text{C} + 0,70 \cdot (30,0^{\circ}\text{C} - 21,2^{\circ}\text{C}) = 19,3^{\circ}\text{C}$$

- skutečná naměřená výstupní teplota vody: $t_{WA} = 19,6^{\circ}\text{C}$

Pokud ($C^*_L > C^*_w$): výstupní teplota protékající vody – dle vztahu (2.49)

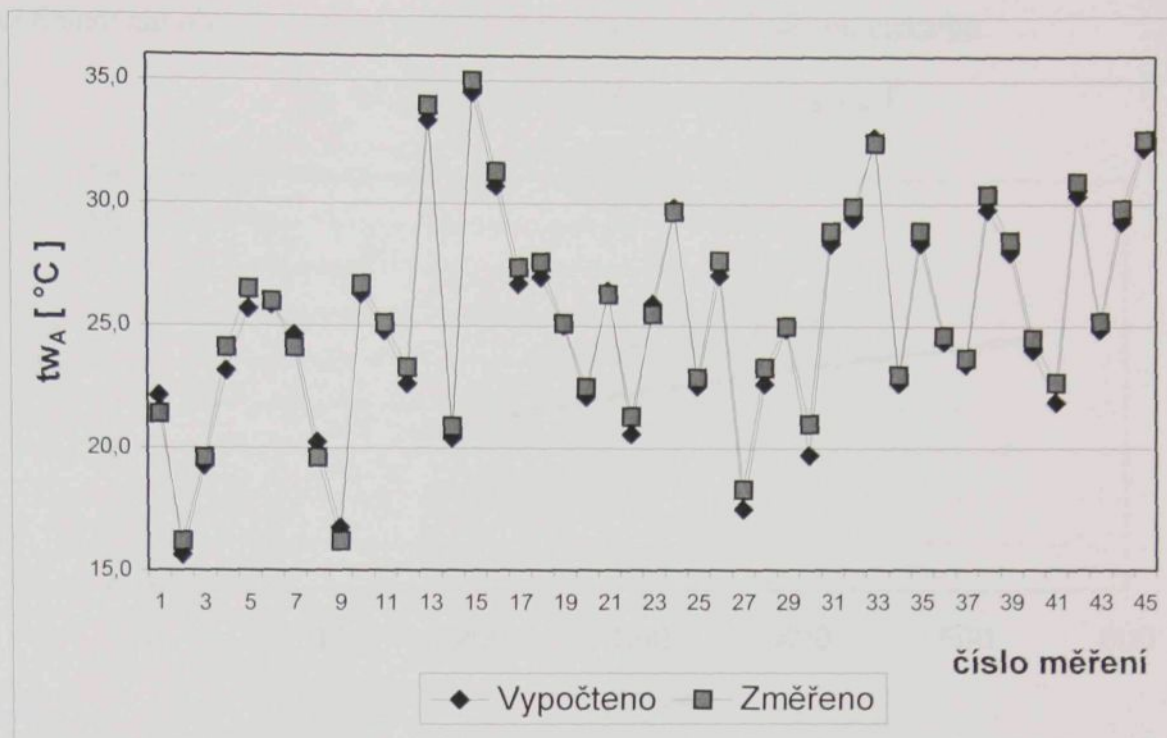
Postup výpočtu dle naměřených hodnot - viz. příloha [P1] – číslo měření 10:

$$t_{WA,výp} = t_{WE} + \eta \cdot (t_{LE} - t_{WE}) = 13,0^{\circ}\text{C} + 0,49 \cdot (40,4^{\circ}\text{C} - 13,0^{\circ}\text{C}) = 26,3^{\circ}\text{C}$$

- skutečná naměřená výstupní teplota vody: $t_{WA} = 26,7^{\circ}\text{C}$

Všechny vypočtené hodnoty teploty výstupní vody jsou uvedeny v příloze - viz.

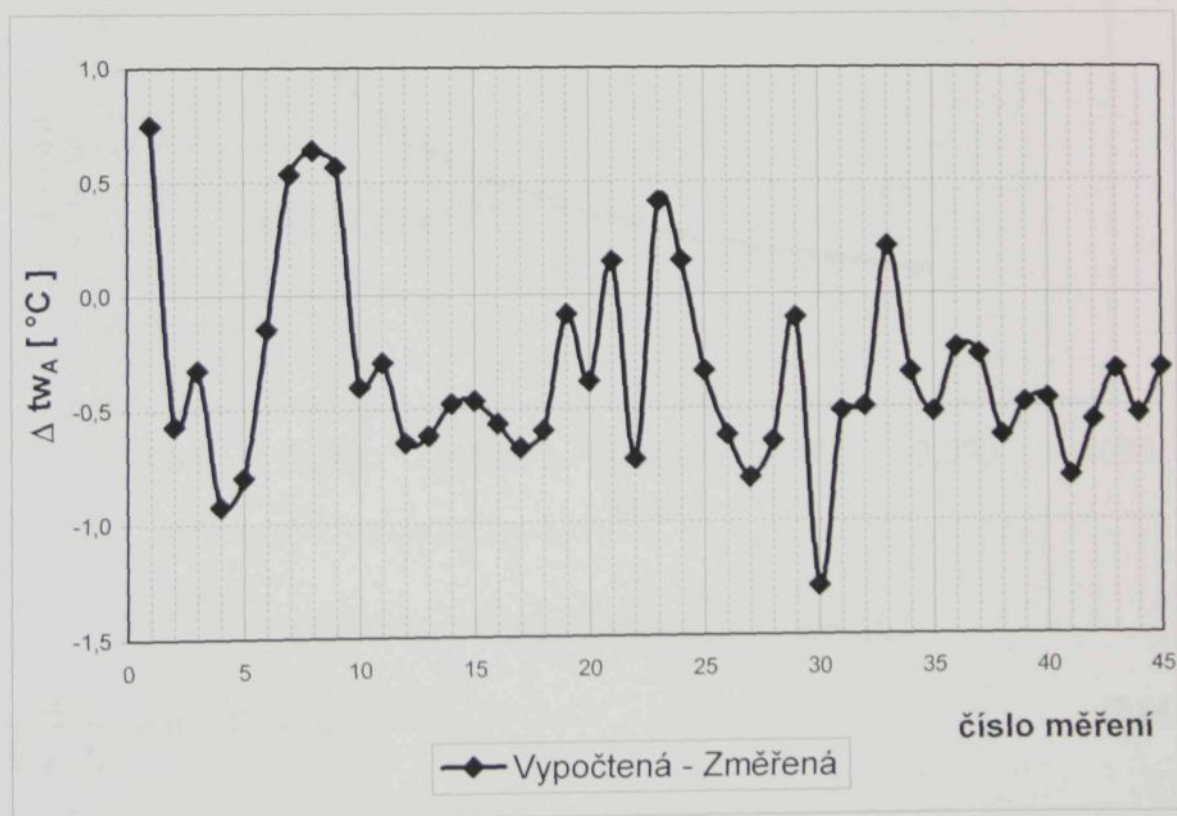
příloha [P2]. Z výsledků byl sestrojen následující graf:



Obr. 3-13. Výstupní teploty protékající vody

Maximální odchylka naměřených a vypočtených výstupních teplot vody je:

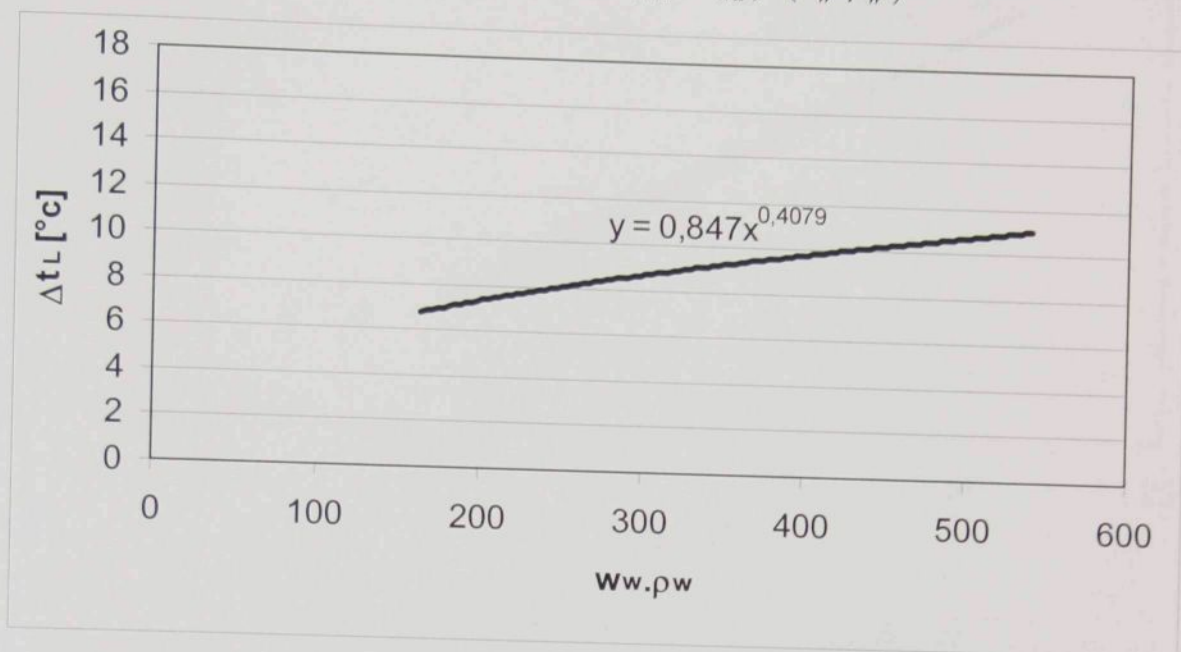
$\Delta t_{wA,max} = -1,3^{\circ}\text{C}$ (měření číslo 30), průměrná odchylka je rovna $\Delta t_{wA,stř} = -0,3^{\circ}\text{C}$.



Obr. 3-14. Odchylky teplot protékající vody

c/ Stanovení obecné rovnice pro výpočet ochlazování či ohřevu vzduchu:

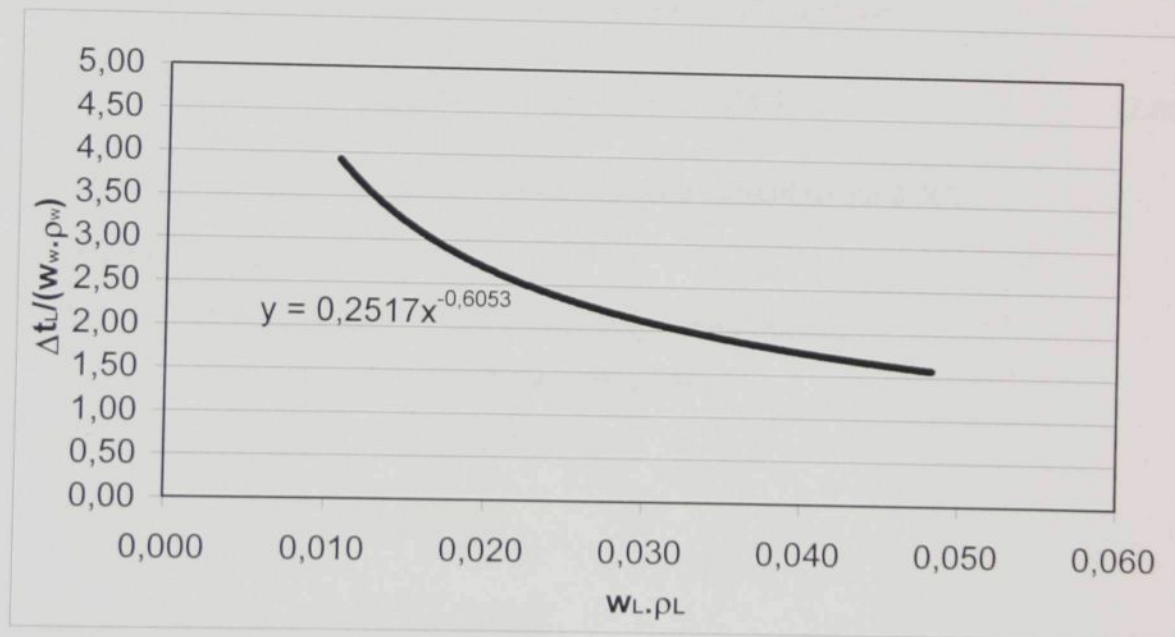
$$(t_{LE} - t_{LA})(w_L \cdot \rho_L)^x = C \cdot (t_{WA} - t_{WE})^y \cdot (w_W \cdot \rho_W)^z$$



Obr. 3-15. Závislost $\Delta t_L = f(w_W \cdot \rho_W)$

$$\Delta t_L = 0,847 \cdot (w_W \cdot \rho_W)^{0,4079}$$

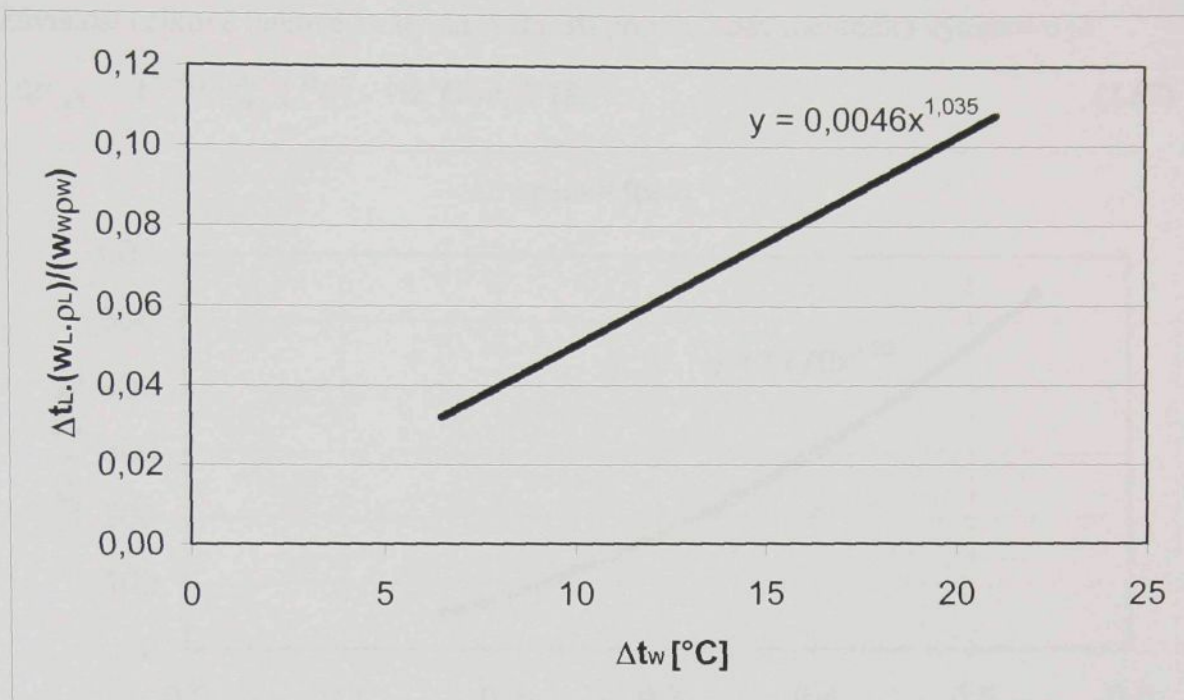
(2.63)



Obr. 3-16. Závislost $\Delta t_L / (w_W \cdot \rho_W) = f(w_L \cdot \rho_L)$

$$\frac{\Delta t_L}{(w_W \cdot \rho_W)} = 0,2517 \cdot (w_L \cdot \rho_L)^{-0,6053}$$

(2.64)



Obr. 3-17. Závislost $\Delta t_L \cdot (w_L \cdot \rho_L) / (w_W \cdot \rho_W) = f(\Delta t_w)$

$$\frac{\Delta t_L \cdot (w_L \cdot \rho_L)}{(w_W \cdot \rho_W)} = 0,0046 \cdot (\Delta t_w)^{1,035} \quad (2.65)$$

Výsledný vztah, složený z rovnic (2.63), (2.64) a (2.65) má tvar:

$$(\Delta t_L) = 1,55 \cdot (\Delta t_w)^{1,035} \cdot \left(\frac{(w_W \cdot \rho_W)}{1000} \right)^{0,4079} \cdot (w_L \cdot \rho_L)^{-0,6053} [^{\circ}\text{C}] \quad (2.66)$$

Průměrná chyba tohoto vztahu je v celém rozsahu měření rovna **2 °C**.

3.8. Tlakové ztráty výměníku

a/ Tlakové ztráty v potrubí (ze strany vody) pro jednu trubku:

Postup výpočtu pro **číslo měření 3**:

Součinitel třecích ztrát λ – dle vztahu (2.3):

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{\text{Re}_W}} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{5761,7}} = 0,0363 [-]$$

Tlaková ztráta třecí – dle vztahu (2.1a):

$$\Delta p_{tr} = \lambda \cdot \frac{L}{d_i} \cdot \frac{w_W^2}{2} \cdot \rho_W = 0,0363 \cdot \frac{0,4m}{0,0147m} \cdot \frac{0,394^2 m^2 \cdot s^{-2}}{2} \cdot 998,2 kg \cdot m^{-3} = 76,28 \text{ Pa}$$

Tlaková ztráta místní – dle vztahu (2.1b):

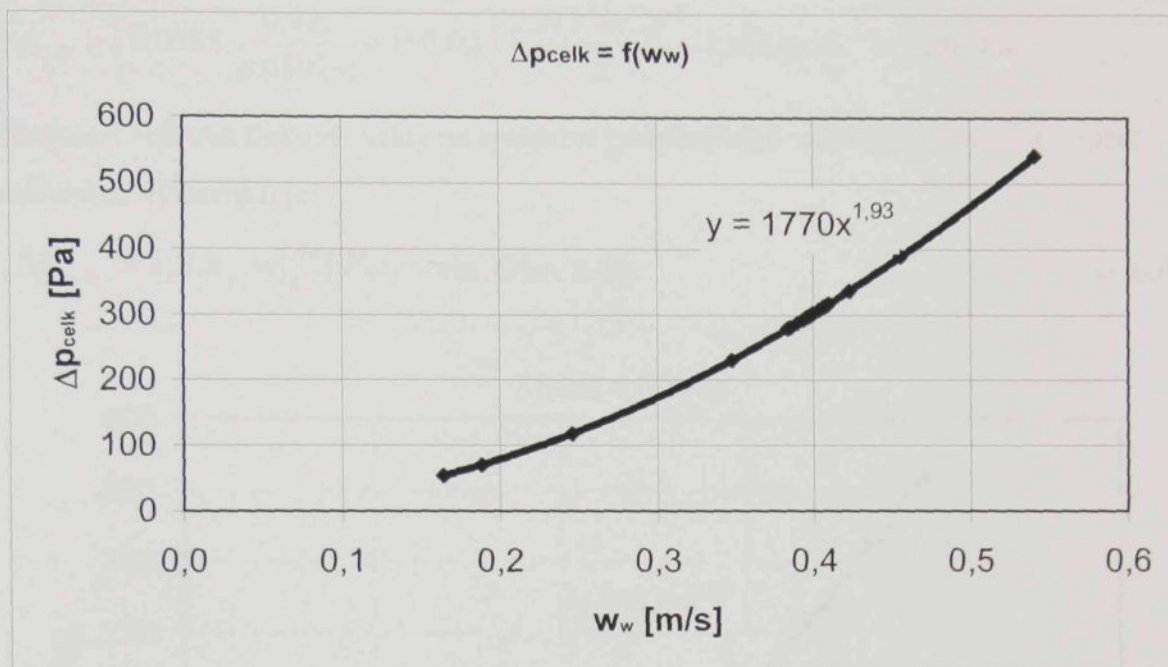
$$\Delta p_{mis} = \Sigma \zeta \cdot \frac{w_W^2}{2} \cdot \rho_W = (2,0,8 + 1,2) \cdot \frac{0,394^2 m^2 \cdot s^{-2}}{2} \cdot 998,2 kg \cdot m^{-3} = 216,41 \text{ Pa}$$

Celková tlaková ztráta – dle vztahu (2.1):

$$\Delta p_{celk} = \Delta p_{tr} + \Delta p_{mis} = 76,28 Pa + 216,41 Pa = 292,69 \text{ Pa}$$

Závislost celkové tlakové ztráty na rychlosti proudu vody měřeného výměníku je

$$\Delta p_{\text{celk}} = 1770 \cdot w_w^{1,93} [\text{Pa}] - \text{viz. Obr. 3-18.} \quad (2.67)$$



Obr. 3-18. Závislost $\Delta p_{\text{celk}} = f(w_w)$

a/ Tlakové ztráty výměníku na straně vzduchu:

Podmínky proudění při průtoku vzduchu kolem svazku žebrovaných trubek jsou značně složité. Část tlakové ztráty je ovlivněna laminární oblastí, část oblastí turbulentní. Uvádí se (**viz. L1**), na základě experimentálních měření, že exponent u rychlosti proudění vzduchu se obvykle pohybuje v rozmezí $1,5 \div 1,65$. A dále, že celková tlaková ztráta závisí také na počtu řad žebrovaných trubek za sebou ($n_2 = 5$ – pro měřený výměník).

Postup výpočtu pro **číslo měření 3**:

Rychlost vzduchu (pro nejužší průřez):

$$w_{Le} = \frac{V_L^*}{S_{et}} = \frac{m_{LE}^*}{\rho_L \cdot S_{et}} = \frac{(700/3600) \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}}{1,168 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 0,072 \text{ m}^2} = 2,313 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Reynoldsovo číslo ze strany vzduchu:

$$\text{Re}_{Le} = \frac{w_{Le} \cdot d_{Le}}{\nu_L} = \frac{2,313 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 0,0592 \text{ m}}{1,576 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}} = 8687,5$$

Součinitel třecích ztrát λ – dle vztahu (2.3):

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{\text{Re}_{Le}}} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{8687,5}} = 0,0388 [-]$$

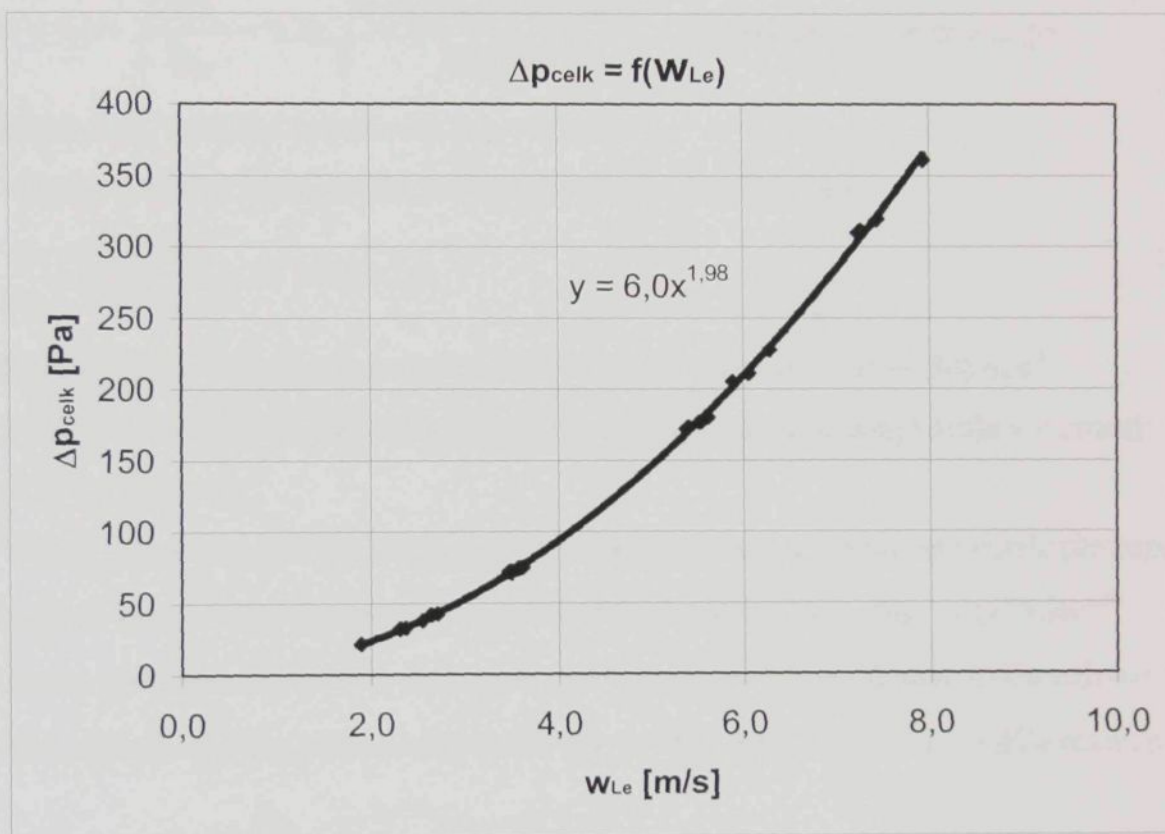
Tlaková ztráta – dle vztahu (2.1):

$$\Delta p_{celk} = \left(\lambda \cdot \frac{L}{d_{Le}} + \sum \zeta \right) \cdot \frac{w_{Le}^2}{2} \cdot \rho_L$$

$$\Delta p_{celk} = \left(0,0388 \cdot \frac{0,4m}{0,0592m} + 100 \cdot 0,1 \right) \cdot \frac{2,313^2 m^2 \cdot s^{-2}}{2} \cdot 1,168 kg \cdot m^{-3} = 32,05 Pa$$

Závislost celkové tlakové ztráty na rychlosti protékajícího vzduchu v nejužším místě měřeného výměníku je:

$$\Delta p_{celk} = 1,2 \cdot n_2 \cdot w_{Le}^{1,98} [Pa] - \text{viz. Obr. 3-19.} \quad (2.68)$$



Obr. 3-19. Závislost $\Delta p_{celk} = f(w_{Le})$

4) Závěr

Měřený žebrovaný výměník s křížovým proudem splňuje základní konstrukční podmínky pro správnou funkci žebrování - viz. str. 13 a 15:

- pro zajištění rostoucího tepelného toku:

$$\frac{2\lambda_z}{\alpha_w \cdot s} = \frac{2.180 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}{2284,96 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 0,001 \text{ m}} \cong 158 > 5$$

- teoretickou šířku mezi žebry:

$$b \geq 9,28 \cdot \sqrt{\frac{D \cdot v_L}{w_{Le}}} = 9,28 \cdot \sqrt{\frac{0,0387 \text{ m} \cdot 1,576^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}}{2,313 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}} = 0,0046 \text{ m} \dots \text{ splněno až při}$$

rychlostech vzduchu vyšších než $w_{Le} = 7,77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

- poměr vnějšího žebrovaného povrchu k povrchu uvnitř trubky:

$$\frac{S_e}{S_i} = \frac{10,5540 \text{ m}^2}{0,92363 \text{ m}^2} = 11,427 > 10.$$

Rychlost proudu vody v trubkách se pohybovala v rozmezí: $(0,16 \div 0,54) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Rychlost obtékajícího vzduchu v nejužším místě výměníku se pohybovala v rozmezí: $(1,90 \div 7,93) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Vlastní kritériální rovnice, která slouží k nejpřesnějšímu stanovení součinitele přestupu tepla ze strany vzduchu, získaná z naměřených hodnot má tvar: $Nu_L = 0,173 \cdot Re_L^{0,667}$.

Těmto hodnotám Nusseltova čísla se ze všech uvedených kritériálních rovnic nejvíce blíží metoda výpočtu podle normy VDI: $Nu_{Le} = 0,21 \cdot Re_{Le}^{0,61} \cdot Pr_L^{0,33} \cdot f_a$, a dále rovnice

$$Nu = 2,147 \cdot Re^{0,46} \cdot \left(\frac{s_2 - d_e}{d_e} \right)^{-0,2} \cdot \left(\frac{s_2 - d_e}{b} + 1 \right)^{-0,2} - \text{viz. [L7]}.$$

Průměrné relativní chyby těchto rovnic jsou: $\delta_{stf} = 4,3\%$, resp. $\delta_{stf} = 17,4\%$.

Závislost součinitele přestupu tepla ze strany vzduchu na rychlosti proudění vzduchu je dána vztahem: $\alpha_L = 18,383 \cdot w_L^{0,668}$.

Závislost součinitele prostupu tepla na rychlosti proudění vzduchu je dána vztahem:

$$k = 16,755 w_L^{0,589}.$$

Průměrná vypočtená hodnota účinnosti měřeného výměníku tepla je:

$\eta = 56\% \dots$ z naměřených teplot proudících tekutin ($\eta = 50\% \dots$ bez špiček)

$\eta = 54\% \dots$ z provozních charakteristik výměníku ($\eta = 48\% \dots$ bez špiček).

Maximální odchylka účinností zjištěná pomocí těchto dvou metod činí max. $5,6\%$.

Průměrná účinnost měřeného výměníku by se dala ještě zvýšit, a to pomocí vzájemných změn v množství protékajících tekutin.

Kontrolní výpočet výstupních teplot tekutin pomocí provozních charakteristik výměníku přinesl maximální a střední odchylky od naměřených hodnot:

$\Delta t_{LA,max} = 1,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $\Delta t_{LA,stř} = 0,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pro výstupní teplotu vzduchu,

$\Delta t_{WA,max} = -1,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $\Delta t_{WA,stř} = -0,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pro výstupní teplotu vody.

Obecná rovnice pro výpočet ochlazování či ohřevu vzduchu byla stanovena takto:

$$(\Delta t_L) = 1,55 \cdot (\Delta t_W)^{1,035} \cdot \left(\frac{(w_W \cdot \rho_W)}{1000} \right)^{0,4079} \cdot (w_L \cdot \rho_L)^{-0,6053} [^{\circ}\text{C}].$$

Celková tlaková ztráta v potrubí pro jednu trubku v závislosti na rychlosti proudící vody je dána vztahem: $\Delta p_{celk} = 1770 \cdot w_W^{1,93} [Pa]$.

Celková tlaková ztráta při obtékání trubek vzduchem je závislá na rychlosti protékajícího vzduchu v nejužším místě a na počtu řad trubek výměníku dle získaného vztahu: $\Delta p_{celk} = 1,2 \cdot n_2 \cdot w_{Le}^{1,98} [Pa]$.

Seznam užité literatury :

- L1** – Chyský, J., Hemzal, K. a kol.: Větrání a klimatizace, Praha SNTL 1993
L2 – Mikula, J. a kol.: Potrubí a armatury, Praha SNTL 1974
L3 – Nožička, J.: Sdílení tepla, Praha ČVUT 1998
L4 – Olehla, J.: Výpočet ohříváčů a chladičů vzduchu, ZTV č.5, roč.20, 1977
L5 – Olehla, J. a kol.: Termofyzikální vlastnosti tekutin, Liberec TUL 1999
L6 – Sazima, M., Kmoníček, V., Schneller, J. a kol.: Teplo, Praha SNTL 1989
L7 – Vampola, J.: Přestup tepla a tlakové ztráty při proudění plynu svazkem žebrovaných trubek, VZ Běchovice 1966

Seznam příloh :

- P1** – Naměřené a vypočtené hodnoty měřeného výměníku
P2 – Výpočet účinnosti měřeného výměníku pomocí provozních charakteristik
P3 – Graf závislosti : $Nu_L = f(Re_L)$
P4 – Graf závislosti : $\alpha_L = f(w_L)$
P5 – Graf závislosti : $k = f(w_L)$
P6 – Graf závislosti : $Nu_L = f(Re_L)$ pro všechny metody

Seznam obrázků :

- Obr. 1-1.** Uspořádání svazků trubek : a) za sebou, b) vystřídané ... str. 13
Obr. 2-1. Průběh teploty na žebrou trubky ... str. 18
Obr. 2-2. Prostup tepla trubkou ... str. 20
Obr. 3-1. Schéma měřící tratě ... str. 25
Obr. 3-2. Uspořádání žebrovaných trubek ... str. 25
Obr. 3-3. Detail žebrování ... str. 26
Obr. 3-4. Závislost $Nu_L = f(Re_L)$... str. 29
Obr. 3-5. Závislost $\alpha_L = f(w_L)$... str. 29
Obr. 3-6. Závislost $k = f(w_L)$... str. 30
Obr. 3-7. Přehled závislostí $Nu_L = f(Re_L)$... str. 33
Obr. 3-8. Účinnosti měřeného výměníku ... str. 35
Obr. 3-9. Odchyly účinností ... str. 36
Obr. 3-10. Závislosti η -R-N ... str. 37

Obr. 3-11. Výstupní teploty proudícího vzduchu	... str. 38
Obr. 3-12. Odchylky teplot proudícího vzduchu	... str. 39
Obr. 3-13. Výstupní teploty protékající vody	... str. 40
Obr. 3-14. Odchylky teplot protékající vody	... str. 40
Obr. 3-15. Závislost $\Delta t_L = f(w_w, \rho_w)$	... str. 41
Obr. 3-16. Závislost $\Delta t_L / (w_w, \rho_w) = f(w_L, \rho_L)$	... str. 41
Obr. 3-17. Závislost $\Delta t_L, (w_L, \rho_L) / (w_w, \rho_w) = f(\Delta t_w)$	... str. 42
Obr. 3-18. Závislost $\Delta p_{\text{celk}} = f(w_w)$	... str. 43
Obr. 3-19. Závislost $\Delta p_{\text{celk}} = f(w_{Le})$	... str. 44

Naměřené a vypočtené hodnoty měřeného výměníku

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
m_{LE} [kg/hod]	562	700	700	700	750	750	800	800	800	1030	1030	1050
t_{LE} [° C]	40,2	30,1	30,0	40,5	40,4	40,5	40,4	30,0	30,1	40,4	39,7	40,0
t_{LA} [° C]	23,8	18,8	21,2	26,0	27,5	27,4	25,9	21,1	18,8	28,0	27,0	25,6
$t_{L\,stf}$ [° C]	32,0	24,5	25,6	33,3	34,0	34,0	33,2	25,6	24,5	34,2	33,4	32,8
c_{PL} [J/kg.K]	1006,8	1006,5	1006,5	1006,9	1006,9	1006,9	1006,9	1006,5	1006,5	1006,9	1006,9	1006,9
ρ_L [kg/m ³]	1,143	1,172	1,168	1,138	1,136	1,136	1,139	1,168	1,172	1,135	1,138	1,140
v_L [m ² /s]	1,637E-05	1,565E-05	1,576E-05	1,649E-05	1,656E-05	1,656E-05	1,648E-05	1,576E-05	1,565E-05	1,658E-05	1,650E-05	1,645E-05
λ_L [W/m.K]	0,0267	0,0261	0,0262	0,0268	0,0269	0,0269	0,0268	0,0262	0,0261	0,0269	0,0268	0,0268
Q_L [W]	2577,7	2211,5	1722,3	2838,8	2706,1	2748,0	3244,3	1990,7	2527,4	3572,3	3658,6	4228,8
m_w [kg/hod]	248	240	240	240	240	240	240	240	240	212	258	240
t_{WE} [° C]	13,2	7,7	13,1	13,0	16,0	16,0	13,0	13,1	7,7	13,0	12,6	8,6
t_{WA} [° C]	21,4	16,2	19,6	24,1	26,5	26,0	24,1	19,6	16,2	26,7	25,1	23,3
$t_{W\,stf}$ [° C]	17,3	12,0	16,4	18,6	21,3	21,0	18,6	16,4	12,0	19,9	18,9	16,0
Q_w [W]	2362,9	2370,4	1812,6	3095,4	2928,1	2788,7	3095,4	1812,6	2370,4	3374,8	3747,3	4099,3
δ (Q) [%]	8,33	7,18	5,24	9,04	8,21	1,48	4,59	8,95	6,21	5,53	2,42	3,06
Q_{stf} [W]	2470,3	2290,9	1767,5	2967,1	2817,1	2768,3	3169,9	1901,7	2448,9	3473,5	3702,9	4164,1

konstanty

ρ_w [kg/m³] 998,2 v_w [m²/s] 1,004E-06 λ_w [W/m.K] 0,599 c_{PW} [J/kg.K] 4183,0
 d_i [m] 0,0147 L [m] 0,4 S_e [m²] 10,554 S_w [m²] 0,92363 S_{kan} [m²] 0,144 d_{Le} [m] 0,0592

w_w [m/s]	0,407	0,394	0,394	0,394	0,394	0,394	0,394	0,394	0,394	0,348	0,423	0,394
Re_w [-]	5953,8	5761,7	5761,7	5761,7	5761,7	5761,7	5761,7	5761,7	5761,7	5089,5	6193,8	5761,7
Pr_w [-]	7,00											
Nu_w [-]	57,57	56,07	56,07	56,07	56,07	56,07	56,07	56,07	56,07	50,78	59,41	56,07
α_w [W/m ² .K]	2345,69	2284,96	2284,96	2284,96	2284,96	2284,96	2284,96	2284,96	2284,96	2069,08	2421,06	2284,96
$\Delta t_{stf,log}$ [° C]	14,31	12,45	9,20	14,63	12,66	12,89	14,53	9,15	12,45	14,34	14,50	16,85
k [W/m ² .K]	16,36	17,44	18,20	19,21	21,08	20,35	20,67	19,70	18,64	22,95	24,20	23,42
α_L [W/m ² .K]	17,77	19,10	20,02	21,25	23,56	22,66	23,05	21,85	20,56	26,28	27,32	26,52
w_L [m/s]	0,948	1,152	1,157	1,186	1,274	1,274	1,355	1,322	1,317	1,751	1,746	1,776
Re_L [-]	3429,2	4357,1	4343,7	4257,5	4553,4	4553,4	4867,0	4964,9	4979,5	6249,3	6263,0	6393,7
Nu_L [-]	39,36	43,27	45,19	46,90	51,89	49,90	50,87	49,32	46,56	57,84	60,26	58,60
$Nu_{L,rcs}$ [-]	39,45	46,28	46,19	45,57	47,66	47,66	49,82	50,49	50,59	58,87	58,95	59,77
δ (Nu _L) [%]	0,22	6,96	2,21	2,83	8,16	4,49	2,06	2,37	8,66	1,78	2,17	2,00

Naměřené a vypočtené hodnoty měřeného výměníku

	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
m_{LE} [kg/hod]	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050
t_{LE} [° C]	40,3	29,8	39,9	40,0	40,2	40,1	39,9	30,0	30,0	29,8	40,8	45,0
t_{LA} [° C]	32,0	22,4	32,0	30,7	29,5	28,9	28,0	23,5	25,2	22,4	26,8	31,3
$t_{L_{str}}$ [° C]	36,2	26,1	36,0	35,4	34,9	34,5	34,0	26,8	27,6	26,1	33,8	38,2
c_{PL} [J/kg.K]	1007,0	1006,6	1007,0	1007,0	1006,9	1006,9	1006,9	1006,6	1006,6	1006,6	1006,9	1007,1
ρ_L [kg/m ³]	1,128	1,166	1,129	1,131	1,133	1,134	1,136	1,163	1,160	1,166	1,136	1,121
v_L [m ² /s]	1,677E-05	1,581E-05	1,675E-05	1,669E-05	1,665E-05	1,661E-05	1,656E-05	1,587E-05	1,595E-05	1,581E-05	1,655E-05	1,697E-05
λ_L [W/m.K]	0,0271	0,0263	0,0270	0,0270	0,0270	0,0269	0,0269	0,0263	0,0264	0,0263	0,0269	0,0272
Q_L [W]	2437,8	2172,5	2320,3	2731,4	3142,5	3289,3	3494,8	1908,3	1409,3	2172,5	4111,5	4024,2
m_w [kg/hod]	115	238	100	150	240	240	330	240	100	240	240	235
t_{WE} [° C]	16,1	13,0	16,0	16,0	16,1	16,0	15,9	15,7	16,0	13,0	13,2	16,9
t_{WA} [° C]	34,0	20,9	35,0	31,3	27,4	27,6	25,1	22,5	26,3	21,3	25,5	29,7
$t_{W_{str}}$ [° C]	25,1	17,0	25,5	23,7	21,8	21,8	20,5	19,1	21,2	17,2	19,4	23,3
Q_w [W]	2391,9	2184,7	2207,7	2666,7	3151,2	3234,9	3527,7	1896,3	1196,8	2314,6	3430,1	3495,1
δ (Q) [%]	1,88	0,56	4,85	2,37	0,28	1,66	0,94	0,63	15,08	6,54	16,57	13,15
Q_{str} [W]	2414,8	2178,6	2264,0	2699,0	3146,8	3262,1	3511,2	1902,3	1303,0	2243,6	3770,8	3759,7

<i>konstanty</i>	ρ_w [kg/m ³]	998,2	v_w [m ² /s]	1,004E-06	λ_w [W/m.K]	0,599	c_{PW} [J/kg.K]	4183,0				
	d_i [m]	0,0147	L [m]	0,4	S_e [m ²]	10,554	S_w [m ²]	0,92363	S_{kan} [m ²]	0,144	d_{Le} [m]	0,0592

w_w [m/s]	0,189	0,390	0,164	0,246	0,394	0,394	0,541	0,394	0,164	0,394	0,394	0,385
Re_w [-]	2760,8	5713,7	2400,7	3601,1	5761,7	5761,7	7922,3	5761,7	2400,7	5761,7	5761,7	5641,7
Pr_w [-]												
Nu_w [-]	31,13	55,70	27,84	38,50	56,07	56,07	72,35	56,07	27,84	56,07	56,07	55,14
α_w [W/m ² .K]	1268,43	2269,71	1134,25	1568,85	2284,96	2284,96	2947,95	2284,96	1134,25	2284,96	2284,96	2246,79
$\Delta t_{str, log}$ [° C]	10,37	9,15	9,38	11,44	13,10	12,70	13,40	7,65	6,04	8,94	14,43	14,85
k [W/m ² .K]	22,06	22,57	22,87	22,36	22,76	24,34	24,82	23,56	20,45	23,77	24,75	24,00
α_L [W/m ² .K]	27,54	25,46	29,72	26,71	25,69	27,71	27,46	26,71	25,75	26,98	28,25	27,33
w_L [m/s]	1,796	1,738	1,795	1,791	1,788	1,786	1,783	1,742	1,746	1,738	1,782	1,807
Re_L [-]	6338,8	6507,0	6342,1	6351,8	6360,0	6365,7	6374,7	6495,7	6481,2	6507,0	6377,2	6306,6
Nu_L [-]	60,26	57,37	65,06	58,57	56,43	60,93	60,47	60,08	57,78	60,80	62,24	59,47
$Nu_{L_{rce}}$ [-]	59,43	60,47	59,45	59,51	59,56	59,60	59,65	60,40	60,31	60,47	59,67	59,23
δ (Nu _L) [%]	1,38	5,40	8,63	1,60	5,55	2,19	1,36	0,53	4,39	0,54	4,14	0,40

Naměřené a vypočtené hodnoty měřeného výměníku

	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
m_{LE} [kg/hod]	1050	1050	1050	1050	1625	1625	1625	1625	1625	1625	1625	1625
t_{LE} [° C]	29,7	39,7	30,1	40,0	40,6	30,0	40,4	40,3	45,3	30,3	40,3	30,5
t_{LA} [° C]	23,2	29,2	21,2	25,6	28,0	22,5	30,0	31,6	33,7	23,9	30,0	25,2
$t_{L_{str}}$ [° C]	26,5	34,5	25,7	32,8	34,3	26,3	35,2	36,0	39,5	27,1	35,2	27,9
c_{PL} [J/kg.K]	1006,6	1006,9	1006,5	1006,9	1006,9	1006,6	1007,0	1007,0	1007,2	1006,6	1007,0	1006,6
ρ_L [kg/m ³]	1,164	1,134	1,167	1,140	1,135	1,165	1,131	1,129	1,116	1,162	1,131	1,159
v_L [m ² /s]	1,584E-05	1,661E-05	1,577E-05	1,645E-05	1,659E-05	1,582E-05	1,668E-05	1,675E-05	1,710E-05	1,590E-05	1,668E-05	1,598E-05
λ_L [W/m.K]	0,0263	0,0269	0,0262	0,0268	0,0269	0,0263	0,0270	0,0270	0,0273	0,0263	0,0270	0,0264
Q_L [W]	1908,3	3083,7	2612,8	4228,8	5726,8	3407,7	4727,1	3954,6	5273,6	2908,0	4681,7	2408,2
m_w [kg/hod]	240	240	240	240	250	243	246	240	240	244	244	240
t_{WE} [° C]	16,2	16,7	8,4	8,6	7,0	7,2	12,9	16,0	16,0	13,0	12,9	16,3
t_{WA} [° C]	22,9	27,7	18,3	23,3	25,0	21,0	28,9	29,9	32,5	23,0	28,9	24,6
$t_{W_{str}}$ [° C]	19,6	22,2	13,4	16,0	16,0	14,1	20,9	23,0	24,3	18,0	20,9	20,5
Q_w [W]	1868,4	3067,5	2760,8	4099,3	5228,8	3896,5	4573,4	3876,2	4601,3	2835,1	4536,2	2314,6
δ (Q) [%]	2,09	0,52	5,66	3,06	8,70	14,34	3,25	1,98	12,75	2,50	3,11	3,89
Q_{str} [W]	1888,4	3075,6	2686,8	4164,1	5477,8	3652,1	4650,3	3915,4	4937,5	2871,6	4608,9	2361,4

konstanty

ρ_w [kg/m³]
 d_i [m]

998,2
0,0147

v_w [m²/s]
 L [m]

1,004E-06
0,4

λ_w [W/m.K]
 S_e [m²]

0,599
10,554

c_{PW} [J/kg.K]
 S_w [m²]

4183,0
0,92363

S_{kan} [m²]
 d_{Le} [m]

0,144
0,0592

w_w [m/s]	0,394	0,394	0,394	0,394	0,410	0,398	0,403	0,394	0,394	0,400	0,400	0,394
Re_w [-]	5761,7	5761,7	5761,7	5761,7	6001,8	5833,7	5905,7	5761,7	5761,7	5857,7	5857,7	5761,7
Pr_w [-]												
Nu_w [-]	56,07	56,07	56,07	56,07	57,94	56,63	57,19	56,07	56,07	56,82	56,82	56,07
α_w [W/m ² .K]	2284,96	2284,96	2284,96	2284,96	2360,81	2307,78	2330,54	2284,96	2284,96	2315,37	2315,37	2284,96
$\Delta t_{str,log}$ [° C]	6,90	12,25	12,29	16,85	18,17	11,87	14,12	12,82	15,12	8,98	14,06	7,30
k [W/m ² .K]	25,93	23,79	20,71	23,42	28,57	29,15	31,22	28,93	30,95	30,30	31,06	30,66
α_L [W/m ² .K]	29,80	27,01	23,10	26,52	33,16	34,06	36,86	33,82	36,61	35,63	36,69	36,21
w_L [m/s]	1,740	1,786	1,735	1,776	2,763	2,691	2,771	2,778	2,809	2,698	2,770	2,705
Re_L [-]	6500,9	6366,5	6514,7	6393,7	9856,7	10066,3	9834,0	9815,1	9727,0	10043,6	9835,2	10023,8
Nu_L [-]	67,08	59,39	52,13	58,60	72,94	76,73	80,87	74,05	79,35	80,05	80,52	81,19
$Nu_{L_{rce}}$ [-]	60,44	59,60	60,52	59,77	79,77	80,90	79,65	79,55	79,07	80,78	79,66	80,67
δ (Nu _L) [%]	9,91	0,36	16,09	2,00	9,37	5,44	1,51	7,43	0,35	0,91	1,06	0,63

Naměřené a vypočtené hodnoty měřeného výměníku

	37	38	39	40	41	42	43	44	45
m_{LE} [kg/hod]	1770	1770	1840	2180	2180	2180	2180	2180	2310
t_{LE} [° C]	30,6	41,3	40,7	30,3	30,0	40,0	30,2	40,0	41,8
t_{LA} [° C]	24,1	31,1	30,0	25,1	23,3	31,4	26,0	30,0	33,0
$t_{L_{str}}$ [° C]	27,4	36,2	35,4	27,7	26,7	35,7	28,1	35,0	37,4
c_{PL} [J/kg.K]	1006,6	1007,0	1007,0	1006,6	1006,6	1007,0	1006,6	1007,0	1007,1
ρ_L [kg/m³]	1,161	1,128	1,131	1,159	1,163	1,129	1,158	1,132	1,123
ν_L [m²/s]	1,593E-05	1,678E-05	1,669E-05	1,596E-05	1,586E-05	1,673E-05	1,600E-05	1,666E-05	1,689E-05
λ_L [W/m.K]	0,0264	0,0271	0,0270	0,0264	0,0263	0,0270	0,0264	0,0270	0,0272
Q_L [W]	3217,0	5050,1	5507,0	3169,8	4084,0	5244,1	2560,2	6097,6	5686,6
m_w [kg/hod]	242	234	278	240	241	246	240	240	249
t_{WE} [° C]	12,8	12,2	12,1	13,0	7,4	12,9	16,0	8,7	14,0
t_{WA} [° C]	23,7	30,4	28,5	24,5	22,7	30,9	25,2	29,8	32,6
$t_{W_{str}}$ [° C]	18,3	21,3	20,3	18,8	15,1	21,9	20,6	19,3	23,3
Q_w [W]	3065,0	4948,5	5297,5	3207,0	4284,4	5145,1	2565,6	5884,1	5381,4
δ (Q) [%]	4,73	2,01	3,80	1,17	4,91	1,89	0,21	3,50	5,37
Q_{str} [W]	3141,0	4999,3	5402,3	3188,4	4184,2	5194,6	2562,9	5990,9	5534,0

konstanty

ρ_w [kg/m³]

998,2

ν_w [m²/s]

1,004E-06

λ_w [W/m.K]

0,599

c_{PW} [J/kg.K]

4183,0

d_i [m]

0,0147

L [m]

0,4

S_e [m²]

10,554

S_w [m²]

0,92363

S_{kan} [m²]

0,144

d_{Le} [m]

0,0592

w_w [m/s]	0,397	0,384	0,456	0,394	0,395	0,403	0,394	0,394	0,408
Re_w [-]	5809,7	5617,7	6674,0	5761,7	5785,7	5905,7	5761,7	5761,7	5977,8
Pr_w [-]									
Nu_w [-]	56,45	54,95	63,07	56,07	56,26	57,19	56,07	56,07	57,75
α_w [W/m².K]	2300,18	2239,14	2570,07	2284,96	2292,57	2330,54	2284,96	2284,96	2353,25
$\Delta t_{str, log}$ [°C]	8,92	14,53	14,87	8,57	11,05	13,25	7,21	15,07	13,51
k [W/m².K]	33,36	32,59	34,43	35,26	35,89	37,15	33,66	37,65	38,80
α_L [W/m².K]	39,99	39,09	40,65	42,81	43,70	45,42	40,48	46,39	47,81
w_L [m/s]	2,942	3,028	3,139	3,627	3,615	3,723	3,632	3,715	3,967
Re_L [-]	10932,6	10684,1	11130,8	13452,6	13490,0	13175,8	13438,4	13199,4	13901,1
Nu_L [-]	89,80	85,53	89,15	96,02	98,33	99,53	90,68	101,85	104,25
$Nu_{L, rce}$ [-]	85,48	84,18	86,51	98,17	98,35	96,81	98,10	96,93	100,34
δ (Nu _L) [%]	4,81	1,58	2,96	2,23	0,02	2,73	8,17	4,83	3,76

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
C_L [W/K]	157,17	195,71	195,72	195,78	209,77	209,77	223,75	223,68	223,67	288,09	288,08	293,66
C_W [W/K]	288,16	278,87	278,87	278,87	278,87	278,87	278,87	278,87	278,87	246,33	299,78	278,87
R_L [-]	0,55	0,70	0,70	0,70	0,75	0,75	0,80	0,80	0,80	1,17	0,96	1,05
R_W [-]	1,83	1,42	1,42	1,42	1,33	1,33	1,25	1,25	1,25	0,86	1,04	0,95
N_L [-]	1,10	0,94	0,98	1,04	1,06	1,02	0,97	0,93	0,88	0,84	0,89	0,84
N_W [-]	0,60	0,66	0,69	0,73	0,80	0,77	0,78	0,75	0,71	0,98	0,85	0,89
η z naměř teplot	0,61	0,50	0,52	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,50	0,50	0,47	0,47
η výp. kříž	0,56	0,50	0,51	0,52	0,52	0,51	0,49	0,48	0,46	0,49	0,45	0,45
η rozdíl	0,04	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,05	0,04	0,01	0,02	0,02
t_{wA} , výpočet [°C]	22,1	15,6	19,3	23,2	25,7	25,9	24,6	20,2	16,8	26,3	24,8	22,7
t_{wA} [°C]	21,4	16,2	19,6	24,1	26,5	26	24,1	19,6	16,2	26,7	25,1	23,3
t_{wA} , rozdíl [°C]	0,7	0,6	0,3	0,9	0,8	0,1	0,5	0,6	0,6	0,4	0,3	0,6
t_{LA} , výpočet [°C]	25,0	19,0	21,4	26,2	27,7	28,0	27,0	21,9	19,7	29,0	27,6	26,7
t_{LA} [°C]	23,8	18,8	21,2	26,0	27,5	27,4	25,9	21,1	18,8	28,0	27,0	25,6
t_{LA} , rozdíl [°C]	1,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6	1,1	0,8	0,9	1,0	0,6	1,1

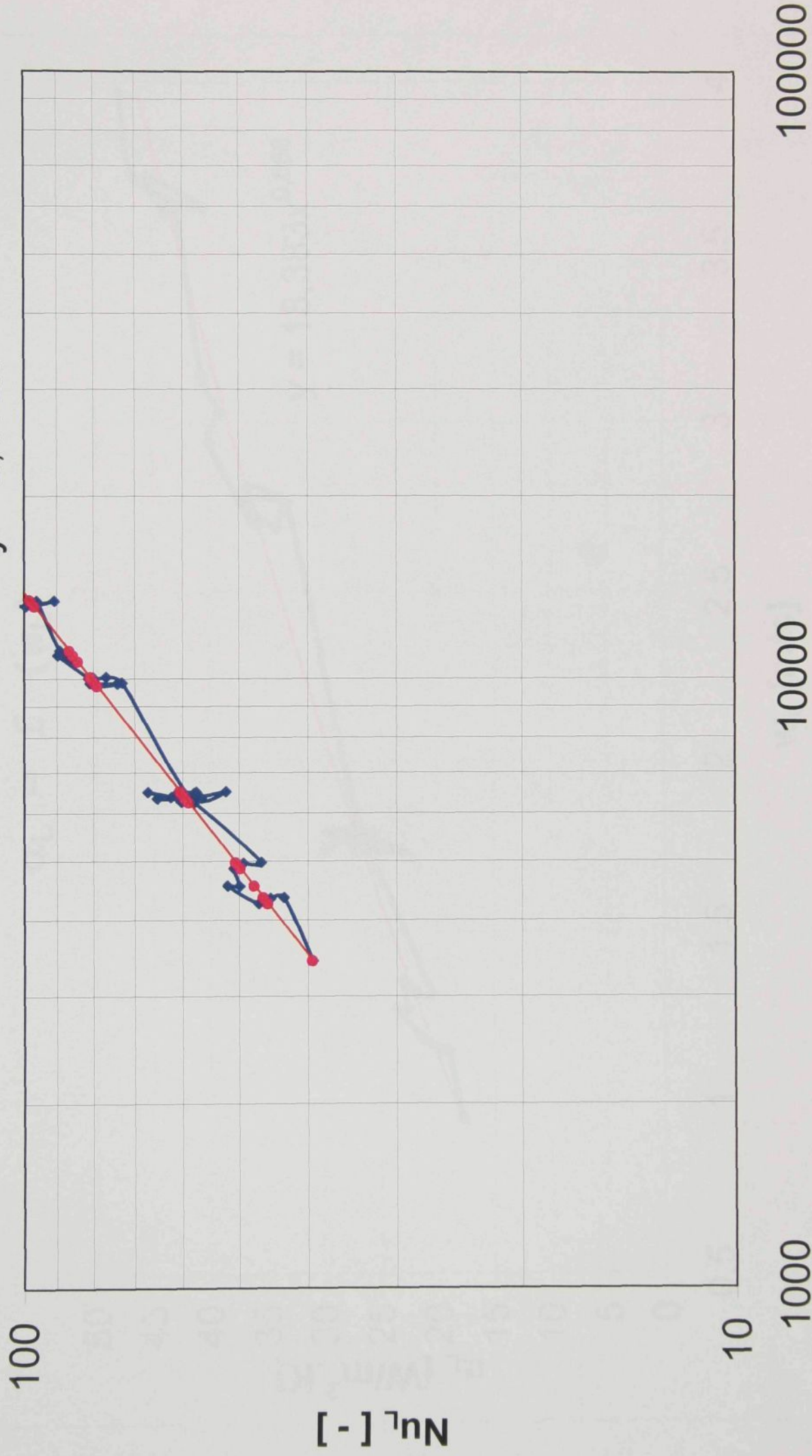
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
C_L [W/K]	293,71	293,58	293,71	293,70	293,69	293,69	293,68	293,59	293,60	293,58	293,68	293,74
C_W [W/K]	133,62	276,54	116,19	174,29	278,87	278,87	383,44	278,87	116,19	278,87	278,87	273,06
R_L [-]	2,20	1,06	2,53	1,69	1,05	1,05	0,77	1,05	2,53	1,05	1,05	1,08
R_W [-]	0,45	0,94	0,40	0,59	0,95	0,95	1,31	0,95	0,40	0,95	0,95	0,93
N_L [-]	0,79	0,81	0,82	0,80	0,82	0,87	0,89	0,85	0,74	0,85	0,89	0,86
N_W [-]	1,74	0,86	2,08	1,35	0,86	0,92	0,68	0,89	1,86	0,90	0,94	0,93
η z naměř teplot	0,74	0,47	0,79	0,64	0,47	0,48	0,50	0,48	0,74	0,49	0,45	0,46
η výp. kříž	0,71	0,44	0,78	0,61	0,44	0,46	0,47	0,45	0,75	0,45	0,46	0,46
η rozdíl	0,03	0,03	0,01	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,01	0,04	0,01	0,00
t_{wA} , výpočet [°C]	33,4	20,4	34,5	30,7	26,7	27,0	25,0	22,1	26,4	20,6	25,9	29,8
t_{wA} [°C]	34,0	20,9	35,0	31,3	27,4	27,6	25,1	22,5	26,3	21,3	25,5	29,7
t_{wA} , rozdíl [°C]	0,6	0,5	0,5	0,6	0,7	0,6	0,1	0,4	0,1	0,7	0,4	0,1
t_{LA} , výpočet [°C]	32,4	22,8	32,6	31,3	30,1	29,7	28,5	23,9	25,9	22,6	28,7	33,0
t_{LA} [°C]	32,0	22,4	32,0	30,7	29,5	28,9	28,0	23,5	25,2	22,4	26,8	31,3
t_{LA} , rozdíl [°C]	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,8	0,5	0,4	0,7	0,2	1,9	1,7

	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
C_L [W/K]	293,59	293,69	293,58	293,66	454,51	454,36	454,53	454,55	454,62	454,37	454,53	454,38
C_W [W/K]	278,87	278,87	278,87	278,87	290,49	282,35	285,84	278,87	278,87	283,51	283,51	278,87
R_L [-]	1,05	1,05	1,05	1,05	1,56	1,61	1,59	1,63	1,63	1,60	1,60	1,63
R_W [-]	0,95	0,95	0,95	0,95	0,64	0,62	0,63	0,61	0,61	0,62	0,62	0,61
N_L [-]	0,93	0,86	0,74	0,84	0,66	0,68	0,72	0,67	0,72	0,70	0,72	0,71
N_W [-]	0,98	0,90	0,78	0,89	1,04	1,09	1,15	1,09	1,17	1,13	1,16	1,16
η z naměř teplot	0,50	0,48	0,46	0,47	0,54	0,61	0,58	0,57	0,56	0,58	0,58	0,58
η výp. křž	0,47	0,45	0,42	0,45	0,53	0,55	0,56	0,55	0,57	0,56	0,56	0,57
η rozdíl	0,03	0,03	0,04	0,02	0,01	0,06	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01
t_{WA} , výpočet [°C]	22,6	27,1	17,5	22,7	24,9	19,7	28,4	29,4	32,7	22,7	28,4	24,4
t_{WA} [°C]	22,9	27,7	18,3	23,3	25,0	21,0	28,9	29,9	32,5	23,0	28,9	24,6
t_{WA} , rozdíl [°C]	0,3	0,6	0,8	0,6	0,1	1,3	0,5	0,5	0,2	0,3	0,5	0,2
t_{LA} , výpočet [°C]	23,7	29,8	21,5	26,7	29,2	22,2	30,7	32,1	35,1	24,3	30,6	25,6
t_{LA} [°C]	23,2	29,2	21,2	25,6	28,0	22,5	30,0	31,6	33,7	23,9	30,0	25,2
t_{LA} , rozdíl [°C]	0,5	0,6	0,3	1,1	1,2	0,3	0,7	0,5	1,4	0,4	0,6	0,4

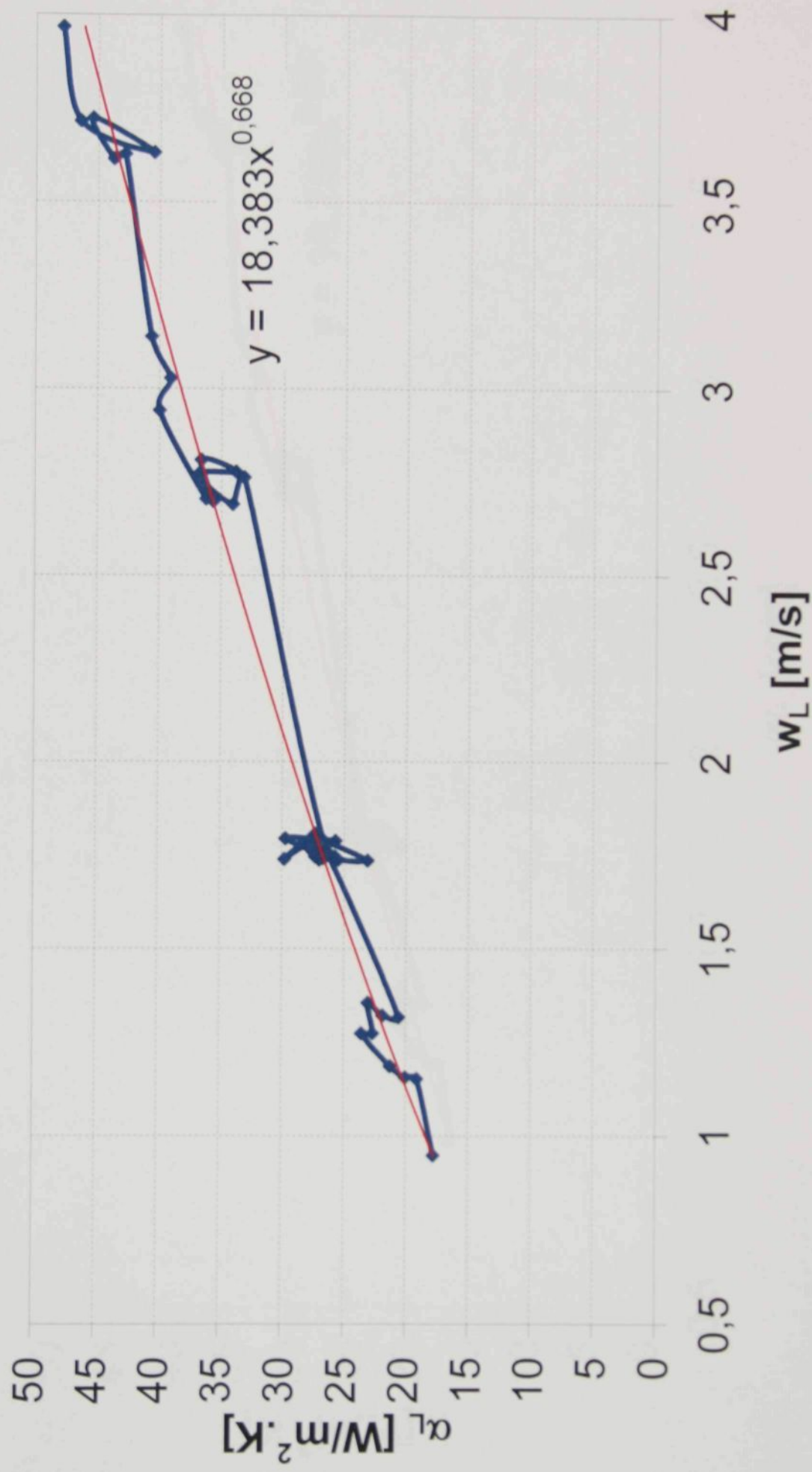
	37	38	39	40	41	42	43	44	45
C_L [W/K]	494,92	495,11	514,67	609,57	609,55	609,78	609,58	609,76	646,20
C_W [W/K]	281,19	271,90	323,02	278,87	280,03	285,84	278,87	278,87	289,32
R_L [-]	1,76	1,82	1,59	2,19	2,18	2,13	2,19	2,19	2,23
R_W [-]	0,57	0,55	0,63	0,46	0,46	0,47	0,46	0,46	0,45
N_L [-]	0,71	0,69	0,71	0,61	0,62	0,64	0,58	0,65	0,63
N_W [-]	1,25	1,27	1,12	1,33	1,35	1,37	1,27	1,43	1,42
η z naměř teplot	0,61	0,63	0,57	0,66	0,68	0,66	0,65	0,67	0,67
η výp. křž	0,60	0,60	0,56	0,64	0,64	0,64	0,62	0,66	0,66
η rozdíl	0,01	0,03	0,01	0,02	0,04	0,02	0,03	0,01	0,01
t_{WA} , výpočet [°C]	23,4	29,8	28,0	24,0	21,9	30,3	24,9	29,3	32,3
t_{WA} [°C]	23,7	30,4	28,5	24,5	22,7	30,9	25,2	29,8	32,6
t_{WA} , rozdíl [°C]	0,3	0,6	0,5	0,5	0,8	0,6	0,3	0,5	0,3
t_{LA} , výpočet [°C]	24,6	31,6	30,7	25,3	23,3	31,8	26,1	30,6	33,6
t_{LA} [°C]	24,1	31,1	30,0	25,1	23,3	31,4	26,0	30,0	33,0
t_{LA} , rozdíl [°C]	0,5	0,5	0,7	0,2	0,0	0,4	0,1	0,6	0,6

$NU_L = f(Re_L)$

$$y = 0,173x^{0,667}$$



$$\alpha_L = f(w_L)$$



$$k = f(w_L)$$

