

## Obsah

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Úvod.....                                                            | 15 |
| 2. Tepelný výpočet výměníku.....                                        | 16 |
| 2.1. Předběžný výpočet.....                                             | 17 |
| 2.1.1. Výpočet součinitele prostupu tepla.....                          | 18 |
| 2.1.1.1. Výpočet součinitele přestupu tepla na straně páry.....         | 19 |
| 2.1.1.2. Výpočet součinitele přestupu tepla na straně topné vody.....   | 20 |
| 2.1.1.3. Výpočet tepelných odporů.....                                  | 22 |
| 2.1.2. Výpočet středního logaritmického spádu.....                      | 23 |
| 2.1.3. Výpočet přenášeného tepelného výkonu.....                        | 23 |
| 2.1.4. Výpočet teplosměnné plochy.....                                  | 23 |
| 2.1.5. Výpočet délky trubkového svazku.....                             | 23 |
| 2.2. Výpočet topného výměníku se zahrnutím chladiče.....                | 24 |
| 2.2.1. Výpočet části chladiče (CH).....                                 | 25 |
| 2.2.2. Výpočet části svazku 1 (S1).....                                 | 27 |
| 2.2.3. Výpočet části svazku 1 (S1) a chladiče (CH) .....                | 30 |
| 2.2.4. Výpočet části svazku 2 (S2).....                                 | 32 |
| 2.2.5. Výpočet skutečné délky výměníku.....                             | 33 |
| 2.2.6. Výpočet skutečné velikosti teplosměnné plochy.....               | 34 |
| 3. Volba rozměrů hrdel.....                                             | 35 |
| 3.1. Výpočet hrdel.....                                                 | 35 |
| 3.1.1. Výpočet rozměrů hrdel topné vody.....                            | 35 |
| 3.1.2. Výpočet rozměrů hrdel na straně páry a na straně kondenzátu..... | 36 |
| 4. Hydraulický výpočet výměníku.....                                    | 38 |
| 4.1. Výpočet tlakové ztráty topné vody.....                             | 38 |
| 4.1.1. Výpočet tlakové ztráty v nezaneseném výměníku.....               | 38 |
| 4.1.1.1. Výpočet tlakové ztráty třením v potrubí.....                   | 38 |
| 4.1.1.2. Výpočet tlakové ztráty způsobené místními odpory.....          | 39 |
| 4.1.1.3. Výpočet celkové tlakové ztráty.....                            | 39 |
| 4.1.2. Výpočet tlakové ztráty v zaneseném výměníku.....                 | 40 |

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1.2.1. Výpočet tlakové ztráty třením v potrubí pro zanesený stav.....           | 40 |
| 4.1.2.2. Výpočet tlakové ztráty způsobené místními odpory pro zanesený stav ..... | 42 |
| 4.1.2.3. Výpočet celkové tlakové ztráty pro zanesený stav .....                   | 42 |
| 5. Návrh konstrukčního řešení.....                                                | 43 |
| 6. Pevnostní výpočet.....                                                         | 45 |
| 6.1. Klenutá dna nádob.....                                                       | 45 |
| 6.1.1. Torosférické dno zatíženo vnitřním přetlakem.....                          | 46 |
| 6.1.2. Rozsah platnosti výpočtových vzorců.....                                   | 46 |
| 6.2. Plášť na straně vody.....                                                    | 46 |
| 6.2.1. Hladká válcová skořepina zatížená vnitřním přetlakem.....                  | 47 |
| 6.2.2. Rozsah platnosti výpočtových vzorců.....                                   | 47 |
| 6.3. Plášť na straně páry (1700).....                                             | 48 |
| 6.3.1. Hladká válcová skořepina zatížená vnitřním přetlakem.....                  | 48 |
| 6.3.2. Hladká válcová skořepina zatížená vnějším přetlakem.....                   | 49 |
| 6.3.3. Rozsah platnosti výpočtových vzorců.....                                   | 49 |
| 6.4. Plášť na straně páry (2100).....                                             | 49 |
| 6.4.1. Hladká válcová skořepina zatížená vnitřním přetlakem.....                  | 50 |
| 6.4.2. Hladká válcová skořepina zatížená vnějším přetlakem.....                   | 50 |
| 6.4.3. Rozsah platnosti výpočtových vzorců.....                                   | 50 |
| 6.5. Kuželové části nádoby.....                                                   | 51 |
| 6.5.1. Označení a výpočtové parametry.....                                        | 51 |
| 6.5.2. Rozsah a podmínky výpočtových vzorců.....                                  | 52 |
| 6.5.3. Hladká kuželová skořepina zatížená vnitřním přetlakem.....                 | 52 |
| 6.5.4. Hladká kuželová skořepina zatížená vnějším přetlakem.....                  | 53 |
| 6.6. Trubkovnice.....                                                             | 54 |
| 6.6.1. Podmínky platnosti výpočtových vzorců.....                                 | 54 |
| 6.6.2. Obecné výpočtové parametry.....                                            | 54 |
| 6.6.3. Výměníky s pevnými trubkovnicemi.....                                      | 56 |
| 6.7. Hrdlo pro přírubu DN150 PN6.....                                             | 57 |
| 6.7.1. Hladká válcová skořepina zatížená vnitřním přetlakem.....                  | 58 |
| 6.7.2. Rozsah platnosti výpočtových vzorců.....                                   | 58 |
| 6.8. Hrdlo pro přírubu DN500 PN25.....                                            | 59 |

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| 6.8.1. Hladká válcová skořepina zatížená vnitřním přetlakem.....  | 59 |
| 6.8.2. Rozsah platnosti výpočtových vzorců.....                   | 60 |
| 6.9. Hrdlo pro přírubu DN600 PN25.....                            | 60 |
| 6.9.1. Hladká válcová skořepina zatížená vnitřním přetlakem.....  | 60 |
| 6.9.2. Rozsah platnosti výpočtových vzorců.....                   | 61 |
| 6.10. Hrdlo pro přírubu DN800 PN6.....                            | 61 |
| 6.10.1. Hladká válcová skořepina zatížená vnitřním přetlakem..... | 61 |
| 6.10.2. Rozsah platnosti výpočtových vzorců.....                  | 62 |
| 7. Průběh tlaku páry přes trubkový svazek.....                    | 63 |
| 7.1. Průběh tlaku páry přes svazek S1.....                        | 63 |
| 7.1.1. Průběh páry přes svazek S1.....                            | 64 |
| 7.1.2. Výpočet střední rychlosti ve svazku S1.....                | 64 |
| 7.1.3. Tlaková ztráta ve svazku S1.....                           | 65 |
| 7.2. Průběh tlaku páry přes svazek S2.....                        | 67 |
| 7.2.1. Průběh páry přes svazek S2.....                            | 67 |
| 7.2.2. Výpočet střední rychlosti ve svazku S2.....                | 68 |
| 7.2.3. Tlaková ztráta ve svazku S2.....                           | 69 |
| 8. Závěr.....                                                     | 71 |



## 1. Úvod

V mnoha aplikacích se objevuje proces předávání tepelné energie mezi dvěma proudícími teplotními médii o různých teplotách, které bývají většinou odděleny pevnou stěnou. Zařízení, v němž k tomuto procesu dochází se nazývá tepelný výměník. S tepelnými výměníky se můžeme setkat, například v chladničce, automobilu, v elektrárnách, klimatizačních soustavách, procesním inženýrství a v mnoha dalších aplikacích. Základní rozdělení tepelných výměníků bývá podle charakteru proudění (souprůdé, protiprůdé, kombinované proudění), účelu a použití (ohříváky, chladiče, kondenzátory, výparníky), pracovního pochodu (rekuperační, regenerační, směšovací), konstrukčního řešení výhřevné plochy (bubnové, deskové, trubkové, svazkové), podle kombinace teplosměnných médií (voda-voda, voda-pára, spaliny-pára). V této práci se z hlediska uspořádání budeme zabývat trubkovým výměníkem, kde přenos tepla mezi parou a topnou vodou probíhá přes hustou síť přímých trubek. Topný výměník bude horizontálního provedení, dvoucestný na straně topné vody, s pevnými trubkovnicemi, jednoduchým pláštěm a s integrovaným chladičem parovzdušné směsi. Rozsah diplomové práce zahrnuje tepelný návrh, kde se určí velikost teplosměnné plochy a její hlavní rozměry. Vliv chladiče parovzdušné směsi na přenos tepla v tepelném výpočtu zanedbáme. Dále se budeme zabývat tlakovou ztrátou topné vody při proudění výměníkem. Pro zvolené konstrukční řešení vybereme vhodný materiál a provedeme pevnostní výpočet hlavních komponent podle normy ČSN 69 0010. Posledním problémem, kterým se budeme zabývat je průběh tlaku páry přes trubkový svazek pro zvolený typ sítě.

## 2. Tepelný výpočet výměníku

Zadání tepelného výpočtu:

Proved'te tepelný návrh topného výměníku dle zadaných teplo-technických dat. Topný výměník navrhnete jako horizontální, celosvařovaný na straně pláště, dvoucestný na straně vody, s přímými trubkami, s pevnými trubkovnicemi, s integrovaným chladičem parovzdušné směsi, bez kompenzátoru v plášti. Teplosměnné trubky podélně svařované o průměru 18x1mm z materiálu 1.4541+AT. Trubky jsou do trubkovnice zaválcovány.

Parametry:

Hmotnostní průtok topné vody

- jmenovitý

315,54 kg/s

- maximální

480 kg/s

Vstupní teplota topné vody

55,0 °C

Výstupní teplota topné vody

72,3 °C

Provozní tlak topné vody

12 bar (a)

Vstupní tlak páry

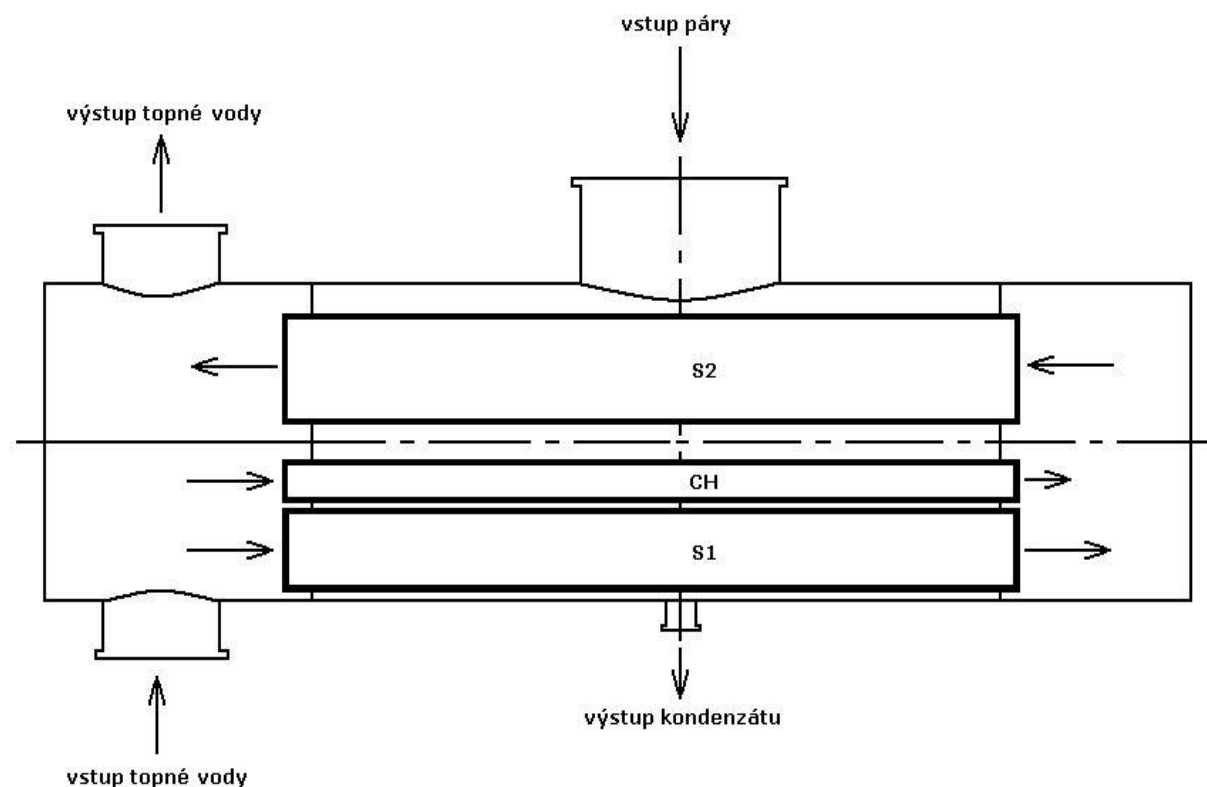
0,396 bar (a)

Entalpie páry

2405,6 kJ/kg

Teplota vystupujícího kondenzátu

na mezi sytosti



Obr. 1. Schéma dvoucestného výměníku s náznakem proudění obou médií (S1 a S2 – části teplosměnné plochy, CH – chladič parovzdušné směsi). Topná voda se na výstupu z S1 a CH smísí v obrátové komoře.

## 2.1 Předběžný tepelný výpočet

Výslednou hodnotu, kterou chceme z předběžného výpočtu určit je velikost teplosměnné plochy, respektive její délka. V samotném postupu je počítáno se střední teplotou topné vody a zanedbává se vliv chladiče parovzdušné směsi.

Parametry potřebné pro výpočet:

Provozní tlak topné vody:

$$p_v = 12 \text{ bar (a)} = 1,2 \text{ MPa}$$

Vstupní tlak páry:

$$p_{p-in} = 0,396 \text{ bar (a)} = 0,0396 \text{ MPa}$$

Teplota vystupujícího kondenzátu (na mezi sytosti): z parních tabulek [8]

$$p_{p-in} = 0,0396 \text{ MPa} \rightarrow t_{p-out} = 75,62^\circ\text{C}$$

Hustota oběhové vody na vstupu: z parních tabulek [8]

$$p_{v-in} = 1,2 \text{ MPa}, t_{v-in} = 55^\circ\text{C} \rightarrow \rho_{v-in} = 990,099 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Hustota oběhové vody na výstupu: z parních tabulek [8]

$$p_{v-out} = 1,2 \text{ MPa}, t_{v-out} = 72,3^\circ\text{C} \rightarrow \rho_{v-out} = 980,392 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Hustota oběhové vody pro střední teplotu:

$$\rho_{v-stř} = \frac{\rho_{v-in} + \rho_{v-out}}{2} = \frac{990,099 + 980,392}{2} = 985,246 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Průměrný průřez vody v jedné cestě: rychlost topné vody volena  $v_v = 2 \text{ m/s}$

$$S_v = \frac{\dot{m}_{v-max}}{v_v \cdot \rho_{v-stř}} = \frac{480}{2 \cdot 985,246} = 0,244 \text{ m}^2$$

Vnitřní průměr trubky:

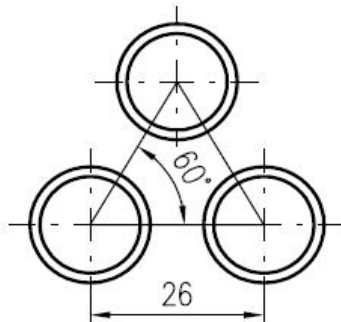
$$d_{t-in} = d - 2 \cdot t = 18 - 2 \cdot 1 = 16 \text{ mm}$$

Počet trubek v jedné cestě:

$$n_t = \frac{S_v}{\frac{\pi \cdot d_{t-in}^2}{4}} = \frac{0,244}{\frac{\pi \cdot \left(\frac{16}{1000}\right)^2}{4}} = 1213,556 \rightarrow 1214 \text{ trubek}$$

Uspořádání trubek:

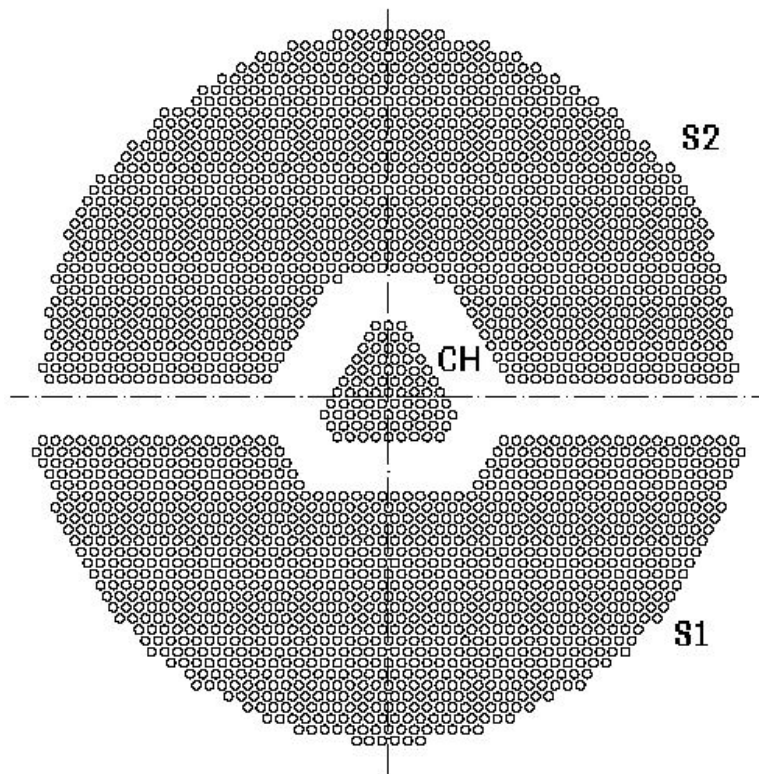
Pro topný výměník a jeho trubkovou síť bylo zvoleno trojúhelníkové uspořádání s vrcholovým úhlem  $60^\circ$ . Rozteč mezi trubkami byla zvolena 26 mm pro vnější průměr trubek 18 mm. Uspořádání trubek na obr. 2.



Obr. 2. Schéma uspořádání trubek

Vlastní uspořádání trubkového svazku:

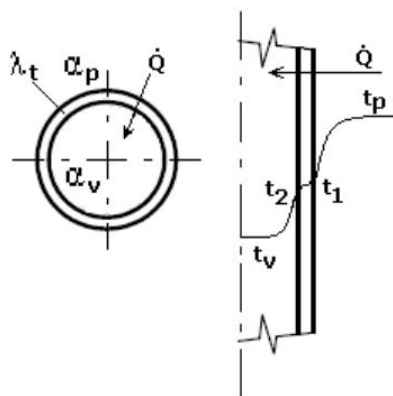
Trubkový svazek bude navržen s ohledem na požadavky zadání. Topný výměník bude dvoucestný s integrovaným chladičem parovzdušné směsi. Dalším parametrem je trojúhelníkové uspořádání trubek, které má pro všechny trubky danou rozteč a vrcholový úhel. Sít' trubkového svazku byla navržena v programu AutoCAD.



Obr. 3. Schéma rozložení trubek v trubkovém svazku

### 2.1.1. Výpočet součinitele prostupu tepla

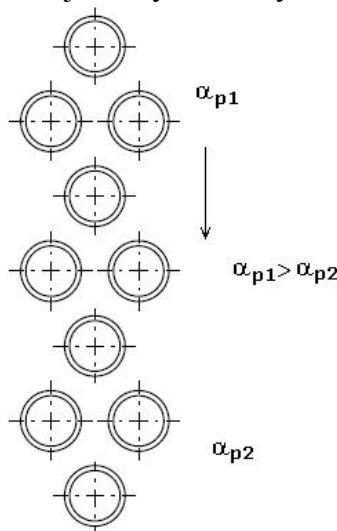
Pokud máme na mysli přenos tepla z jedné tekutiny do druhé přes nějakou pevnou přepážku (v tomto případě přes stěnu trubky), pak hovoříme o prostupu tepla. Horká tekutina (pára) je oddělena od studené tekutiny (topné vody) pevnou stěnou trubky. Tepelný tok je přenášen postupně konvekcí mezi párou a stěnou, pak vedením stěnou a opět konvekcí z druhého povrchu stěny a topné vody [10]. Pro výslednou hodnotu součinitele prostupu tepla je třeba určit součinitele přestupu tepla na straně páry, součinitele přestupu tepla na straně topné vody a jednotlivé tepelné odpory.



Obr. 4. Průběh teploty a tepelného toku při prostupu tepla válcovou stěnou

### 2.1.1.1. Výpočet součinitele přestupu tepla na straně páry

Součinitel přestupu tepla na straně páry nabírá různých hodnot v různých místech trubkového svazku. Dochází ke kondenzaci páry a na trubkách se vytváří vrstva kondenzátu, která stéká přes trubkový svazek vlivem gravitace. Z toho vyplývá, že v horní části bude hodnota součinitele přestupu tepla vyšší, než v části dolní. Proto hledáme takovou hodnotu, která by reprezentovala celý trubkový svazek. Nalezneme trubku umístěnou v řadě s průměrným počtem řad trubek umístěných pod sebou a pro tuto trubku přepočítáme součinitel přestupu tepla a získáme tak hodnotu reprezentující celý trubkový svazek.



Obr. 5. Schéma snižování součinitele přestupu tepla

Parametry potřebné pro výpočet:

Entalpie páry: dle zadání  $i_p'' = 2405,6 \frac{kJ}{kg}$

Entalpie kondenzátu: z parních tabulek [8] pro tlak  $p_p$

$p_p = 0,0396 MPa \rightarrow i_p' = 317,566 \frac{kJ}{kg}$

Teplota na vnější stěně trubky: hodnota předběžně zvolená  $t_{předběžn} = 71^\circ C$

Gravitační zrychlení:  $g = 9,807 \frac{m}{s^2}$

Dynamická viskozita: z parních tabulek [8] pro hodnoty

$$p_p = 0,0396 \text{ MPa}, t_{p-out} = 75,62^\circ\text{C} \rightarrow \eta' = 374,772 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

Tepelná vodivost kondenzátu: z parních tabulek [8] pro hodnoty

$$p_p = 0,0396 \text{ MPa}, t_{p-out} = 75,62^\circ\text{C} \rightarrow \lambda_{kond} = 0,664 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Latentní teplo:

$$l = i_p'' - i_p' = 2405,6 - 317,566 = 2088,034 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Hustota páry: z parních tabulek [8]

$$p_p = 0,0396 \text{ MPa} \rightarrow \rho_p'' = 0,248 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Hustota kondenzátu: z parních tabulek [8]

$$p_p = 0,0396 \text{ MPa} \rightarrow \rho_p' = 970,874 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Součinitel přestupu tepla pro vrchní trubku na straně páry: podle [10] a [11]

Pro výpočet součinitele přestupu tepla na vrchní trubce se používá vzorec podle Nusselta, který byl určen pro kondenzaci syté páry pro trubku umístěnou horizontálně.

$$\begin{aligned} \alpha_p &= 0,728 \cdot \left[ \frac{\lambda_{kond}^3 \cdot \rho_p' \cdot (\rho_p' - \rho_p'') \cdot g \cdot l}{\eta' \cdot (t_{p-out} - t_{předběžn}) \cdot d} \right]^{\frac{1}{4}} = \\ &= 0,728 \cdot \left[ \frac{0,664^3 \cdot 970,874 \cdot (970,874 - 0,248) \cdot 9,807 \cdot 2088034}{374,772 \cdot 10^{-6} \cdot (75,62 - 71) \cdot \frac{18}{1000}} \right]^{\frac{1}{4}} = 14303,278 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \end{aligned}$$

Průměrný počet trubek řazených pod sebou:  $N_{tr-průměr} = 36 \text{ trubek}$

Počet trubek reprezentující celý trubkový svazek:

$$N_{tr} = \frac{2}{3} \cdot N_{tr-průměr} = \frac{2}{3} \cdot 36 = 24 \text{ trubek}$$

Průměrná hodnota součinitele přestupu tepla na straně páry:

Součinitel přestupu tepla pro vrchní trubku byl přepočítán na průměrnou hodnotu součinitele přestupu tepla na straně páry pro trubku reprezentující celý trubkový svazek.

$$\alpha_{p-prům} = \alpha_p \cdot 1,24 \cdot N_{tr}^{-\frac{1}{4}} = 14303,278 \cdot 1,24 \cdot 24^{-\frac{1}{4}} = 8013,172 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

### 2.1.1.2. Výpočet součinitele přestupu tepla na straně topné vody

Pro určení součinitele přestupu tepla na straně vody je třeba znát podobnostní čísla (Reynoldsovo, Prandtlůvo, Nusseltovo). Pro střední teplotu topné vody nalezneme součinitel tepelné vodivosti a pro daný průměr trubky stanovíme hodnotu součinitele přestupu tepla.

Parametry potřebné pro výpočet:

Střední teplota topné vody:

$$t_{v-stř} = \frac{t_{v-in} + t_{v-out}}{2} = \frac{55 + 72,3}{2} = 63,65^{\circ}C$$

Dynamická viskozita topné vody:

$$p_v = 1,2 MPa, t_{v-stř} = 63,65^{\circ}C \rightarrow \eta_v = 442,184 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{m \cdot s}$$

Hustota topné vody: byla stanovena v předchozím výpočtu

$$\rho_{v-stř} = 985,246 \frac{kg}{m^3}$$

Kinematická viskozita topné vody:

$$\nu_v = \frac{\eta_v}{\rho_{v-stř}} = \frac{442,184 \cdot 10^{-6}}{985,246} = 4,488 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

Měrná tepelná kapacita topné vody: z parních tabulek [8] pro hodnoty

$$p_v = 1,2 MPa, t_{v-stř} = 63,65^{\circ}C \rightarrow c_{p-v} = 4182 \frac{J}{kg \cdot K}$$

Součinitel tepelné vodivosti vody: z parních tabulek [8] pro hodnoty

$$p_v = 1,2 MPa, t_{v-stř} = 63,65^{\circ}C \rightarrow \lambda_v = 0,655 \frac{W}{m \cdot K}$$

Součinitel teplotní vodivosti vody:

$$a_v = \frac{\lambda_v}{c_{p-v} \cdot \rho_{v-stř}} = \frac{0,655}{4182 \cdot 985,246} = 1,589 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

Rychlost proudění oběhové vody: volena  $v_v = 2 \frac{m}{s}$

Vnitřní průměr trubky: z předchozího výpočtu  $d_{t-in} = 16 mm$

Reynoldsovo číslo:

$$Re = \frac{v_v \cdot d_{t-in}}{\nu_v} = \frac{2 \cdot \frac{16}{1000}}{4,488 \cdot 10^{-7}} = 71301,25$$

Prandtlovo číslo:

$$Pr = \frac{\nu_v}{a_v} = \frac{4,488 \cdot 10^{-7}}{1,5897 \cdot 10^{-7}} = 2,823$$

Konstanty potřebné pro výpočet Nusseltova čísla: podle [10]

$$m = 0,8 \quad n = 0,4 \text{ tekutina se v trubce ohřívá, } C = 0,023 \text{ pro } 0,6 \leq Pr \leq 160, \frac{L}{D} \geq 10$$

Nusseltovo číslo:

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n = 0,023 \cdot 71301,25^{0,8} \cdot 2,823^{0,4} = 265,760$$

Součinitel přestupu tepla na straně vody:

$$\alpha_v = \frac{Nu \cdot \lambda_v}{d_{t-in}} = \frac{265,760 \cdot 0,655}{\frac{16}{1000}} = 10879,55 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

### 2.1.1.3. Výpočet tepelných odporů

Tepelný odpor proti konvekci na straně páry:

$$R_p = \frac{1}{\alpha_{p-\text{průřím}}} = \frac{1}{8013,172} = 0,125 \cdot 10^{-3} \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Tepelný odpor proti vedení tepla stěnou trubky:

$$R_t = \frac{d}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d}{d_{t-in}} = \frac{18}{2 \cdot 15} \cdot \ln \frac{1000}{16} = 7,067 \cdot 10^{-5} \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

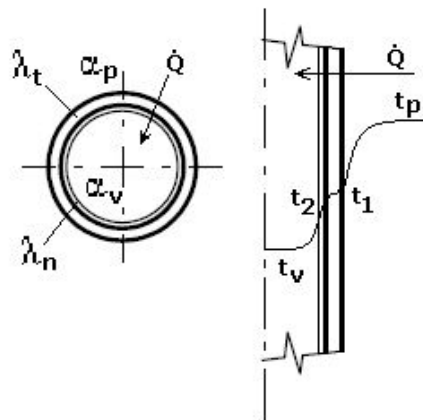
Tepelný odpor proti konvekci na straně oběhové vody:

$$R_v = \frac{1}{\alpha_v} \cdot \frac{d}{d_{t-in}} = \frac{1}{10879,55} \cdot \frac{1000}{16} = 1,034 \cdot 10^{-4} \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Součinitel prostupu tepla válcovou stěnou trubky:

$$k = \frac{1}{R_p + R_t + R_v} = \frac{1}{0,125 \cdot 10^{-3} + 7,067 \cdot 10^{-5} + 1,034 \cdot 10^{-4}} = 3343,699 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Hodnota součinitele zanesení: při samotném provozu výměníku vzniká v trubkách vlivem nečistot vrstva nános, která ovlivňuje součinitel prostupu tepla. Výsledná hodnota se sníží o požadovaný koeficient zanesení  $s_{\text{nános}} = 0,9$



Obr. 6. Průběh teploty a tepelného toku při prostupu tepla válcovou stěnou s vrstvou nános na vnitřní stěně trubky

Součinitel prostupu tepla válcovou stěnou trubky s vrstvou nános:

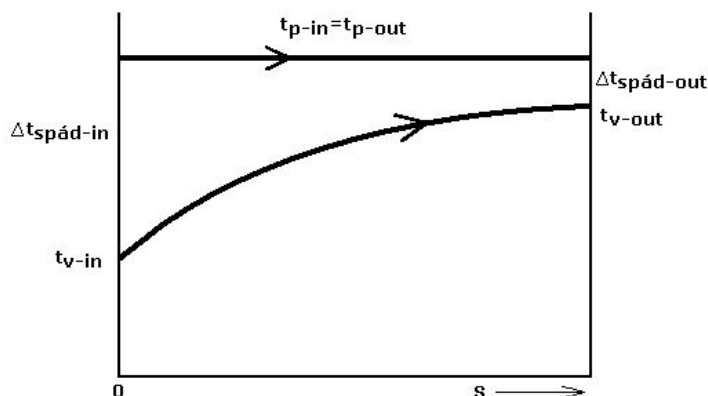
$$k_{\text{nános}} = k \cdot s_{\text{nános}} = 3343,699 \cdot 0,9 = 3009,329 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Teplota na vnější stěně trubky:

$$\begin{aligned} t_1 &= \left[ (273,15 + t_{p-out}) - \left( \left( \frac{k_{\text{nános}}}{\alpha_{p-\text{průřím}}} \right) \cdot (t_{p-out} - t_{v-stř}) \right) \right] - 273,15 = \\ &= \left[ (273,15 + 75,62) - \left( \left( \frac{3009,329}{8013,172} \right) \cdot (75,62 - 63,65) \right) \right] - 273,15 = 71,12^\circ C \end{aligned}$$

### 2.1.2. Výpočet středního logaritmického teplotního spádu

Jedná se o proudění napříč trubkovým svazkem. Výpočet středního logaritmického teplotního spádu podle [10].



Obr. 7. Průběh teplot při konstantní teplotě kondenzace páry a ohřívání topné vody

Teplotní spád na vstupu:

$$\Delta t_{spád-in} = t_p - t_{v-in} = 75,62 - 55 = 20,62^\circ\text{C}$$

Teplotní spád na výstupu:

$$\Delta t_{spád-out} = t_p - t_{v-out} = 75,62 - 72,3 = 3,32^\circ\text{C}$$

Střední logaritmický teplotní spád:

$$\Delta t_{\log} = \frac{\Delta t_{spád-in} - \Delta t_{spád-out}}{\ln \frac{\Delta t_{spád-in}}{\Delta t_{spád-out}}} = \frac{20,62 - 3,32}{\ln \frac{20,62}{3,32}} = 9,473^\circ\text{C}$$

### 2.1.3. Výpočet přenášeného tepelného výkonu

$$\dot{Q} = \dot{m}_{v-jmen} \cdot c_{p-v} \cdot (t_{v-out} - t_{v-in}) = 315,54 \cdot 4182 \cdot (72,3 - 55) = 22\,828\,877,24\text{W} \rightarrow 22,8\text{MW}$$

### 2.1.4. Výpočet teplosměnné plochy

Pro výpočet teplosměnné plochy vycházíme z rovnice tepelné bilance:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{v-jmen} \cdot c_{p-v} \cdot (t_{v-out} - t_{v-in}) = k_{nános} \cdot \Delta t_{\log} \cdot S$$

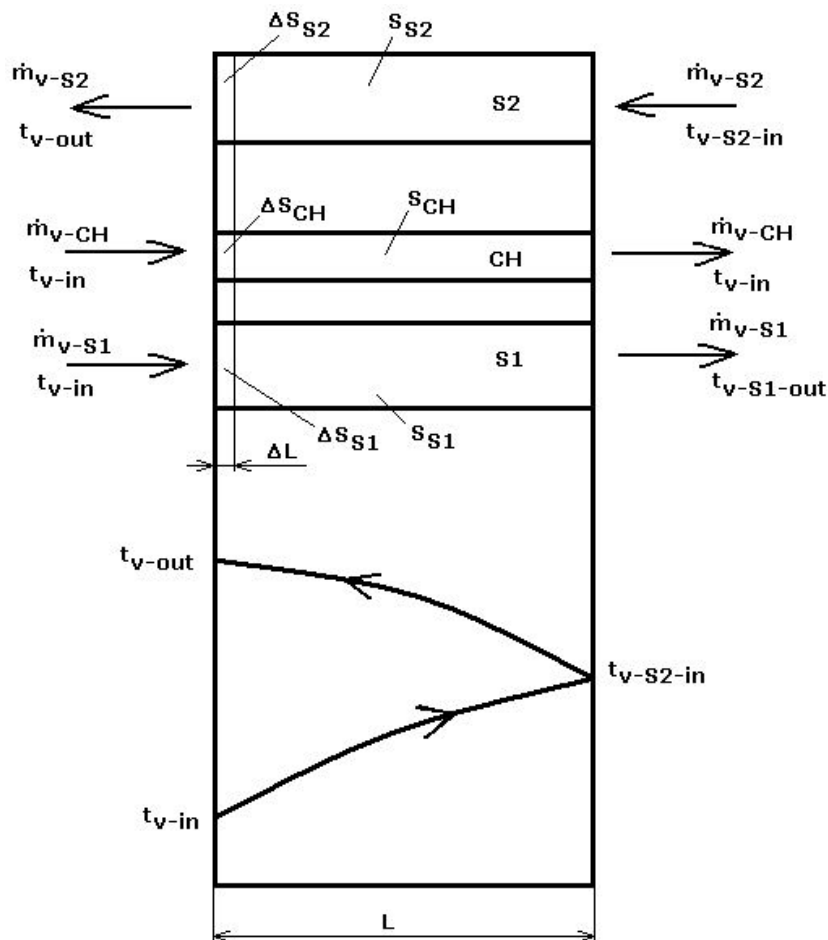
$$\dot{Q} = k_{nános} \cdot \Delta t_{\log} \cdot S \rightarrow S = \frac{\dot{Q}}{k_{nános} \cdot \Delta t_{\log}} = \frac{22\,828\,877,24}{3009,329 \cdot 9,473} = 800,806\text{m}^2$$

### 2.1.5. Výpočet délky trubkového svazku

$$L = \frac{S}{2 \cdot \pi \cdot d \cdot n_t} = \frac{800,806}{2 \cdot \pi \cdot \frac{18}{1000} \cdot 1214} = 5,833\text{m}$$

## 2.2. Výpočet topného výměníku se zahrnutím chladiče

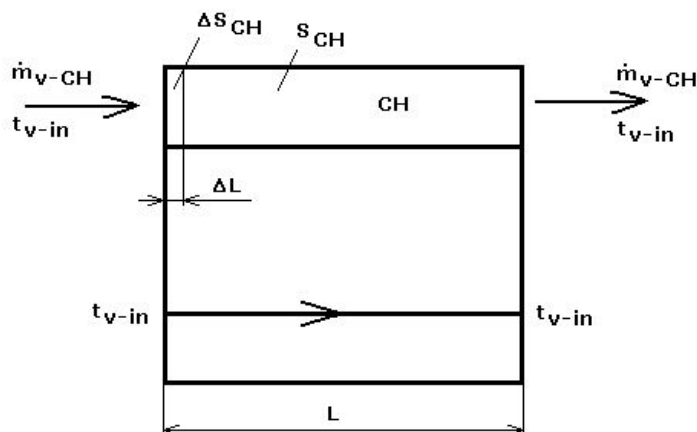
V této části bude podrobně vypočten průběh teploty výměníkem pro všechny části teplosměnné plochy. To znamená svazek S1, svazek S2 a vliv chladiče parovzdučné směsi CH, který je v jedné cestě se svazkem S1 a má vliv na vstupní teplotu do obratové komory (vstupní teplota do svazku S2). Pro zjištění průběhu teplot bude zvolen délkový krok a pro každý element plochy bude vypočítána vstupní a výstupní teplota po celé délce teplosměnné plochy.



Obr. 8. Schéma jednotlivých teplosměnných ploch a celkový průběh teploty topné vody

### 2.2.1. Výpočet části chladiče (CH)

Pro tuto část výměníku je ohřev topné vody zanedbán. Teplota na vstupu do chladiče parovzdušné směsi je shodná s teplotou na výstupu. Dále je určena závislost měrné tepelné kapacity pro konstantní tlak v závislosti na teplotě oběhové vody.



Obr. 9. Schéma teplosměnné plochy části CH a průběh teploty topné vody

Parametry potřebné pro výpočet:

Počet trubek v jedné cestě: z předběžného výpočtu vyšlo:  $n_t = 1214$  trubek

Počet trubek v chladiči: počet trubek volen:  $n_{tr-ch} = 82$  trubek

Počet trubek v části S1:

$$n_{t-S1} = n_t - n_{tr-ch} = 1214 - 82 = 1132 \text{ trubek}$$

Průtočný průřez jedné trubky:

$$S_{tr} = \frac{\pi \cdot d_{t-in}^2}{4} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{16}{1000}\right)^2}{4} = 2,016 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Průtočný průřez všech trubek v části S1:

$$S_{tr-S1} = S_{tr} \cdot n_{tr-S1} = 2,016 \cdot 10^{-4} \cdot 1132 = 0,228 \text{ m}^2$$

Maximální hmotnostní průtok topné vody: dle zadání  $\dot{m}_{v-max} = 480 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

Hmotnostní průtok částí S1: při max. průtoku

$$\dot{m}_{v-S1-max} = S_{tr-S1} \cdot v_v \cdot \rho_{v-stř} = 0,228 \cdot 2 \cdot 985,246 = 449,272 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Hmotnostní průtok částí S1 vyjádřený v procentech: při max. průtoku

$$\dot{m}_{v-S1-\%} = \frac{\dot{m}_{v-S1-max}}{\dot{m}_{v-max}} \cdot 100 = \frac{449,272}{480} \cdot 100 = 93,598\%$$

Hmotnostní průtok částí CH: při max. průtoku

$$\dot{m}_{v-ch-max} = \dot{m}_{v-max} - \dot{m}_{v-S1-max} = 480 - 449,272 = 30,728 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Hmotnostní průtok částí CH vyjádřený v procentech: při max. průtoku

$$\dot{m}_{v-ch-\%} = 100 - \dot{m}_{v-S1-\%} = 100 - 93,598 = 6,402\%$$

Jmenovitý hmotnostní průtok topné vody: dle zadání  $\dot{m}_{v-jmen} = 315,54 \frac{kg}{s}$

Hmotnostní průtok částí S1: při jmenovitém průtoku

$$\dot{m}_{v-S1-jmen} = \frac{\dot{m}_{v-jmen}}{100} \cdot 93,598 = \frac{315,54}{100} \cdot 93,598 = 295,339 \frac{kg}{s}$$

Hmotnostní průtok částí CH: při jmenovitém průtoku

$$\dot{m}_{v-ch-jmen} = \frac{\dot{m}_{v-jmen}}{100} \cdot 6,402 = \frac{315,54}{100} \cdot 6,402 = 20,201 \frac{kg}{s}$$

Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě oběhové vody:

Pro tuto část výpočtu jsme použili parní tabulky [8]. Pro tlak vody a různé teploty při tomto tlaku odečetli příslušné hodnoty měrné tepelné kapacity. Pro názornost byly použity tlaky oběhové vody  $p_{v-1} = 1MPa$ ,  $p_{v-2} = 2MPa$ .

Tab. 1. Hodnoty měrné tepelné kapacity pro tlak topné vody  $p_{v-1} = 1MPa$

| $t_v$     | [°C]     | 40     | 60     | 80     | 100    | 120    | 140    |
|-----------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $c_{p-v}$ | [J/kg·K] | 4176,3 | 4180,8 | 4193,5 | 4214,6 | 4244,3 | 4284,1 |

Tab. 2. Hodnoty měrné tepelné kapacity pro tlak topné vody  $p_{v-2} = 2MPa$

| $t_v$     | [°C]     | 40     | 60     | 80     | 100    | 120    | 140    |
|-----------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $c_{p-v}$ | [J/kg·K] | 4173,9 | 4178,6 | 4191,4 | 4212,3 | 4241,8 | 4281,2 |

Pomocí hodnot uvedených v Tab. 1. a Tab. 2. byl v programu MS Excel sestrojen graf určující tuto závislost. Pomocí spojnic byla určena závislost, která vyšla pro oba tlaky stejně a bude použita pro následující výpočty. Rovnice závislosti:  $y = 0,0127 \cdot x^2 - 1,1121 \cdot x + 4202,7$



Graf. 1. Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě oběhové vody pro tlaky  $p_{v-1} = 1MPa \rightarrow$  modrá,  $p_{v-2} = 2MPa \rightarrow$  fialová

Pro následné výpočty bude za  $x$  dosazena teplota na vstupu  $t_{v-in} = 55^\circ\text{C}$  a  $y$  je měrná tepelná kapacita:

$$c_{p-v} = 0,0127 \cdot t^2 - 1,1121 \cdot t + 4202,7 = 0,0127 \cdot 55 - 1,1121 \cdot 55 + 4202,7 = 4179,252 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Tab. 3. Vypočtené hodnoty pro část CH pro  $L = (0 - 0,6)\text{m}$

|              |                                         |          |          |          |          |          |          |          |
|--------------|-----------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $\Delta L$   | $[\text{m}]$                            | 0        | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      |
| $L$          | $[\text{m}]$                            | 0        | 0,1      | 0,2      | 0,3      | 0,4      | 0,5      | 0,6      |
| $t_{v-in}$   | $[\text{°C}]$                           | 55       | 55       | 55       | 55       | 55       | 55       | 55       |
| $T_{v-in}$   | $[\text{K}]$                            | 328,15   | 328,15   | 328,15   | 328,15   | 328,15   | 328,15   | 328,15   |
| $c_{p-v-ch}$ | $[\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}]$ | 4179,252 | 4179,252 | 4179,252 | 4179,252 | 4179,252 | 4179,252 | 4179,252 |

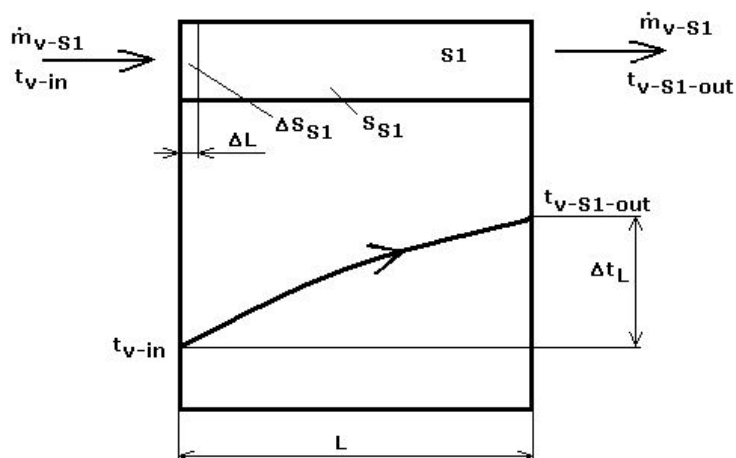
Tab. 4. Vypočtené hodnoty pro část CH pro  $L = (5,6 - 6,3)\text{m}$

|          |          |          |          |          |          |          |          |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      |
| 5,6      | 5,7      | 5,8      | 5,9      | 6        | 6,1      | 6,2      | 6,3      |
| 55       | 55       | 55       | 55       | 55       | 55       | 55       | 55       |
| 328,15   | 328,15   | 328,15   | 328,15   | 328,15   | 328,15   | 328,15   | 328,15   |
| 4179,252 | 4179,252 | 4179,252 | 4179,252 | 4179,252 | 4179,252 | 4179,252 | 4179,252 |

Z hodnot uvedených v tabulce je patrné, že teplota topné vody se v chladiči parovzdušné směsi nemění a tím také i hodnoty měrné tepelné kapacity.

### 2.2.2. Výpočet části svazku 1 (S1)

Ve svazku S1 se již topná voda ohřívá. Pro zjištění výstupní teploty ze svazku S1 je třeba zvolit délkový krok a tím rozdělit teplosměnnou plochu na jednotlivé elementy a sledovat, jak se bude měnit teplota a součinitel prostupu tepla. Obě dvě veličiny by se měly zvětšovat. Pro samotný výpočet vycházíme z rovnice tepelné bilance a z rovnice přestupu tepla podle [9].



Obr. 10. Schéma teplosměnné plochy části S1 a průběh teploty topné vody

Rovnice potřebné pro výpočet:

Význam použitých indexů: p (strana páry), v (strana oběhové vody)

Rovnice tepelné bilance:

$$\dot{Q} = \dot{m}_p \cdot c_{p-p} \cdot \Delta t_p = \dot{m}_v \cdot c_{p-v} \cdot \Delta t_v$$

Rovnice přestupu tepla:

$$\dot{Q} = k \cdot \Delta S \cdot (t_p - t_v)$$

Rovnice pro výpočet změny teploty na straně vody: použity předchozí dvě rovnice

$$\Delta t_v = \frac{k \cdot \Delta S}{\dot{m}_v \cdot c_{p-v}} \cdot (t_p - t_v)$$

Nejprve je dle zvoleného kroku vypočten element plochy a pro teplotu na vstupu do tohoto elementu přepočítána měrná tepelná vodivost. Následně je z výše uvedené rovnice vypočtena změna teploty topné vody a přičtením této změny ke vstupní teplotě získáme teplotu výstupní. Ze vstupní a výstupní teploty dopočteme střední teplotu pro elementární díl a pro tuto teplotu dopočteme součinitel prostupu tepla. Pro následující element se výpočet opakuje.

Ukázka výpočtu pro získání výstupní teploty pro elementární díl:

$$\begin{aligned} \rightarrow \Delta L [m] &= 0,1 \\ \rightarrow \Delta S_{S1} [m^2] &= n_{t-S1} \cdot \Delta L \cdot \pi \cdot d \\ \rightarrow t_{v-in} [^{\circ}C] & \\ \rightarrow c_{p-v-S1} \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right] &= 0,0127 \cdot t_{v-in}^2 - 1,1121 \cdot t_{v-in} + 4202,7 \\ \rightarrow T_{v-in} [K] &= t_{v-in} + 273,15 \\ \rightarrow \Delta T_v [K] &= \frac{k_{nános} \cdot \Delta S_{S1}}{\dot{m}_{v-S1} \cdot c_{p-v}} \cdot [(t_p + 273,15) - T_{v-in}] \\ \rightarrow T_{v-out} [K] &= T_{v-in} + \Delta T_v \\ \rightarrow t_{v-out} [^{\circ}C] &= T_{v-out} - 273,15 \\ \rightarrow t_{v-stř} [^{\circ}C] &= \frac{t_{v-in} + t_{v-out}}{2} \end{aligned}$$

Hodnoty vypočtené z výše uvedeného postupu pro jednotlivé elementy svazku S1 jsou uvedeny v následujících tabulkách 5 a 6.

Tab. 5. Vypočtené hodnoty pro část S1 pro  $L = (0 - 0,6)m$ 

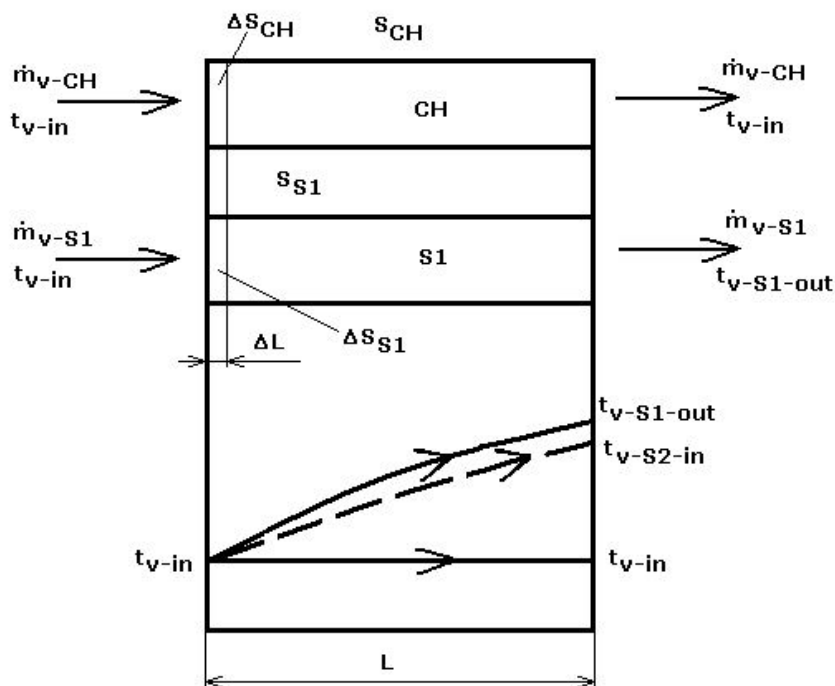
|                 |                     |              |          |          |          |          |          |         |
|-----------------|---------------------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|
| $\Delta L$      | $[m]$               | 0            | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1     |
| $L$             | $[m]$               | 0            | 0,1      | 0,2      | 0,3      | 0,4      | 0,5      | 0,6     |
| $\Delta S_{S1}$ | $[m^2]$             | 0            | 6,401    | 6,401    | 6,401    | 6,401    | 6,401    | 6,401   |
| $t_{v-in}$      | $[^{\circ}C]$       | 55           | 55       | 55,315   | 55,626   | 55,932   | 56,233   | 56,530  |
| $c_{p-v-S1}$    | $[J / kg \cdot K]$  | 4179,25<br>2 | 4179,952 | 4180,043 | 4180,135 | 4180,229 | 4180,32  | 4180,42 |
| $T_{v-in}$      | $[K]$               | 328,15       | 328,15   | 328,465  | 328,776  | 329,082  | 329,384  | 329,681 |
| $\Delta t_v$    | $[K]$               | 0            | 0,315    | 0,310    | 0,306    | 0,301    | 0,297    | 0,292   |
| $T_{v-out}$     | $[K]$               | 328,15       | 328,465  | 328,776  | 329,082  | 329,383  | 329,681  | 329,974 |
| $t_{v-out}$     | $[^{\circ}C]$       | 55           | 55,315   | 55,626   | 55,932   | 56,233   | 56,530   | 56,823  |
| $t_{v-stř}$     | $[^{\circ}C]$       | 55           | 55,157   | 55,470   | 55,779   | 56,083   | 56,382   | 56,677  |
| $k_{nános}$     | $[W / m^2 \cdot K]$ | 2949,63<br>4 | 2951,233 | 2952,829 | 2954,406 | 2956,051 | 2957,660 | 2959,25 |

Tab. 6. Vypočtené hodnoty pro část S1 pro  $L = (5,6 - 6,3)m$ 

|          |          |          |          |          |          |          |          |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      |
| 5,6      | 5,7      | 5,8      | 5,9      | 6        | 6,1      | 6,2      | 6,3      |
| 6,401    | 6,401    | 6,401    | 6,401    | 6,401    | 6,401    | 6,401    | 6,401    |
| 66,878   | 67,015   | 67,149   | 67,282   | 67,412   | 67,541   | 67,667   | 67,792   |
| 4185,128 | 4185,209 | 4185,288 | 4185,367 | 4185,445 | 4185,522 | 4185,599 | 4185,675 |
| 340,028  | 340,165  | 340,299  | 340,432  | 340,562  | 340,691  | 340,817  | 340,942  |
| 0,136    | 0,134    | 0,132    | 0,130    | 0,128    | 0,126    | 0,124    | 0,122    |
| 340,165  | 340,299  | 340,432  | 340,562  | 340,691  | 340,817  | 340,942  | 341,064  |
| 67,015   | 67,149   | 67,282   | 67,412   | 67,541   | 67,667   | 67,792   | 67,914   |
| 66,946   | 67,082   | 67,215   | 67,347   | 67,476   | 67,604   | 67,729   | 67,85    |
| 3020,056 | 3020,964 | 3021,863 | 3022,757 | 3023,661 | 3024,458 | 3025,263 | 3026,064 |

### 2.2.3. Výpočet části svazku 1 (S1) a chladiče (CH)

Bylo již řečeno, že teplota topné vody se v chladiči nemění. Tento jev bude mít vliv při společném výpočtu chladiče a svazku S1 na výstupní teplotu, tedy vstupní teplotu do obrátové komory. Tato teplota musí být stejná jako teplota na vstupu do svazku S2, jelikož v obrátové komoře nedochází k ohřevu topné vody. Tímto se zvětší celková délka svazku S1 vlivem chladiče parovzdušné směsi.



Obr. 11. Schéma teplosměnných ploch části S1 a CH a průběh teploty topné vody

Rovnice potřebné pro výpočet:

$$\dot{m}_{jmen} = \dot{m}_{v-S1} + \dot{m}_{v-ch}$$

$$\dot{m}_{v-S1} \cdot c_{p-v-t} \cdot T_{v-S1-out} + \dot{m}_{v-ch} \cdot c_{p-v-t} \cdot T_{v-in} = (\dot{m}_{v-S1} + \dot{m}_{v-ch}) \cdot c_{p-v-t} \cdot T_{v-S2}$$

Jediná neznámá z výše uvedené rovnice je vstupní teplota. Tu nejprve volíme a provedeme přepočet měrné tepelné kapacity. Následným iteračním výpočtem zjistíme skutečnou hodnotu vstupní teploty. Tento postup výpočtu se provede pro každý elementární díl.

Ukázka výpočtu pro získání výstupní teploty pro elementární díl:

$$\rightarrow \text{volba } t_{v-S2-in} [^{\circ}\text{C}]$$

$$\rightarrow \text{volba } T_{v-S2-in} [K] = t_{v-S2-in} + 273,15$$

$$\rightarrow c_{p-v-S2} \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right] = 0,0127 \cdot t_{v-S2-in}^2 - 1,1121 \cdot t_{v-S2-in} + 4202,7$$

$$\rightarrow \text{vyp. } T_{v-S2-in} [K] = \frac{\dot{m}_{v-S1} \cdot c_{p-v-S1} \cdot T_{v-S1-out} + \dot{m}_{v-ch} \cdot c_{p-v-ch} \cdot T_{v-in}}{\dot{m}_{v-jmen} \cdot c_{p-v-S2}}$$

$$\rightarrow \text{vyp. } t_{v-S2-in} [^{\circ}\text{C}] = T_{v-S2-in} - 273,15$$

Hodnoty vypočtené z výše uvedeného postupu pro jednotlivé elementy svazku S1 + CH jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 7. Vypočtené hodnoty pro část S1 + CH pro  $L = (0 - 0,6)m$

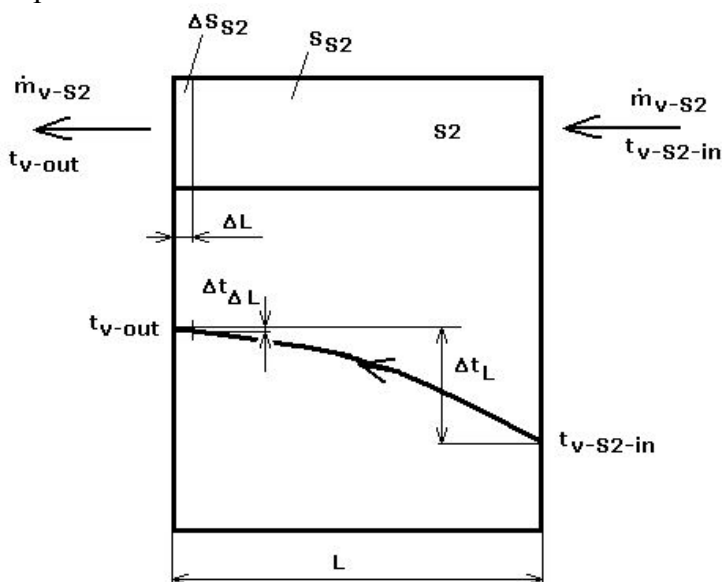
|                    |               |          |         |          |          |          |         |          |
|--------------------|---------------|----------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|
| $\Delta L$         | $[m]$         | 0        | 0,1     | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1     | 0,1      |
| $L$                | $[m]$         | 0        | 0,1     | 0,2      | 0,3      | 0,4      | 0,5     | 0,6      |
| $vol\ t_{v-S2-in}$ | $[^{\circ}C]$ | 55       | 55,338  | 55,629   | 55,916   | 56,198   | 56,476  | 56,75    |
| $vol\ T_{v-S2-in}$ | $[K]$         | 328,15   | 328,488 | 328,779  | 329,066  | 329,348  | 329,626 | 329,9    |
| $c_{p-v-S2}$       | $[J/kgK]$     | 4179,252 | 4179,35 | 4179,436 | 4179,524 | 4179,612 | 4179,7  | 4179,789 |
| $vyp\ T_{v-S2-in}$ | $[K]$         | 328,149  | 328,488 | 328,779  | 329,066  | 329,348  | 329,626 | 329,900  |
| $vyp\ t_{v-S2-in}$ | $[^{\circ}C]$ | 54,999   | 55,338  | 55,6296  | 55,9161  | 56,198   | 56,4765 | 56,750   |

Tab. 8. Vypočtené hodnoty pro část S1 + CH pro  $L = (5,6 - 6,3)m$

|          |          |          |          |          |          |          |          |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      |
| 5,6      | 5,7      | 5,8      | 5,9      | 6        | 6,1      | 6,2      | 6,3      |
| 66,3     | 66,426   | 66,55    | 66,673   | 66,793   | 66,912   | 67,029   | 67,144   |
| 339,45   | 339,576  | 339,7    | 339,823  | 339,943  | 340,062  | 340,179  | 340,294  |
| 4184,093 | 4184,165 | 4184,237 | 4184,308 | 4184,378 | 4184,448 | 4184,517 | 4184,585 |
| 339,450  | 339,576  | 339,700  | 339,823  | 339,943  | 340,062  | 340,179  | 340,294  |
| 66,300   | 66,426   | 66,550   | 66,673   | 66,793   | 66,912   | 67,029   | 67,144   |

### 2.2.4. Výpočet části svazku 2 (S2)

Ve svazku S2 opět dochází k ohřevu topné vody. Výstupní teplota je známa ze zadání a teplota na vstupu do svazku S2 (teplota na výstupu z obrátové komory) je neznámá. Postup výpočtu je podobný jako u svazku S1 s tím rozdílem, že přírůstek teploty pro elementární díl odečítáme od známé výstupní teploty a získáme tím teplotu na vstupu do elementárního dílu. Výpočet proběhne postupně pro všechny elementární díly a předpokládá se, že teplota a součinitel prostupu tepla se budou snižovat.



Obr. 12. Schéma teplosměnné plochy části S2 a průběh teploty topné vody

Ukázka výpočtu pro získání vstupní teploty pro elementární díl:

$$\rightarrow \Delta L [m] = 0,1$$

$$\rightarrow \Delta S_{S2} [m^2] = n_{t-S2} \cdot \Delta L \cdot \pi \cdot d$$

$$\rightarrow t_{v-out} [^{\circ}C]$$

$$\rightarrow c_{p-v-S2} \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right] = 0,0127 \cdot t_{v-out}^2 - 1,1121 \cdot t_{v-out} + 4202,7$$

$$\rightarrow T_{v-out} [K] = t_{v-out} + 273,15$$

$$\rightarrow \Delta T_v [K] = \frac{k_{nános} \cdot \Delta S_{S2}}{m_{v-S2} \cdot c_{p-v}} \cdot [(t_s + 273,15) - T_{v-out}]$$

$$\rightarrow T_{v-S2-in} [K] = T_{v-out} - \Delta T_v$$

$$\rightarrow t_{v-S2-in} [^{\circ}C] = T_{v-S2-in} - 273,15$$

$$\rightarrow t_{v-stř} [^{\circ}C] = \frac{t_{v-S2-in} + t_{v-out}}{2}$$

Hodnoty vypočtené z výše uvedeného postupu pro jednotlivé elementy svazku S2 jsou uvedeny v následujících tabulkách 9 a 10.

Tab. 9. Vypočtené hodnoty pro část S2 pro  $L = (0 - 0,6)m$ 

|                 |                     |          |          |          |          |          |          |          |
|-----------------|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $\Delta L$      | $[m]$               | 0        | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      |
| $L$             | $[m]$               | 0        | 0,1      | 0,2      | 0,3      | 0,4      | 0,5      | 0,6      |
| $\Delta S_{S2}$ | $[m^2]$             | 0        | 6,865    | 6,865    | 6,865    | 6,865    | 6,865    | 6,865    |
| $t_{v-out}$     | $[^{\circ}C]$       | 72,3     | 72,3     | 72,247   | 72,193   | 72,139   | 72,083   | 72,027   |
| $c_{p-v-S2}$    | $[J / kg \cdot K]$  | 4188,682 | 4188,682 | 4188,644 | 4188,605 | 4188,566 | 4188,526 | 4188,485 |
| $T_{v-out}$     | $[K]$               | 345,45   | 345,45   | 345,397  | 345,343  | 345,289  | 345,233  | 345,177  |
| $\Delta t_v$    | $[K]$               | 0        | 0,052    | 0,053    | 0,054    | 0,055    | 0,056    | 0,057    |
| $T_{v-in}$      | $[K]$               | 345,45   | 345,397  | 345,343  | 345,289  | 345,233  | 345,177  | 345,120  |
| $t_{v-in}$      | $[^{\circ}C]$       | 72,3     | 72,247   | 72,193   | 72,139   | 72,083   | 72,027   | 71,970   |
| $t_{v-stř}$     | $[^{\circ}C]$       | 72,3     | 72,273   | 72,220   | 72,166   | 72,111   | 72,055   | 71,998   |
| $k_{nános}$     | $[W / m^2 \cdot K]$ | 3062,341 | 3061,89  | 3061,443 | 3060,988 | 3060,54  | 3060,094 | 3059,647 |

Tab. 10. Vypočtené hodnoty pro část S2 pro  $L = (5,6 - 6,3)m$ 

|          |          |          |          |          |          |          |          |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      | 0,1      |
| 5,6      | 5,7      | 5,8      | 5,9      | 6        | 6,1      | 6,2      | 6,3      |
| 6,865    | 6,865    | 6,865    | 6,865    | 6,865    | 6,865    | 6,865    | 6,865    |
| 67,740   | 67,616   | 67,490   | 67,36    | 67,232   | 67,100   | 66,966   | 66,829   |
| 4185,643 | 4185,568 | 4185,492 | 4185,415 | 4185,337 | 4185,259 | 4185,18  | 4185,1   |
| 340,890  | 340,766  | 340,640  | 340,512  | 340,382  | 340,250  | 340,116  | 339,979  |
| 0,124    | 0,126    | 0,128    | 0,130    | 0,132    | 0,134    | 0,136    | 0,138    |
| 340,766  | 340,640  | 340,512  | 340,382  | 340,250  | 340,116  | 339,979  | 339,841  |
| 67,616   | 67,490   | 67,362   | 67,232   | 67,100   | 66,966   | 66,829   | 66,691   |
| 67,678   | 67,553   | 67,426   | 67,297   | 67,166   | 67,033   | 66,898   | 66,760   |
| 3030,641 | 3029,937 | 3029,244 | 3028,542 | 3027,839 | 3027,088 | 3026,341 | 3025,586 |

### 2.2.5. Výpočet skutečné délky výměníku

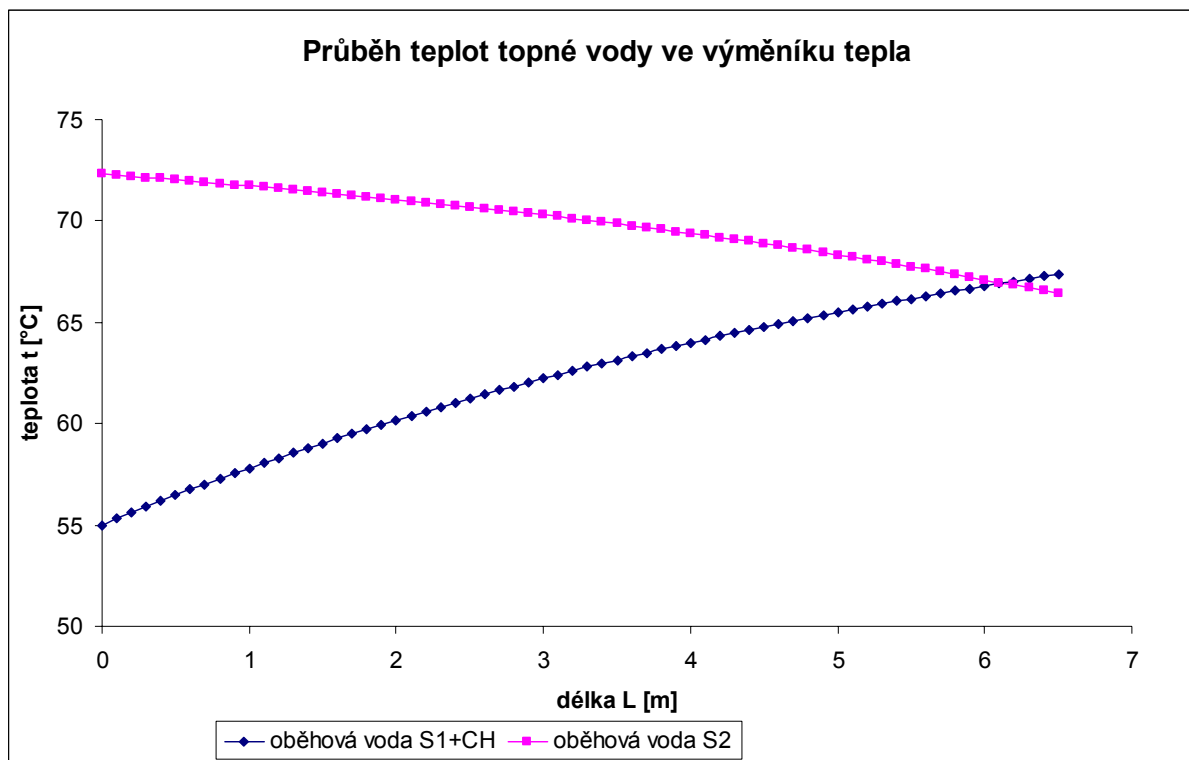
Skutečná délka výměníku je taková, kdy se protne křivka rostoucí teploty topné vody pro svazek S1 + CH a křivka klesající teploty topné vody pro svazek S2. Hodnoty teplot topné vody jsou uvedeny v následujících tabulkách 11. a 12. a grafu 2. Průsečík obou křivek je pro délku  $L_{skut} = 6,121m$ .

Tab. 11. Průběh teploty topné vody pro svazek S1 +CH a svazek S2 pro  $L = (0 - 0,6)m$ 

|               |               |      |        |        |        |        |        |        |
|---------------|---------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\Delta L$    | $[m]$         | 0    | 0,1    | 0,1    | 0,1    | 0,1    | 0,1    | 0,1    |
| $L$           | $[m]$         | 0    | 0,1    | 0,2    | 0,3    | 0,4    | 0,5    | 0,6    |
| $t_{v-S1+ch}$ | $[^{\circ}C]$ | 55   | 55,338 | 55,629 | 55,916 | 56,198 | 56,476 | 56,75  |
| $t_{v-S2}$    | $[^{\circ}C]$ | 72,3 | 72,247 | 72,193 | 72,139 | 72,083 | 72,027 | 71,970 |

Tab. 12. Průběh teploty topné vody pro svazek S1 +CH a svazek S2 pro  $L = (5,6 - 6,3)m$ 

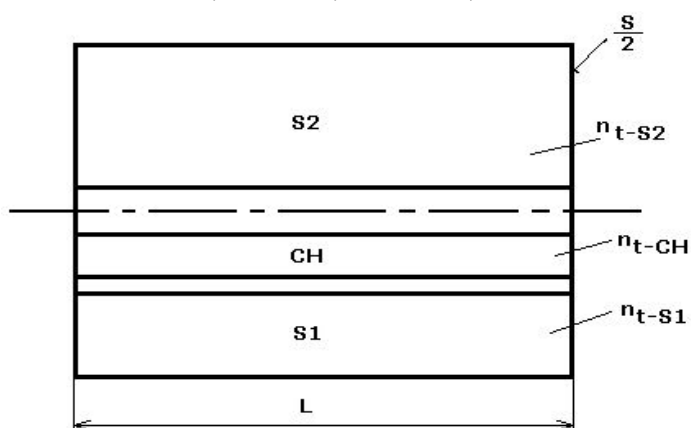
|        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,1    | 0,1    | 0,1    | 0,1    | 0,1    | 0,1    | 0,1    | 0,1    |
| 5,6    | 5,7    | 5,8    | 5,9    | 6      | 6,1    | 6,2    | 6,3    |
| 66,3   | 66,426 | 66,55  | 66,673 | 66,793 | 66,912 | 67,029 | 67,144 |
| 67,616 | 67,490 | 67,362 | 67,232 | 67,100 | 66,966 | 66,829 | 66,691 |

Graf. 2. Průběh teploty topné vody přes svazek S1 + CH a svazek S2. Průsečík obou křivek nám určuje skutečnou délku výměníku  $L_{skut} = 6,121m$ 

### 2.2.6. Výpočet skutečné velikosti teplosměnné plochy

Vzorec pro výpočet skutečné teplosměnné plochy:

$$S_{skut} = 2 \cdot n_t \cdot L_{skut} \cdot \pi \cdot d = 2 \cdot 1214 \cdot 6,121 \cdot \pi \cdot 0,018 = 840,414 m^2$$



Obr. 13. Znárodnění jednotlivých částí teplosměnné plochy

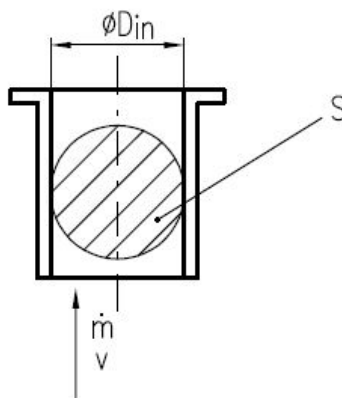
### 3. Návrh rozměrů hrdel

Návrh rozměrů se bude zabývat vstupním a výstupním hrdlem na straně topné vody, vstupním hrdlem páry a hrdlem pro výstup kondenzátu.

#### 3.1. Výpočet hrdel

##### 3.1.1. Výpočet rozměrů hrdel topné vody

U topné vody nedochází ke změně fáze a rozměry hrdel budou podobné, jelikož rychlost proudění a hmotnostní průtok se nemění. Ve výpočtu zjišťujeme vnitřní průměry hrdel.



Obr. 14. Schéma pro výpočet hrdla (S – průřezový průřez, m – hmotnostní průtok, v – rychlost proudění,  $D_{in}$  – vnitřní průměr)

Výpočet vstupního hrdla:

Maximální hmotnostní průtok topné vody:  $\dot{m}_{v-max} = 480 \frac{kg}{s}$

Rychlost proudění topné vody:  $v_v = 2 \frac{m}{s}$

Hustota vody na vstupu: z parních tabulek [8]

$p_v = 1,2 MPa, t_{v-in} = 55^\circ C \rightarrow \rho_{v-in} = 990,099 \frac{kg}{m^3}$

Průřezový průřez vody vstupním hrdlem:

$$S_{v-in} = \frac{\dot{m}_{v-max}}{\rho_{v-in} \cdot v_v} = \frac{480}{990,099 \cdot 2} = 0,242 m^2$$

Vnitřní průměr vstupního hrdla:

$$D_{v-in} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{v-in}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,242}{\pi}} = 0,555 m$$

Výpočet výstupního hrdla:

Maximální hmotnostní průtok topné vody:  $\dot{m}_{v-max} = 480 \frac{kg}{s}$

Rychlost proudění topné vody:  $v_v = 2 \frac{m}{s}$

Hustota vody na výstupu: z parních tabulek [8]

$$p_v = 1,2 \text{ MPa}, t_{v-out} = 72,3^\circ \text{C} \rightarrow \rho_{v-out} = 980,392 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Průtočný průřez vody výstupním hrdlem:

$$S_{v-out} = \frac{\dot{m}_{v-max}}{\rho_{v-out} \cdot v_v} = \frac{480}{980,392 \cdot 2} = 0,245 \text{ m}^2$$

Vnitřní průměr výstupního hrdla:

$$D_{v-out} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{v-out}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,245}{\pi}} = 0,558 \text{ m}$$

Pro vstupní i výstupní hrdlo byl zvolen rozměr DN600 PN25.

### 3.1.2. Výpočet rozměrů hrdel na straně páry a na straně kondenzátu

V tomto případě budou rozměry obou hrdel odlišné, jelikož hustota páry je řádově menší než hustota kondenzátu. Pára vstupuje do výměníku vstupním hrdlem páry v horní části parního pláště a kondenzuje v prostoru trubkového svazku a vytváří kondenzát. Ten stéká po trubkách a v dolní části parního pláště je odváděn hrdlem pro výstup kondenzátu.

Výpočet přívodního hrdla páry:

Přenášený tepelný výkon: z předběžného tepelného výpočtu  $\dot{Q} = 22\,828\,877,24 \text{ W}$

Entalpie páry: v zadání  $i_p'' = 2405,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Entalpie kondenzátu: z parních tabulek [8]

$$p_p = 0,0396 \text{ MPa} \rightarrow i_p' = 317,566 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Hustota páry: z parních tabulek [8]

$$p_p = 0,0396 \text{ MPa} \rightarrow \rho_p'' = 0,248 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Hustota kondenzátu: z parních tabulek [8]

$$p_p = 0,0396 \text{ MPa} \rightarrow \rho_p' = 970,874 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Rychlost proudění páry: voleno  $v_p = 40 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Hmotnostní průtok páry:

$$\dot{Q} = \dot{m}_p \cdot (i_p'' - i_p') \rightarrow \dot{m}_p = \frac{\dot{Q}}{(i_p'' - i_p')} = \frac{22\,828\,877,24}{(2405,6 - 317,554)} = 10,928 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Průtočný průřez páry:

$$S_p = \frac{\dot{m}_p}{\rho_p \cdot v_p} = \frac{10,928}{0,248 \cdot 40} = 0,992 \text{ m}^2$$

Vnitřní průměr parního hrdla:

$$D_p = \sqrt{\frac{4 \cdot S_p}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,992}{\pi}} = 1,124 \text{ m}$$

Velikost vstupního hrdla páry ovlivňuje rozměr pláště výměníku. Pod vstupním hrdlem páry je nutné zachovat dostatečný prostor pro její rozprouzení. Z tohoto důvodu je vhodné jedno hrdlo nahradit dvěmi. Vyjdeme z toho, že průtočná plocha páry musí být stejná, je však rozdělena na dvě části.

Výpočet vnitřního průměru hrdla při použití dvou hrdel na vstupu páry:

$$\frac{S_p}{2} = \frac{\pi \cdot D_{p-2}^2}{4} \rightarrow D_{p-2} = \sqrt{\frac{2 \cdot S_p}{\pi}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,992}{\pi}} = 0,794m$$

Pro vstup páry jsou tedy zvoleny dvě hrdla o rozměru DN800 PN6.

Výpočet hrdla odvodu kondenzátu:

Hmotnostní průtok páry:

$$\dot{m}_p = 10,928 \frac{kg}{s}$$

Hustota kondenzátu: z parních tabulek [8]

$$p_p = 0,0396MPa \rightarrow \rho_p = 970,874 \frac{kg}{m^3}$$

Rychlost proudění kondenzátu: voleno  $v_k = 0,8 \frac{m}{s}$

Průtočný průřez kondenzátu:

$$S_k = \frac{\dot{m}_p}{\rho_p \cdot v_k} = \frac{10,928}{970,874 \cdot 0,8} = 0,014m^2$$

Vnitřní průměr hrdla kondenzátu:

$$D_k = \sqrt{\frac{4 \cdot S_k}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,014}{\pi}} = 0,133m$$

Pro hrdlo výstupu kondenzátu byl zvolen rozměr DN150 PN6.

## 4. Hydraulický výpočet výměníku

Hydraulický výpočet zahrnuje výpočet velikosti tlakové ztráty při proudění topné vody výměníkem.

### 4.1. Výpočet tlakové ztráty topné vody

Celková tlaková ztráta zahrnuje ztráty třením topné vody v trubkách a ztráty místními odpory ve vstupní a výstupní komoře a v obrátové komoře. Celková tlaková ztráta je dále vypočtena jak pro nezanesený výměník, tak pro výměník s vrstvou nánosů tedy zanesený výměník.

#### 4.1.1. Výpočet tlakové ztráty v nezaneseném výměníku

Postup výpočtu podle literatury [7] a [12].

##### 4.1.1.1. Výpočet tlakové ztráty třením v potrubí

Teplota na vnitřní stěně trubky:

$$t_{in-t} = \left\{ (273,15 + t_{v-stř}) + \left[ \left( \frac{k}{\alpha_v} \right) \cdot (t_p - t_{v-stř}) \right] \right\} - 273,15 =$$

$$= \left\{ (273,15 + 63,65) + \left[ \left( \frac{3343,699}{10879,55} \right) \cdot (75,62 - 63,65) \right] \right\} - 273,15 = 67,329^\circ\text{C}$$

Dynamická viskozita topné vody v mezní vrstvě u vnitřní stěny trubky: z parních tabulek [8]

$$p_v = 1,2\text{MPa}, t_{in-t} = 67,329^\circ\text{C} \rightarrow \eta_{v-m} = 419,524 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

Dynamická viskozita topné vody ve středu proudu: z parních tabulek [8]

$$p_v = 1,2\text{MPa}, t_{v-stř} = 63,65^\circ\text{C} \rightarrow \eta_v = 441,541 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

Exponent  $a$  potřebný pro výpočet korekčního faktoru  $z_2$ :

Pro  $\text{Re} \geq 2320$  a pro tepelný tok směřující do trubkového svazku  $\rightarrow a = 0,14$

Korekční faktor  $z_1$ :

$$z_1 = \frac{L}{d_{t-in}} = \frac{6,121}{0,016} = 382,562$$

Korekční faktor  $z_2$ :

$$z_2 = \left( \frac{\eta_{v-m}}{\eta_v} \right)^a = \left( \frac{419,524 \cdot 10^{-6}}{441,541 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,14} = 0,993$$

Střední absolutní drsnost stěny trubky: pro daný materiál trubky  $k_t = 0,000015\text{m}$

Relativní drsnost stěny trubky:

$$k_{rel} = \frac{k_t}{d_{t-in}} = \frac{0,000015}{0,016} = 9,375 \cdot 10^{-4}$$

Substituční faktor  $x_9$ :

$$x_9 = \left\{ 2,457 \cdot \ln \left[ \frac{1}{\left( \frac{7}{\text{Re}} \right)^{0,9} + 0,27 \cdot k_{rel}} \right] \right\}^{16} =$$

$$= \left\{ 2,457 \cdot \ln \left[ \frac{1}{\left( \frac{7}{71301,25} \right)^{0,9} + 0,27 \cdot 9,375 \cdot 10^{-4}} \right] \right\}^{16} = 2,287 \cdot 10^{20}$$

Substituční faktor  $x_{10}$ :

$$x_{10} = \left( \frac{37\,530}{\text{Re}} \right)^{16} = \left( \frac{37\,530}{71\,301,25} \right)^{16} = 3,471 \cdot 10^{-5}$$

Součinitel třecích ztrát: pro  $\text{Re} \geq 2320$

$$\lambda_{11} = 8 \cdot \left[ \left( \frac{8}{\text{Re}} \right)^{12} + \frac{1}{(x_9 + x_{10})^{\frac{3}{2}}} \right]^{\frac{1}{12}} =$$

$$= 8 \cdot \left[ \left( \frac{8}{71301,25} \right)^{12} + \frac{1}{(2,287 \cdot 10^{20} + 3,471 \cdot 10^{-5})^{\frac{3}{2}}} \right]^{\frac{1}{12}} = 0,023$$

Počet chodů výměníku:  $n_{ch} = 2$

Tlaková ztráta třením v potrubí:

$$\Delta p_t = \lambda_{11} \cdot \frac{\rho_{v-stř} \cdot v_v^2}{2} \cdot n_{ch} \cdot z_1 \cdot z_2 = 0,023 \cdot \frac{985,246 \cdot 2^2}{2} \cdot 2 \cdot 382,562 \cdot 0,993 = 34\,339,067 \text{ Pa}$$

#### 4.1.1.2. Výpočet tlakové ztráty způsobené místními odpory

Součinitel ztrát pro vstup a výstup ze svazku:  $\xi_{11} = 0,7$

Součinitel ztrát při ohybu proudu v obrátové komoře:  $\xi_{12} = 0,4$

Tlaková ztráta místními odpory:

$$\Delta p_m = [\xi_{11} \cdot n_{ch} + \xi_{12} \cdot (n_{ch} - 1)] \cdot \frac{\rho_{v-stř} \cdot v_v^2}{2} = [0,7 \cdot 2 + 0,4 \cdot (2 - 1)] \cdot \frac{985,246 \cdot 2^2}{2} = 3546,886 \text{ Pa}$$

#### 4.1.1.3. Výpočet celkové tlakové ztráty

Jedná se o součet ztrát, které jsou způsobeny třením v trubkách a ztrát, které jsou způsobeny místními odpory.

$$\Delta p_c = \Delta p_t + \Delta p_m = 34339,067 + 3546,886 = 37\,885,953 \text{ Pa} = 37,886 \text{ kPa}$$

### 4.1.2. Výpočet tlakové ztráty v zaneseném výměníku

Pro zanesený stav bude teplota na vnitřní stěně trubky ovlivněna vrstvou nánosů. Je třeba proto přepočítat součinitel přestupu tepla podle kapitoly 2.1.1.2. Postup výpočtu podle literatury [7] a [12].

#### 4.1.2.1. Výpočet tlakové ztráty třením v potrubí pro zanesený stav

Výška vrstvy nánosů:  $\delta_n = 0,0001m$

Střední absolutní drsnost vrstvy nánosů:  $k_m = 0,00003m$

Průtočná plocha s vrstvou nánosů:

$$S_n = \frac{\pi \cdot (d_{t-in} - 2 \cdot \delta_n)^2}{4} \cdot n_t = \frac{\pi \cdot (0,016 - 2 \cdot 0,0001)^2}{4} \cdot 1214 = 0,238m^2$$

Rychlost proudění topné vody při zanesení:

$$v_{vn} = \frac{\dot{m}_{v-max}}{S_n \cdot \rho_{v-stř}} = \frac{480}{0,238 \cdot 985,246} = 2,047 \frac{m}{s}$$

Přepočet Reynoldsova čísla pro zanesený stav: výpočet stejný jako v kapitole 2.1.1.2.

$$Re_n = \frac{v_{vn} \cdot (d_{t-in} - 2 \cdot \delta_n)}{\nu} = \frac{2,047 \cdot (0,016 - 2 \cdot 0,0001)}{4,488 \cdot 10^{-7}} = 72\,057,326$$

Prandtlovo číslo: výpočet stejný jako v kapitole 2.1.1.2.

$$Pr = \frac{\nu_v}{a_v} = \frac{4,488 \cdot 10^{-7}}{1,5897 \cdot 10^{-7}} = 2,823$$

Přepočet Nusseltova čísla pro zanesený stav: výpočet stejný jako v kapitole 2.1.1.2.

$$Nu_n = C \cdot Re_n^m \cdot Pr^n = 0,023 \cdot 72057,326^{0,8} \cdot 2,823^{0,4} = 268,012$$

Přepočet součinitele přestupu tepla na straně vody pro zanesený stav: dle kapitoly 2.1.1.2.

$$\alpha_{vn} = \frac{Nu_n \cdot \lambda_v}{(d_{t-in} - 2 \cdot \delta_n)} = \frac{268,012 \cdot 0,655}{(0,013 - 2 \cdot 0,0001)} = 11\,110,636 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Teplota na vnitřní stěně pro zanesený stav: dle kapitoly 2.1.1.2.

$$t_{in-in} = \left\{ (273,15 + t_{v-stř}) + \left[ \left( \frac{k_{nános}}{\alpha_{vn}} \right) \cdot (t_p - t_{v-stř}) \right] \right\} - 273,15 =$$

$$= \left\{ (273,15 + 63,65) + \left[ \left( \frac{3009,329}{11\,110,636} \right) \cdot (75,62 - 63,65) \right] \right\} - 273,15 = 66,892^\circ C$$

Dynamická viskozita topné vody v mezní vrstvě u vnitřní stěny trubky: z parních tabulek [8]

$$p_v = 1,2MPa, t_{in-in} = 66,892^\circ C \rightarrow \eta_{v-mn} = 422,112 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{m \cdot s}$$

Dynamická viskozita topné vody ve středu proudu: z parních tabulek [8]

$$p_v = 1,2MPa, t_{v-stř} = 63,65^\circ C \rightarrow \eta_v = 441,541 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{m \cdot s}$$

Exponent  $a$  potřebný pro výpočet korekčního faktoru  $z_2$ :

Pro  $Re \geq 2320$  a pro tepelný tok směřující do trubkového svazku  $\rightarrow a = 0,14$

Korekční faktor  $z_{1n}$ :

$$z_{1n} = \frac{L}{(d_{t-in} - 2 \cdot \delta_n)} = \frac{6,121}{(0,016 - 2 \cdot 0,0001)} = 387,405$$

Korekční faktor  $z_{2n}$ :

$$z_{2n} = \left( \frac{\eta_{v-mn}}{\eta_v} \right)^a = \left( \frac{422,112 \cdot 10^{-6}}{441,541 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,14} = 0,994$$

Relativní drsnost stěny trubky pro zanesený stav:

$$k_{rel-n} = \frac{k_{tn}}{(d_{t-in} - 2 \cdot \delta_n)} = \frac{0,00003}{(0,016 - 2 \cdot 0,0001)} = 18,987 \cdot 10^{-4}$$

Substituční faktor  $x_{9n}$ :

$$x_{9n} = \left\{ 2,457 \cdot \ln \left[ \frac{1}{\left( \frac{7}{Re_n} \right)^{0,9} + 0,27 \cdot k_{rel-n}} \right] \right\}^{16} =$$

$$= \left\{ 2,457 \cdot \ln \left[ \frac{1}{\left( \frac{7}{72057,326} \right)^{0,9} + 0,27 \cdot 18,987 \cdot 10^{-4}} \right] \right\}^{16} = 8,911 \cdot 10^{19}$$

Substituční faktor  $x_{10n}$ :

$$x_{10n} = \left( \frac{37\,530}{Re_n} \right)^{16} = \left( \frac{37\,530}{72057,326} \right)^{16} = 2,932 \cdot 10^{-5}$$

Součinitel třecích ztrát: pro  $Re \geq 2320$

$$\lambda_{11n} = 8 \cdot \left[ \left( \frac{8}{Re_n} \right)^{12} + \frac{1}{(x_{9n} + x_{10n})^{\frac{3}{2}}} \right]^{\frac{1}{12}} =$$

$$= 8 \cdot \left[ \left( \frac{8}{72057,326} \right)^{12} + \frac{1}{(8,911 \cdot 10^{19} + 2,932 \cdot 10^{-5})^{\frac{3}{2}}} \right]^{\frac{1}{12}} = 0,025$$

Tlaková ztráta třením v potrubí pro zanesený stav:

$$\Delta p_{tn} = \lambda_{11n} \cdot \frac{\rho_{v-str} \cdot v_{vn}^2}{2} \cdot n_{ch} \cdot z_1 \cdot z_2 = 0,025 \cdot \frac{985,246 \cdot 2,047^2}{2} \cdot 2 \cdot 387,405 \cdot 0,994 = 40\,782,167 Pa$$

**4.1.2.2. Výpočet tlakové ztráty způsobené místními odpory pro zanesený stav**

Součinitel ztrát pro vstup a výstup ze svazku:  $\xi_{11} = 0,7$

Součinitel ztrát při ohybu proudu v obrátové komoře:  $\xi_{12} = 0,4$

Tlaková ztráta místními odpory pro zanesený stav:

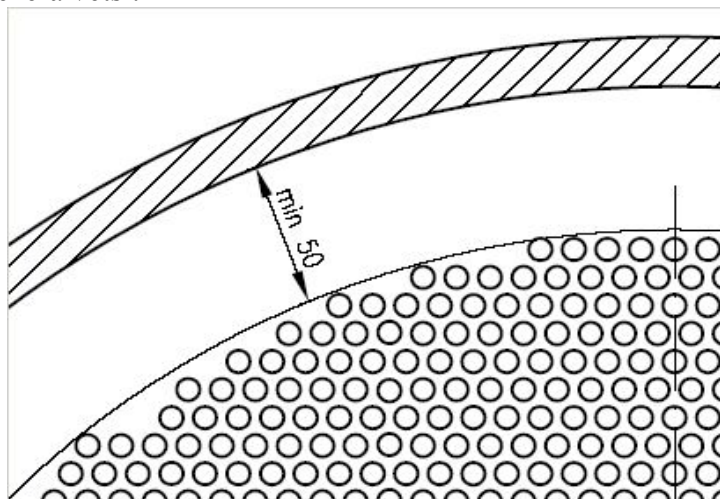
$$\Delta p_{mn} = [\xi_{11} \cdot n_{ch} + \xi_{12} \cdot (n_{ch} - 1)] \cdot \frac{\rho_{v-stř} \cdot v_{vn}^2}{2} = [0,7 \cdot 2 + 0,4 \cdot (2 - 1)] \cdot \frac{985,246 \cdot 2,047^2}{2} = 3714,796 Pa$$

**4.1.2.3. Výpočet celkové tlakové ztráty pro zanesený stav**

$$\Delta p_{cn} = \Delta p_{tn} + \Delta p_{mn} = 40782,167 + 3714,796 = 44\,496,963 Pa = 44,497 kPa$$

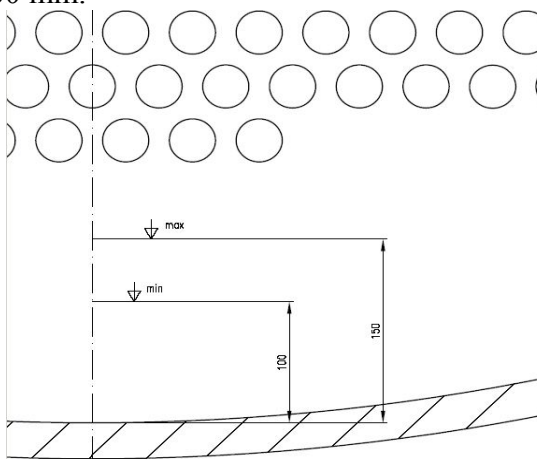
## 5. Návrh konstrukčního řešení

V této části jsou navrženy předběžné rozměry jednotlivých částí výměníku, které se poté kontrolují v pevnostním výpočtu. Z předešlých kapitol již známe délku teplosměnných trubek a jejich rozložení. Známe také rozměry vstupních a výstupních hrdel pro topnou vodu a páru. Jelikož se jedná o celosvařovanou konstrukci, musíme brát ohled na dostupnost všech prostor. Zejména na mezeru mezi trubkovým svazkem vodního a parního pláště. Rozměr mezery je zvolen 50 mm, ale z důvodu normalizovaných rozměrů pro klenutá dna nádob je ve skutečnosti tato mezera větší.



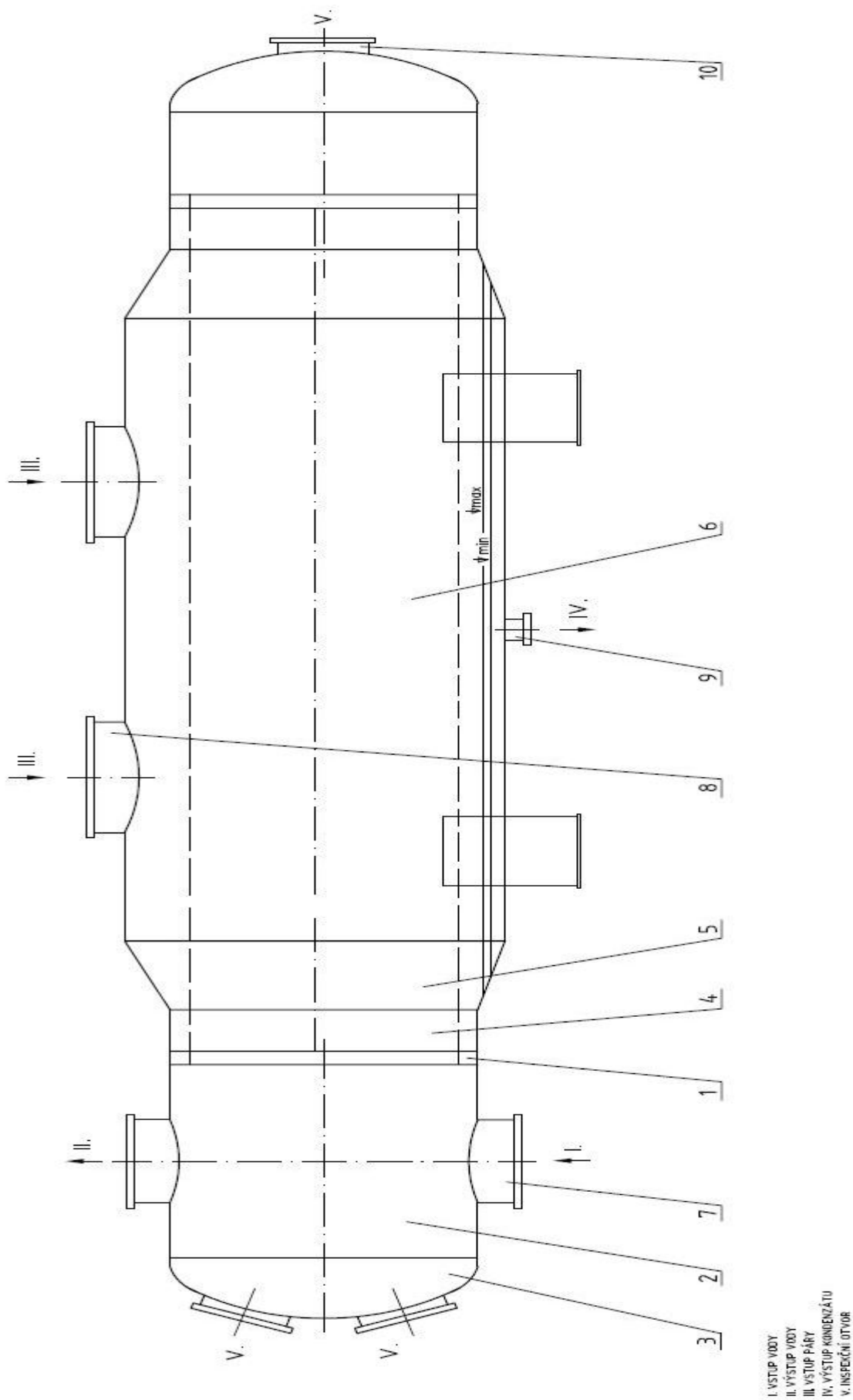
Obr. 15. Znázornění mezery mezi pláštěm a trubkovým svazkem

Vnější průměr klenutého dna volen 1700 mm. Stejný rozměr zvolen i pro plášť vodní komory, část parního pláště a vnější průměr trubkovnice. Při volbě průměru parního pláště hrály roli dva faktory. Aby nedocházelo k zaplavování trubek ve spodní části svazku je zde vymezen prostor pro regulaci kondenzátu. Maximální výška hladiny kondenzátu byla volena 150 mm a její minimální hodnota 100 mm.



Obr. 16. Znázornění výšky hladiny kondenzátu

V horní části parního pláště musíme zase zajistit rovnoměrné rozložení proudění páry přes trubkový svazek a proto volíme mezi pláštěm a trubkovým svazkem vhodnou mezeru. Z technické praxe chodíme na hodnotu jedné třetiny. Dle výpočtu a použití dvou vstupních hrdel jde o hodnotu jedné čtvrtiny. Na základě těchto faktorů je vnější průměr parního pláště volen 2100 mm. Podle výše uvedených konstrukčních parametrů je vytvořen konstrukční návrh výměníku.



Obr. 17. Výměník tepla

## 6. Pevnostní výpočet

Zadání:

Pro zadané pevnostní dimenzování zvolte vhodný materiál a proveďte pevnostní výpočet hlavních částí (trubkovnice, plášť, vodní komora) dle ČSN 69 0010.

Parametry:

|                                             |              |
|---------------------------------------------|--------------|
| Maximální dovolený tlak – prostor svazku    | 16 bar (g)   |
| Maximální dovolený tlak – prostor pláště    | -1-2 bar (g) |
| Maximální dovolená teplota – prostor svazku | 125°C        |
| Maximální dovolená teplota – prostor pláště | 150°C        |

Dovolené namáhání, součinitele bezpečnosti, součinitele hodnoty svaru, přídavky k výpočtové tloušťce konstrukčních částí, výpočtová teplota a označení podle ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.2 Všeobecná část pro nádoby z oceli [1].

### 6.1. Klenutá dna nádob

Výpočet a značení podle ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.7 Klenutá dna nádob [6]. Klenuté dno nádoby bude provedeno jako torosférické z materiálu P265GH s vnějším průměrem 1700 mm a tloušťkou stěny 18 mm.

Mez kluzu:  $R_{p0,2} = 265 \text{ MPa}$

Minimální hodnota smluvní meze kluzu při teplotě 125°C:  $R_{p0,2t} = 223,5 \text{ MPa}$

Pevnost v tahu:  $R_m = 410 \text{ MPa}$

Opravný součinitel k dovolenému namáhání:  $\tau = 1$

Součinitel bezpečnosti pro provoz:  $n_T = 1,5$

Součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti:  $n_B = 2,4$

Součinitel bezpečnosti pro tlakovou zkoušku:  $n_{T-z} = 1,1$

Dovolené namáhání:

$$[\sigma] = \tau \cdot \min \left\{ \frac{R_{p0,2t}}{n_T}; \frac{R_m}{n_B} \right\} = 1 \cdot \min \left\{ \frac{223,5}{1,5}; \frac{410}{2,4} \right\} = 149 \text{ MPa}$$

Dovolené namáhání pro tlakovou zkoušku:

$$[\sigma]_z = \tau \cdot \left\{ \frac{R_{p0,2}}{n_{T-z}} \right\} = 1 \cdot \left\{ \frac{265}{1,1} \right\} = 240,909 \text{ MPa}$$

Výpočtový tlak:  $p = 1,6 \text{ MPa}$

Zkušební tlak:  $p_t = 1,5 \cdot p = 1,5 \cdot 1,6 = 2,4 \text{ MPa}$

### 6.1.1. Torosférické dno zatíženo vnitřním přetlakem

Vnější průměr dna:  $D_1 = 1700\text{mm}$

Vnitřní průměr dna:  $D = 1664\text{mm}$

Součinitel:  $\beta_1 = 1,51$

Součinitel:  $\beta_2 = 1,5$

Přídavek k výpočtové tloušťce zohledňující vliv koroze:  $c_1 = 1\text{mm}$

Přídavek k výpočtové tloušťce zohledňující vliv záporné tolerance:  $c_2 = 0,5\text{mm}$

Technologický přídavek:  $c_3 = 0,6\text{mm}$

Celkový přídavek k výpočtové tloušťce:  $c = c_1 + c_2 + c_3 = 1 + 0,5 + 0,6 = 2,1\text{mm}$

Součinitel hodnoty svarového spoje:  $\varphi = 1$

Vnitřní poloměr klenutí ve vrcholu dna:  $R = 1360\text{mm}$

Tloušťka stěny v okrajové oblasti:

$$s_{1R} = \frac{p \cdot D_1 \cdot \beta_1}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]} = \frac{1,6 \cdot 1700 \cdot 1,51}{2 \cdot 1 \cdot 149} = 13,783\text{mm}$$

$$s_1 = s_{1R} + c = 13,783 + 2,1 = 15,883\text{mm}$$

Tloušťka stěny pro středovou oblast:

$$s_{1R} = \frac{p \cdot R}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - 0,5 \cdot p} = \frac{1,6 \cdot 1360}{2 \cdot 1 \cdot 149 - 0,5 \cdot 1,6} = 7,322\text{mm}$$

$$s_1 = s_{1R} + c = 7,322 + 2,1 = 9,422\text{mm}$$

Pro klenuté dno byla zvolena tloušťka  $s = 18\text{mm}$ .

Dovolený vnitřní přetlak z podmínky pevnosti okrajové oblasti:

$$[p] = \frac{2 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{D_1 \cdot \beta_2} = \frac{2 \cdot (18 - 2,1) \cdot 1 \cdot 149}{1700 \cdot 1,5} = 1,865\text{MPa} \geq 1,6\text{MPa}$$

Dovolený vnitřní přetlak z podmínky pevnosti středové oblasti:

$$[p] = \frac{2 \cdot (s - c) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{R + 0,5 \cdot (s - c)} = \frac{2 \cdot (18 - 2,1) \cdot 1 \cdot 149}{1360 + 0,5 \cdot (18 - 2,1)} = 3,464\text{MPa} \geq 1,6\text{MPa}$$

Z výsledků je patrné, že pro zvolenou tloušťku klenuté dno vyhovuje.

### 6.1.2. Rozsah platnosti výpočtových vzorců

Pro torosférická dna platí:

$$0,002 \leq \frac{s_1 - c}{D} = \frac{15,883 - 2,1}{1664} = 0,008 \leq 0,1$$

## 6.2. Plášť na straně vody

Výpočet a značení podle ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.5 Válcové části nádob [4]. Pro válcovou část nádoby plášť byla z ohledem na přivaření ke klenutému dnu zvolena tloušťka 18 mm a vnější průměr 1700 mm a materiál P265GH.

Mez kluzu:  $R_{p0,2} = 265 \text{ MPa}$

Minimální hodnota smluvní meze kluzu při teplotě 125°C:  $R_{p0,2t} = 223,5 \text{ MPa}$

Pevnost v tahu:  $R_m = 410 \text{ MPa}$

Opravný součinitel k dovolenému namáhání:  $\tau = 1$

Součinitel bezpečnosti pro provoz:  $n_T = 1,5$

Součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti:  $n_B = 2,4$

Součinitel bezpečnosti pro tlakovou zkoušku:  $n_{T-z} = 1,1$

Dovolené namáhání:

$$[\sigma] = \tau \cdot \min \left\{ \frac{R_{p0,2t}}{n_T}; \frac{R_m}{n_B} \right\} = 1 \cdot \min \left\{ \frac{223,5}{1,5}; \frac{410}{2,4} \right\} = 149 \text{ MPa}$$

Dovolené namáhání pro tlakovou zkoušku:

$$[\sigma]_z = \tau \cdot \left\{ \frac{R_{p0,2}}{n_{T-z}} \right\} = 1 \cdot \left\{ \frac{265}{1,1} \right\} = 240,909 \text{ MPa}$$

Výpočtový tlak:  $p = 1,6 \text{ MPa}$

Zkušební tlak:  $p_t = 1,5 \cdot p = 1,5 \cdot 1,6 = 2,4 \text{ MPa}$

### 6.2.1. Hladká válcová skořepina zatížená vnitřním přetlakem

Vnitřní průměr skořepiny:  $D = 1664 \text{ mm}$

Součinitel hodnoty svarového spoje:  $\varphi_p = 0,7$

Přídavek k výpočtové tloušťce zohledňující vliv koroze:  $c_1 = 1 \text{ mm}$

Technologický přídavek:  $c_3 = 0,6 \text{ mm}$

Celkový přídavek k výpočtové tloušťce:  $c = c_1 + c_3 = 1 + 0,6 = 1,6 \text{ mm}$

Tloušťka stěny:

$$s_R = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi_p \cdot [\sigma] - p} = \frac{1,6 \cdot 1664}{2 \cdot 0,7 \cdot 149 - 1,6} = 12,862 \text{ mm}$$

$$s = s_R + c = 12,862 + 1,6 = 14,462 \text{ mm}$$

Pro plášť na straně vody byla zvolena tloušťka  $s = 18 \text{ mm}$ .

Dovolený vnitřní přetlak:

$$[p] = \frac{2 \cdot (s - c) \cdot \varphi_p \cdot [\sigma]}{D + (s - c)} = \frac{2 \cdot (18 - 1,6) \cdot 0,7 \cdot 149}{1664 + (18 - 1,6)} = 2,036 \text{ MPa} \geq 1,6 \text{ MPa}$$

Z výsledků je patrné, že pro zvolenou tloušťku válcová skořepina vyhovuje.

### 6.2.2. Rozsah platnosti výpočtových vzorců

Pro výpočtové vzorce platí:

$$\frac{s - c}{D} = \frac{18 - 1,6}{1664} = 0,01 \leq 0,1 \text{ pro skořepiny s } D \geq 200 \text{ mm}$$

### 6.3. Plášť na straně páry (1700)

Výpočet a značení podle ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.5 Válcové části nádob [4]. Pro válcovou část nádoby pláště zvolena tloušťka 10 mm a vnější průměr 1700 mm a materiál P265GH.

Mez kluzu:  $R_{p0,2} = 265 \text{ MPa}$

Minimální hodnota smluvní meze kluzu při teplotě 150°C:  $R_{p0,2t} = 223 \text{ MPa}$

Pevnost v tahu:  $R_m = 410 \text{ MPa}$

Opravný součinitel k dovolenému namáhání:  $\tau = 1$

Součinitel bezpečnosti pro provoz:  $n_T = 1,5$

Součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti:  $n_B = 2,4$

Součinitel bezpečnosti proti ztrátě stability k mezi pevnosti:  $n_u = 2,4$

Součinitel bezpečnosti pro tlakovou zkoušku:  $n_{T-z} = 1,1$

Dovolené namáhání:

$$[\sigma] = \tau \cdot \min \left\{ \frac{R_{p0,2t}}{n_T}; \frac{R_m}{n_B} \right\} = 1 \cdot \min \left\{ \frac{223}{1,5}; \frac{410}{2,4} \right\} = 148,667 \text{ MPa}$$

Dovolené namáhání pro tlakovou zkoušku:

$$[\sigma]_z = \tau \cdot \left\{ \frac{R_{p0,2}}{n_{T-z}} \right\} = 1 \cdot \left\{ \frac{265}{1,1} \right\} = 240,909 \text{ MPa}$$

Výpočtový tlak:  $p = 0,2 \text{ MPa}$

Výpočtový tlak (vnější):  $p = 0,1 \text{ MPa}$

Zkušební tlak:  $p_t = 1,5 \cdot p = 1,5 \cdot 0,2 = 0,3 \text{ MPa}$

#### 6.3.1. Hladká válcová skořepina zatížená vnitřním přetlakem

Vnitřní průměr skořepiny:  $D = 1680 \text{ mm}$

Součinitel hodnoty svarového spoje:  $\varphi_p = 0,7$

Přídavek k výpočtové tloušťce zohledňující vliv koroze:  $c_1 = 1 \text{ mm}$

Technologický přídavek:  $c_3 = 0,5 \text{ mm}$

Celkový přídavek k výpočtové tloušťce:  $c = c_1 + c_3 = 1 + 0,5 = 1,5 \text{ mm}$

Tloušťka stěny:

$$s_R = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi_p \cdot [\sigma] - p} = \frac{0,2 \cdot 1680}{2 \cdot 0,7 \cdot 148,667 - 0,2} = 1,616 \text{ mm}$$

$$s = s_R + c = 1,616 + 1,5 = 3,116 \text{ mm}$$

Pro plášť byla zvolena tloušťka  $s = 10 \text{ mm}$ .

Dovolený vnitřní přetlak:

$$[p] = \frac{2 \cdot (s - c) \cdot \varphi_p \cdot [\sigma]}{D + (s - c)} = \frac{2 \cdot (10 - 1,5) \cdot 0,7 \cdot 148,667}{1680 + (10 - 1,5)} = 1,047 \text{ MPa} \geq 0,2 \text{ MPa}$$

Z výsledků je patrné, že pro zvolenou tloušťku válcová skořepina vyhovuje.

### 6.3.2. Hladká válcová skořepina zatížená vnějším přetlakem

Součinitelé:  $K_1 = 7$ ,  $K_2 = 0,5$ ,  $K_3 = 0,2$

Modul pružnosti v tahu materiálu při výpočtové teplotě:  $E = 190000 \text{ MPa}$

Tloušťka stěny:

$$s_R = \max \left\{ K_2 \cdot D \cdot 10^{-2}, \frac{1,1 \cdot p \cdot D}{2 \cdot [\sigma]} \right\} = \max \left\{ 0,5 \cdot 1680 \cdot 10^{-2}, \frac{1,1 \cdot 0,1 \cdot 1680}{2 \cdot 148,666} \right\} = \max \{8,4, 0,621\}$$

$$s_R = 8,4 \text{ mm}$$

$$s = s_R + c = 8,4 + 1,5 = 9,9 \text{ mm}$$

Pro plášť zvolena tloušťka  $s = 10 \text{ mm}$ .

Dovolený vnější přetlak:

$$[p] = 2,4 \cdot \frac{K_1 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_u} = 2,4 \cdot \frac{7 \cdot 10^{-6} \cdot 190000}{2,4} = 1,33 \text{ MPa} \geq 0,1 \text{ MPa}$$

### 6.3.3. Rozsah platnosti výpočtových vzorců

Pro výpočtové vzorce platí:

$$\frac{s - c}{D} = \frac{10 - 1,5}{1680} = 0,005 \leq 0,1 \text{ pro skořepiny s } D \geq 200 \text{ mm}$$

## 6.4. Plášť na straně páry (2100)

Výpočet a značení podle ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.5 Válcové části nádob [4]. Pro válcovou část nádoby pláště zvolena tloušťka 10 mm a vnější průměr 2100 mm a materiál P265GH.

Mez kluzu:  $R_{p0,2} = 265 \text{ MPa}$

Minimální hodnota smluvní meze kluzu při teplotě 150°C:  $R_{p0,2t} = 223 \text{ MPa}$

Pevnost v tahu:  $R_m = 410 \text{ MPa}$

Opravný součinitel k dovolenému namáhání:  $\tau = 1$

Součinitel bezpečnosti pro provoz:  $n_T = 1,5$

Součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti:  $n_B = 2,4$

Součinitel bezpečnosti proti ztrátě stability k mezi pevnosti:  $n_u = 2,4$

Součinitel bezpečnosti pro tlakovou zkoušku:  $n_{T-z} = 1,1$

Dovolené namáhání:

$$[\sigma] = \tau \cdot \min \left\{ \frac{R_{p0,2t}}{n_T}, \frac{R_m}{n_B} \right\} = 1 \cdot \min \left\{ \frac{223}{1,5}, \frac{410}{2,4} \right\} = 148,667 \text{ MPa}$$

Dovolené namáhání pro tlakovou zkoušku:

$$[\sigma]_z = \tau \cdot \left\{ \frac{R_{p0,2}}{n_{T-z}} \right\} = 1 \cdot \left\{ \frac{265}{1,1} \right\} = 240,909 \text{ MPa}$$

Výpočtový tlak:  $p = 0,2 \text{ MPa}$

Výpočtový tlak (vnější):  $p = 0,1 \text{ MPa}$

Zkušební tlak:  $p_t = 1,5 \cdot p = 1,5 \cdot 0,2 = 0,3 \text{ MPa}$

#### 6.4.1. Hladká válcová skořepina zatížená vnitřním přetlakem

Vnitřní průměr skořepiny:  $D = 2080 \text{ mm}$

Součinitel hodnoty svarového spoje:  $\varphi_p = 0,7$

Přídavek k výpočtové tloušťce zohledňující vliv koroze:  $c_1 = 1 \text{ mm}$

Technologický přídavek:  $c_3 = 0,5 \text{ mm}$

Celkový přídavek k výpočtové tloušťce:  $c = c_1 + c_3 = 1 + 0,5 = 1,5 \text{ mm}$

Tloušťka stěny:

$$s_R = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi_p \cdot [\sigma] - p} = \frac{0,2 \cdot 2080}{2 \cdot 0,7 \cdot 148,667 - 0,2} = 2,001 \text{ mm}$$

$$s = s_R + c = 2,001 + 1,5 = 3,501 \text{ mm}$$

Pro plášť byla zvolena tloušťka  $s = 10 \text{ mm}$ .

Dovolený vnitřní přetlak:

$$[p] = \frac{2 \cdot (s - c) \cdot \varphi_p \cdot [\sigma]}{D + (s - c)} = \frac{2 \cdot (10 - 1,5) \cdot 0,7 \cdot 148,667}{2080 + (10 - 1,5)} = 0,847 \text{ MPa} \geq 0,2 \text{ MPa}$$

Z výsledků je patrné, že pro zvolenou tloušťku válcová skořepina vyhovuje.

#### 6.4.2. Hladká válcová skořepina zatížená vnějším přetlakem

Součinitelé:  $K_1 = 0,65$ ,  $K_2 = 0,4$ ,  $K_3 = 1,9$

Modul pružnosti v tahu materiálu při výpočtové teplotě:  $E = 190000 \text{ MPa}$

Tloušťka stěny:

$$s_R = \max \left\{ K_2 \cdot D \cdot 10^{-2}, \frac{1,1 \cdot p \cdot D}{2 \cdot [\sigma]} \right\} = \max \left\{ 0,4 \cdot 2080 \cdot 10^{-2}, \frac{1,1 \cdot 0,1 \cdot 2080}{2 \cdot 148,666} \right\} = \max \{8,32, 0,769\}$$

$$s_R = 8,32 \text{ mm}$$

$$s = s_R + c = 8,32 + 1,5 = 9,82 \text{ mm}$$

Pro plášť zvolena tloušťka  $s = 10 \text{ mm}$ .

Dovolený vnější přetlak:

$$[p] = 2,4 \cdot \frac{K_1 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_u} = 2,4 \cdot \frac{0,6 \cdot 10^{-6} \cdot 190000}{2,4} = 0,124 \text{ MPa} \geq 0,1 \text{ MPa}$$

#### 6.4.3. Rozsah platnosti výpočtových vzorců

Pro výpočtové vzorce platí:

$$\frac{s - c}{D} = \frac{10 - 1,5}{2080} = 0,004 \leq 0,1 \text{ pro skořepiny s } D \geq 200 \text{ mm}$$

## 6.5. Kuželové části nádoby

Výpočet a značení podle ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.6 Kuželové části nádob [5]. Pro kuželovou část pláště zvolena tloušťka 10 mm a materiál P265GH.

Mez kluzu:  $R_{p0,2} = 265 \text{ MPa}$

Minimální hodnota smluvní meze kluzu při teplotě 150°C:  $R_{p0,2t} = 223 \text{ MPa}$

Pevnost v tahu:  $R_m = 410 \text{ MPa}$

Opravný součinitel k dovolenému namáhání:  $\tau = 1$

Součinitel bezpečnosti pro provoz:  $n_T = 1,5$

Součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti:  $n_B = 2,4$

Součinitel bezpečnosti proti ztrátě stability k mezi pevnosti:  $n_u = 2,4$

Součinitel bezpečnosti pro tlakovou zkoušku:  $n_{T-z} = 1,1$

Dovolené namáhání:

$$[\sigma] = \tau \cdot \min \left\{ \frac{R_{p0,2t}}{n_T}; \frac{R_m}{n_B} \right\} = 1 \cdot \min \left\{ \frac{223}{1,5}; \frac{410}{2,4} \right\} = 148,667 \text{ MPa}$$

Dovolené namáhání pro tlakovou zkoušku:

$$[\sigma]_z = \tau \cdot \left\{ \frac{R_{p0,2}}{n_{T-z}} \right\} = 1 \cdot \left\{ \frac{265}{1,1} \right\} = 240,909 \text{ MPa}$$

Výpočtový tlak:  $p = 0,2 \text{ MPa}$

Zkušební tlak:  $p_t = 1,5 \cdot p = 1,5 \cdot 0,2 = 0,3 \text{ MPa}$

### 6.5.1. Označení a výpočtové parametry

Výpočtové délky přechodových částí:

Průměr menší podstavy kuželové skořepiny:  $D_1 = 1680 \text{ mm}$

Vnitřní průměr skořepiny:  $D = 2080 \text{ mm}$

Efektivní průměr skořepiny:  $D_E = D = 2080 \text{ mm}$

Efektivní délka skořepiny:  $l_E = 500 \text{ mm}$

Poloviční vrcholový úhel kuželové skořepiny:  $\alpha_1 = 25^\circ, \alpha_2 = 0^\circ$

Provedené tloušťky stěn přechodových částí skořepin:  $s_1 = s_2 = s_T = 10 \text{ mm}$

Provedená tloušťka stěny kuželové skořepiny:  $s_k = 10 \text{ mm}$

Přídavek k výpočtové tloušťce zohledňující vliv koroze:  $c_1 = 1 \text{ mm}$

Technologický přídavek:  $c_3 = 0,5 \text{ mm}$

Celkový přídavek k výpočtové tloušťce:  $c = c_1 + c_3 = 1 + 0,5 = 1,5 \text{ mm}$

Výpočtové délky přechodových částí skořepin:

$$a_1 = \sqrt{\frac{D}{\cos \alpha_1}} \cdot (s_1 - c) = \sqrt{\frac{2080}{\cos 25}} \cdot (10 - 1,5) = 93,488 \text{ mm}$$

$$a_2 = \sqrt{D \cdot (s_1 - c)} = \sqrt{2080 \cdot (10 - 1,5)} = 93,076 \text{ mm}$$

Výpočtový průměr hladké části skořepiny:

$$D_K = D - 1,4 \cdot a_1 \cdot \sin \alpha_1 = 2080 - 1,4 \cdot 93,488 \cdot \sin 25 = 2097,323 \text{ mm}$$

Výpočtové hodnoty součinitelů svarových spojů:

Součinitel hodnoty svarového spoje (podélný):  $\varphi_p = 0,7$

Součinitel hodnoty svarového spoje (obvodový):  $\varphi_T = 0,7$

Součinitel hodnoty svarového spoje:

$$\varphi_R = \min\{\varphi_p; \sqrt{\varphi_T}\} = \min\{0,7; \sqrt{0,7}\} = \min\{0,7; 0,837\} = 0,7$$

### 6.5.2. Rozsah a podmínky výpočtových vzorců

$$0,001 \leq \frac{s_1 \cdot \cos \alpha_1}{D} = \frac{10 \cdot \cos 25^\circ}{2080} = 0,005 \leq 0,05$$

### 6.5.3. Hladká kuželová skořepina zatížená vnitřním přetlakem

Tloušťka stěny:

$$s_{KR} = \frac{p \cdot D_K}{2 \cdot \varphi_p \cdot [\sigma] - p \cos \alpha_1} = \frac{0,2 \cdot 2097,323}{2 \cdot 0,7 \cdot 148,667 - 0,2 \cos 25^\circ} = 2,035 \text{ mm}$$

$$s_K = s_{KR} + c = 2,035 + 1,5 = 3,535 \text{ mm}$$

Provedená tloušťka stěny kuželové skořepiny  $s_k = 10 \text{ mm}$ .

Dovolený vnitřní přetlak:

$$[p] = \frac{2 \cdot (s_K - c) \cdot \varphi_p \cdot [\sigma]}{\frac{D_K}{\cos \alpha_1} + (s_K - c)} = \frac{2 \cdot (10 - 1,5) \cdot 0,7 \cdot 148,667}{\frac{2097,323}{\cos 25^\circ} + (10 - 1,5)} = 0,833 \text{ MPa} \geq 0,2 \text{ MPa}$$

Spoj skořepin bez anuloidového přechodu:

Součinitel tvaru:

$$\rightarrow \beta = 1,9 \text{ pro } \frac{s_1 - c}{s_2 - c} = 1 \text{ a } \frac{p}{\varphi_R \cdot [\sigma]} = 0,002$$

$$\rightarrow \beta = 1,15 \text{ pro } \frac{s_1 - c}{s_2 - c} = 1 \text{ a } \frac{D}{s_2 - c} = 244,706$$

Celkový součinitel tvaru přechodové části:

$$\beta_1 = \max\{0,5; \beta\} = \max\{0,5; 1,9; 1,15\} = 1,9$$

Tloušťka stěny v přechodové části:

$$s_{2R} = \frac{p \cdot D \cdot \beta_1}{2 \cdot \varphi_R \cdot [\sigma] - p \cos \alpha_2} = \frac{0,2 \cdot 2080 \cdot 1,9}{2 \cdot 0,7 \cdot 148,667 - 0,2 \cos 0^\circ} = 3,801 \text{ mm}$$

$$s_2 = s_{2R} + c = 3,801 + 1,5 = 5,301 \text{ mm}$$

Tloušťka stěny kuželového elementu:

$$s_1 \geq \left( \frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right) \cdot s_{2R} + c = \left( \frac{10 - 1,5}{10 - 1,5} \right) \cdot 3,801 + 1,5 = 5,301 \text{ mm}$$

Dovolený vnitřní přetlak pro přechodovou část skořepiny:

$$[p] = \frac{2 \cdot (s_2 - c) \cdot \varphi_R \cdot [\sigma]}{\frac{D \cdot \beta_1}{\cos \alpha_2} + (s_2 - c)} = \frac{2 \cdot (10 - 1,5) \cdot 0,7 \cdot 148,667}{\frac{2080 \cdot 1,9}{\cos 0^\circ} + (10 - 1,5)} = 0,447 \text{ MPa} \geq 0,2 \text{ MPa}$$

Spojení vnitřního válcového pláště s kuželovou skořepinou:

Součinitel tvaru:

$$\rightarrow \beta_H = \beta + 0,75 = 1,9 + 0,75 = 2,65$$

$$\rightarrow \beta_H = 2 \text{ pro } \frac{s_1 - c}{s_2 - c} = 1 \text{ a } \frac{D}{s_2 - c} = 244,706$$

$$\rightarrow \beta_H = 2,5 \text{ pro } \frac{s_1 - c}{s_2 - c} = 1 \text{ a } \frac{p}{[\sigma] \cdot \varphi_R} = 0,002$$

Součinitel tvaru částí skořepin:

$$\beta_4 = \max\{1; \beta_H\} = \max\{1; 2; 2,5; 2,65\} = 2,65$$

Tloušťka stěny v přechodové části:

$$s_{2R} = \frac{p \cdot D \cdot \beta_4}{2 \cdot \varphi_R \cdot [\sigma] - p} = \frac{0,2 \cdot 2080 \cdot 2,65}{2 \cdot 0,7 \cdot 148,667 - 0,2} = 4,282 \text{ mm}$$

$$s = s_{2R} + c = 4,282 + 1,5 = 5,782 \text{ mm}$$

Tloušťka stěny kuželové části přechodu:

$$s_1 \geq \left( \frac{s_1 - c}{s_2 - c} \right) \cdot s_{2R} + c = \left( \frac{10 - 1,5}{10 - 1,5} \right) \cdot 4,282 + 1,5 = 5,782 \text{ mm}$$

Dovolený vnitřní přetlak pro kuželovou část přechodu:

$$[p] = \frac{2 \cdot (s_2 - c) \cdot \varphi_R \cdot [\sigma]}{D \cdot \beta_4 + (s_2 - c)} = \frac{2 \cdot (10 - 1,5) \cdot 0,7 \cdot 148,667}{2080 \cdot 2,65 + (10 - 1,5)} = 0,397 \text{ MPa} \geq 0,2 \text{ MPa}$$

#### 6.5.4. Hladká kuželová skořepina zatížená vnějším přetlakem

Opravný součinitel v elastickém oboru:  $B_1 = 1$

Modul pružnosti v tahu materiálu při výpočtové teplotě:  $E = 190000 \text{ MPa}$

Dovolený přetlak v plastickém oboru:

$$[p]_p = \frac{2 \cdot (s_K - c) \cdot [\sigma]}{\frac{D_K}{\cos \alpha_1} + (s_K - c)} = \frac{2 \cdot (10 - 1,5) \cdot 148,667}{\frac{2097,323}{\cos 25^\circ} + (10 - 1,5)} = 1,189 \text{ MPa}$$

Dovolený přetlak v elastickém oboru:

$$[p]_E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_u \cdot B_1} \cdot \frac{D_E}{l_E} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s_K - c)}{D_E} \right]^2 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot (s_K - c)}{D_E}} =$$

$$= \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 190000}{2,4 \cdot 1} \cdot \frac{2080}{500} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (10 - 1,5)}{2080} \right]^2 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot (10 - 1,5)}{2080}} = 0,731 \text{ MPa}$$

Dovolený vnější přetlak:

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}} = \frac{1,189}{\sqrt{1 + \left( \frac{1,189}{0,731} \right)^2}} = 0,623 \text{ MPa} \geq 0,1 \text{ MPa}$$

## 6.6. Trubkovnice

Výpočet a značení podle ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.13 Trubkové výměníky tepla [2]. Tloušťka trubkovnice zvolena 100 mm a materiál P355GH.

### 6.6.1. Podmínky platnosti výpočtových vzorců

Provedená tloušťka trubkovnice v trubkovaném poli a v netrubkované oblasti:  $s_p = 100 \text{ mm}$

Přídavek k výpočtové tloušťce zohledňující vliv koroze:  $c_1 = 1 \text{ mm}$

Technologický přídavek:  $c_3 = 1 \text{ mm}$

Součet všech přídavků k výpočtovým tloušťkám:  $c = c_1 + c_3 = 1 + 1 = 2 \text{ mm}$

Vnitřní průměr pláště:  $D_{K1} = 1680 \text{ mm}$ ,  $D_{K2} = 2080 \text{ mm}$

$$\frac{s_p - c}{D_{K1}} = \frac{100 - 2}{1680} = 0,058 \leq 0,4; \quad \frac{s_p - c}{D_{K2}} = \frac{100 - 2}{2080} = 0,047 \leq 0,4$$

### 6.6.2. Obecné výpočtové parametry

Vnější průměr trubky:  $d_T = 18 \text{ mm}$

Provedená tloušťka stěny trubky:  $s_T = 1 \text{ mm}$

Součet všech přídavků k výpočtovým tloušťkám pro trubku:  $c_T = 0,4 \text{ mm}$

Součinitel závislý na rozložení trubek:  $\Theta = 1,15$  pro trubky umístěné do vrcholů rovnostranných trojúhelníků

Tloušťka stěny pláště:  $t_l = 10 \text{ mm}$

Rozměr svarového spoje: délka svarového spoje trubky s trubkovnicí

$$a = e = 0,7 \cdot t_l = 0,7 \cdot 10 = 7 \text{ mm}$$

Výpočtový počet trubek:  $n_R = n = 2428$

Rozteč trubek:  $t = 26$

Výpočtový průměr otrubkované plochy:

$$D_R = 2 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{n_R}{\pi \cdot \Theta}} = 2 \cdot 26 \cdot \sqrt{\frac{2428}{\pi \cdot 1,15}} = 1348,043 \text{ mm}$$

Průměr otrubkované plochy je  $D_R = 1480 \text{ mm}$  podle navržené trubkové sítě.

Výpočtový průměr trubkovnice:  $D_H = 1700 \text{ mm}$  dle výkresu a průměru okolních plášťů

Šířka netrubkovaného okraje:

$$b = \frac{D_H - D_R}{2} = \frac{1700 - 1480}{2} = 110 \text{ mm}$$

Bezrozměrná šířka netrubkovaného okraje:

$$\lambda_B = \frac{2 \cdot b}{D_R} = \frac{2 \cdot 110}{1480} = 0,149$$

Výpočtová rozteč trubek:

$$t_R = t \cdot \sqrt{\frac{n_R}{n \cdot \Theta}} = 26 \cdot \sqrt{\frac{2428}{2428 \cdot 1,15}} = 24,245 \text{ mm}$$

Skutečná rozteč trubek dle zadání:  $t_R = t = 26 \text{ mm}$

Součinitele vlivu přetlaku na trubkovnici:

$$\eta_1 = 1 - \frac{\pi}{4} \cdot \left( \frac{d_T}{t_R} \right)^2 = 1 - \frac{\pi}{4} \cdot \left( \frac{18}{26} \right)^2 = 0,624$$

$$\eta_2 = 1 - \frac{\pi}{4} \cdot \left( \frac{d_T - 2 \cdot s_T}{t_R} \right)^2 = 1 - \frac{\pi}{4} \cdot \left( \frac{18 - 2 \cdot 1}{26} \right)^2 = 0,703$$

Přetlak v mezitrubkovém prostoru:  $p_1 = 0,2 \text{ MPa}$

Přetlak v trubkovém prostoru:  $p_2 = 1,6 \text{ MPa}$

Efektivní přetlak:

$$p_E = p_2 \cdot \eta_2 - p_1 \cdot \eta_1 = 1,6 \cdot 0,703 - 0,2 \cdot 0,624 = 0,999 \text{ MPa}$$

Efektivní průměr otvoru v trubkovnici:

$$d_E = d_T - 2 \cdot s_T = 18 - 2 \cdot 1 = 16 \text{ mm}$$

Součinitel zeslabení trubkovnice: pro trubkovnice bez drážek pro přepážky

$$\varphi_p = 1 - \frac{d_E}{t} = 1 - \frac{18}{26} = 0,385$$

Dovolené zatížení trubek:

Dovolené namáhání trubek při výpočtové teplotě:  $[\sigma]_T = 167 \text{ MPa}$

Dovolené namáhání trubkovnice při výpočtové teplotě:  $[\sigma]_p = 265 \text{ MPa}$

Součinitel plochy průřezu trubky:

$$g = \pi \cdot \frac{(d_T - s_T) \cdot (s_T - c_T)}{t_R^2} = \pi \cdot \frac{(18 - 1) \cdot (1 - 0,4)}{26^2} = 0,047$$

Součinitel vlivu dvouosého namáhání: u výměníků s pevnými trubkovnicemi

$$\gamma = 1 - \frac{(d_T - s_T) \cdot |p_2 - p_1|}{2 \cdot (s_T - c_T) \cdot [\sigma]_T} = 1 - \frac{(18 - 1) \cdot |1,6 - 0,2|}{2 \cdot (1 - 0,4) \cdot 167} = 0,881$$

Dovolené zatížení trubek určené z jejich pevnosti:

$$[q]_T = \vartheta \cdot \gamma \cdot [\sigma]_T = 0,055 \cdot 0,881 \cdot 167 = 6,976 \text{ MPa}$$

Dovolené zatížení spoje trubek s trubkovnicí: pro zaválcované trubky  $[q]_S = [q]_{S1}$

Délka zaválcování:  $l_v = 40 \text{ mm}$

Součinitel pro hladké zaválcování:  $\mu = 0,25$

$$[q]_{S1} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{(s_T - c_T) \cdot l_v \cdot \mu \cdot [\sigma]_T}{t_R^2} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{(1 - 0,4) \cdot 40 \cdot 0,25 \cdot 167}{26^2} = 9,313 \text{ MPa}$$

Dovolené zatížení trubek namáhaných tahem:

$$[q^+] = \min\{[q]_T; [q]_S\} = \min\{6,976; 9,313\} = 6,976 \text{ MPa}$$

Délka trubky:  $l_T = 6,121 \text{ mm}$

Volná délka trubky:  $l_1 = 700 \text{ mm}$

Modul pružnosti materiálu trubek při výpočtové teplotě:  $E_T = 208000 \text{ MPa}$

Součinitel bezpečnosti ke ztrátě stability trubek:  $n_u = 2,4$

Redukovaná délka trubky při vzpěru:

$$l_R = \min\{0,5 \cdot l_T; 0,7 \cdot l_1\} = \min\{0,5 \cdot 6,121; 0,7 \cdot 700\} = \min\{3160,5; 490\} = 490 \text{ mm}$$

Součinitel vzpěrnosti:

$$\varphi_T = \frac{1}{\sqrt{1 + \left\{ 0,81 \cdot n_u \cdot \frac{[\sigma]_T}{E_T} \cdot \left( \frac{l_R}{d_T - s_T} \right)^2 \right\}^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left\{ 0,81 \cdot 2,4 \cdot \frac{169}{208000} \cdot \left( \frac{490}{18 - 1} \right)^2 \right\}^2}} = 0,997$$

Dovolené namáhání trubek namáhaných na vzpěr:

$$[q^-] = \min\{[q]_T \cdot \varphi_T; [q]_S\} = \min\{6,976 \cdot 0,997; 9,313\} = 6,957 \text{ MPa}$$

### 6.6.3. Výměníky s pevnými trubkovnicemi

Rozměry oválu vepsaného do největší netrubkované plochy: podle návrhu trubkové sítě

$$L = 800 \text{ mm}, H = 200 \text{ mm}$$

Tloušťka trubkovnice:

$$s_{PR} = 0,5 \cdot H \cdot \sqrt{\frac{3}{1 + \frac{H}{L} + \left(\frac{H}{L}\right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{|p_2 - p_1|}{[\sigma]_p}} =$$

$$= 0,5 \cdot 200 \cdot \sqrt{\frac{3}{1 + \frac{200}{800} + \left(\frac{200}{800}\right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{|1,6 - 0,2|}{265}} = 11,630 \text{ mm}$$

$$s_p \geq s_{PR} + c = 11,630 + 2 = 13,630 \text{ mm}$$

Tloušťka pro netrubkovaný okraj:

$$s_{PR} = 0,85 \cdot b \cdot \sqrt{\frac{|p_2 - p_1|}{[\sigma]_p}} = 0,85 \cdot 110 \cdot \sqrt{\frac{|1,6 - 0,2|}{265}} = 5,597 \text{ mm}$$

Kontrola pevnosti trubek:

$$\begin{aligned} -[q^-] &\leq -p_E - \lambda_B \cdot (p_2 - p_1) \leq [q^+] \\ -6,957 \text{ MPa} &\leq -0,999 - 0,149 \cdot (1,6 - 0,2) \leq 6,976 \text{ MPa} \\ -6,957 \text{ MPa} &\leq -1,208 \text{ MPa} \leq 6,976 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Dovolená tahová síla: dle ČSN 69 0010 část 4.5 [4]

$$\begin{aligned} [F^+] &= \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] \cdot \varphi_T = \\ &= \pi \cdot (1700 + 10 - 1,5) \cdot (10 - 1,5) \cdot 148,667 \cdot 0,7 = 4467241,87 \text{ N} \end{aligned}$$

Dovolená osová síla v plastické oblasti: dle ČSN 69 0010 část 4.5 [4]

$$\begin{aligned} [F]_p &= \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = \\ &= \pi \cdot (1700 + 10 - 1,5) \cdot (10 - 1,5) \cdot 148,667 = 6381774,1 \text{ N} \end{aligned}$$

Dovolená osová síla v elastické oblasti: dle ČSN 69 0010 část 4.5 [4]

$$\begin{aligned} [F]_E &= \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_u} \cdot D^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^2 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot (s - c)}{D}} = \\ &= \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot 208000}{2,4} \cdot 1700^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (10 - 1,5)}{1700} \right]^2 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot (10 - 1,5)}{1700}} = 13725767,6 \text{ N} \end{aligned}$$

Dovolená osová tlaková síla: dle ČSN 69 0010 část 4.5 [4]

$$[F^-] = \frac{[F]_p}{\sqrt{1 + \left( \frac{[F]_p}{[F]_E} \right)^2}} = \frac{6381774}{\sqrt{1 + \left( \frac{6381774}{13725767,6} \right)^2}} = 5886860,67 \text{ N}$$

Kontrola pevnosti pláště:

$$\begin{aligned} -[F^-] &\leq \frac{\pi \cdot D_R^2}{4} \cdot [p_2 \cdot (1 + \lambda_B) + p_1 \cdot \lambda_B] \leq [F^+] \\ -5886860,67 \text{ N} &\leq \frac{\pi \cdot 1480^2}{4} \cdot [1,6 \cdot (1 + 0,149) + 0,2 \cdot 0,149] \leq 4467241,87 \text{ N} \\ -5886860,67 \text{ N} &\leq 3212843,97 \text{ N} \leq 4467241,87 \text{ N} \end{aligned}$$

## 6.7. Hrdlo pro přírubu DN150 PN6

Výpočet a značení podle ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.5 Válcové části nádob [4]. Pro válcovou část nádoby zvolena tloušťka 4,5 mm a vnější průměr 168,3 mm a materiál P265GH.

Mez kluzu:  $R_{p0,2} = 265 \text{ MPa}$

Minimální hodnota smluvní meze kluzu při teplotě  $150^\circ\text{C}$ :  $R_{p0,2t} = 223 \text{ MPa}$

Pevnost v tahu:  $R_m = 410 \text{ MPa}$

Opravný součinitel k dovolenému namáhání:  $\tau = 1$

Součinitel bezpečnosti pro provoz:  $n_T = 1,5$

Součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti:  $n_B = 2,4$

Součinitel bezpečnosti pro tlakovou zkoušku:  $n_{T-z} = 1,1$

Dovolené namáhání:

$$[\sigma] = \tau \cdot \min \left\{ \frac{R_{p0,2t}}{n_T}; \frac{R_m}{n_B} \right\} = 1 \cdot \min \left\{ \frac{223}{1,5}; \frac{410}{2,4} \right\} = 148,667 \text{ MPa}$$

Dovolené namáhání pro tlakovou zkoušku:

$$[\sigma]_z = \tau \cdot \left\{ \frac{R_{p0,2}}{n_{T-z}} \right\} = 1 \cdot \left\{ \frac{265}{1,1} \right\} = 240,909 \text{ MPa}$$

Výpočtový tlak:  $p = 0,2 \text{ MPa}$

Zkušební tlak:  $p_t = 1,5 \cdot p = 1,5 \cdot 0,2 = 0,3 \text{ MPa}$

### 6.7.1. Hladká válcová skořepina zatížená vnitřním přetlakem

Vnitřní průměr skořepiny:  $D = 159,3 \text{ mm}$

Součinitel hodnoty svarového spoje:  $\varphi_p = 1$

Přídavek k výpočtové tloušťce zohledňující vliv koroze:  $c_1 = 1 \text{ mm}$

Technologický přídavek:  $c_3 = 0,4 \text{ mm}$

Celkový přídavek k výpočtové tloušťce:  $c = c_1 + c_3 = 1 + 0,4 = 1,4 \text{ mm}$

Tloušťka stěny:

$$s_R = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi_p \cdot [\sigma] - p} = \frac{0,2 \cdot 159,3}{2 \cdot 1 \cdot 148,667 - 0,2} = 0,107 \text{ mm}$$

$$s = s_R + c = 0,107 + 1,4 = 1,507 \text{ mm}$$

Pro plášť byla zvolena tloušťka  $s = 4,5 \text{ mm}$ .

Dovolený vnitřní přetlak:

$$[p] = \frac{2 \cdot (s - c) \cdot \varphi_p \cdot [\sigma]}{D + (s - c)} = \frac{2 \cdot (4,5 - 1,4) \cdot 1 \cdot 148,667}{159,3 + (4,5 - 1,4)} = 5,676 \text{ MPa} \geq 0,2 \text{ MPa}$$

Z výsledků je patrné, že pro zvolenou tloušťku válcová skořepina vyhovuje.

### 6.7.2. Rozsah platnosti výpočtových vzorců

Pro výpočtové vzorce platí:

$$\frac{s - c}{D} = \frac{4,5 - 1,4}{159,3} = 0,019 \leq 0,3 \text{ pro skořepiny s } D \leq 200 \text{ mm}$$

## 6.8. Hrdlo pro přírubu DN500 PN25

Výpočet a značení podle ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.5 Válcové části nádob [4]. Pro válcovou část nádoby zvolena tloušťka 6,3 mm a vnější průměr 507,9 mm a materiál P265GH.

Mez kluzu:  $R_{p0,2} = 265 \text{ MPa}$

Minimální hodnota smluvní meze kluzu při teplotě 125°C:  $R_{p0,2t} = 232 \text{ MPa}$

Pevnost v tahu:  $R_m = 410 \text{ MPa}$

Opravný součinitel k dovolenému namáhání:  $\tau = 1$

Součinitel bezpečnosti pro provoz:  $n_T = 1,5$

Součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti:  $n_B = 2,4$

Součinitel bezpečnosti pro tlakovou zkoušku:  $n_{T-z} = 1,1$

Dovolené namáhání:

$$[\sigma] = \tau \cdot \min \left\{ \frac{R_{p0,2t}}{n_T}; \frac{R_m}{n_B} \right\} = 1 \cdot \min \left\{ \frac{232}{1,5}; \frac{410}{2,4} \right\} = 154,667 \text{ MPa}$$

Dovolené namáhání pro tlakovou zkoušku:

$$[\sigma]_z = \tau \cdot \left\{ \frac{R_{p0,2}}{n_{T-z}} \right\} = 1 \cdot \left\{ \frac{265}{1,1} \right\} = 240,909 \text{ MPa}$$

Výpočtový tlak:  $p = 0,2 \text{ MPa}$

Zkušební tlak:  $p_t = 1,5 \cdot p = 1,5 \cdot 0,2 = 0,3 \text{ MPa}$

### 6.8.1. Hladká válcová skořepina zatížená vnitřním přetlakem

Vnitřní průměr skořepiny:  $D = 495,3 \text{ mm}$

Součinitel hodnoty svarového spoje:  $\varphi_p = 0,7$

Přídavek k výpočtové tloušťce zohledňující vliv koroze:  $c_1 = 1 \text{ mm}$

Technologický přídavek:  $c_3 = 0,4 \text{ mm}$

Celkový přídavek k výpočtové tloušťce:  $c = c_1 + c_3 = 1 + 0,4 = 1,4 \text{ mm}$

Tloušťka stěny:

$$s_R = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi_p \cdot [\sigma] - p} = \frac{0,2 \cdot 495,3}{2 \cdot 0,7 \cdot 154,667 - 0,2} = 3,688 \text{ mm}$$

$$s = s_R + c = 3,688 + 1,4 = 5,088 \text{ mm}$$

Pro plášť byla zvolena tloušťka  $s = 6,3 \text{ mm}$ .

Dovolený vnitřní přetlak:

$$[p] = \frac{2 \cdot (s - c) \cdot \varphi_p \cdot [\sigma]}{D + (s - c)} = \frac{2 \cdot (6,3 - 1,4) \cdot 0,7 \cdot 154,667}{495,3 + (6,3 - 1,4)} = 2,121 \text{ MPa} \geq 1,6 \text{ MPa}$$

Z výsledků je patrné, že pro zvolenou tloušťku válcová skořepina vyhovuje.

### 6.8.2. Rozsah platnosti výpočtových vzorců

Pro výpočtové vzorce platí:

$$\frac{s-c}{D} = \frac{6,3-1,4}{495,3} = 0,01 \leq 0,1 \text{ pro skořepiny s } D \geq 200\text{mm}$$

### 6.9. Hrdlo pro přírubu DN600 PN25

Výpočet a značení podle ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.5 Válcové části nádob [4]. Pro válcovou část nádoby zvolena tloušťka 6,3 mm a vnější průměr 610 mm a materiál P265GH.

Mez kluzu:  $R_{p0,2} = 265\text{MPa}$

Minimální hodnota smluvní meze kluzu při teplotě 125°C:  $R_{p0,2t} = 232\text{MPa}$

Pevnost v tahu:  $R_m = 410\text{MPa}$

Opravný součinitel k dovolenému namáhání:  $\tau = 1$

Součinitel bezpečnosti pro provoz:  $n_T = 1,5$

Součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti:  $n_B = 2,4$

Součinitel bezpečnosti pro tlakovou zkoušku:  $n_{T-z} = 1,1$

Dovolené namáhání:

$$[\sigma] = \tau \cdot \min\left\{\frac{R_{p0,2t}}{n_T}; \frac{R_m}{n_B}\right\} = 1 \cdot \min\left\{\frac{232}{1,5}; \frac{410}{2,4}\right\} = 154,667\text{MPa}$$

Dovolené namáhání pro tlakovou zkoušku:

$$[\sigma]_z = \tau \cdot \left\{\frac{R_{p0,2}}{n_{T-z}}\right\} = 1 \cdot \left\{\frac{265}{1,1}\right\} = 240,909\text{MPa}$$

Výpočtový tlak:  $p = 0,2\text{MPa}$

Zkušební tlak:  $p_t = 1,5 \cdot p = 1,5 \cdot 0,2 = 0,3\text{MPa}$

#### 6.9.1. Hladká válcová skořepina zatížená vnitřním přetlakem

Vnitřní průměr skořepiny:  $D = 597,4\text{mm}$

Součinitel hodnoty svarového spoje:  $\varphi_p = 0,7$

Přídavek k výpočtové tloušťce zohledňující vliv koroze:  $c_1 = 1\text{mm}$

Technologický přídavek:  $c_3 = 0,4\text{mm}$

Celkový přídavek k výpočtové tloušťce:  $c = c_1 + c_3 = 1 + 0,4 = 1,4\text{mm}$

Tloušťka stěny:

$$s_R = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi_p \cdot [\sigma] - p} = \frac{0,2 \cdot 597,4}{2 \cdot 0,7 \cdot 154,667 - 0,2} = 4,447\text{mm}$$

$$s = s_R + c = 4,447 + 1,4 = 5,847\text{mm}$$

Pro plášť byla zvolena tloušťka  $s = 6,3\text{mm}$ .

Dovolený vnitřní přetlak:

$$[p] = \frac{2 \cdot (s - c) \cdot \varphi_p \cdot [\sigma]}{D + (s - c)} = \frac{2 \cdot (6,3 - 1,4) \cdot 0,7 \cdot 154,667}{597,4 + (6,3 - 1,4)} = 1,762 \text{ MPa} \geq 1,6 \text{ MPa}$$

Z výsledků je patrné, že pro zvolenou tloušťku válcová skořepina vyhovuje.

### 6.9.2. Rozsah platnosti výpočtových vzorců

Pro výpočtové vzorce platí:

$$\frac{s - c}{D} = \frac{6,3 - 1,4}{597,4} = 0,008 \leq 0,1 \quad \text{pro skořepiny s } D \geq 200 \text{ mm}$$

## 6.10. Hrdlo pro přírubu DN800 PN6

Výpočet a značení podle ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.5 Válcové části nádob [4]. Pro válcovou část nádoby zvolena tloušťka 8 mm a vnější průměr 813 mm a materiál P265GH.

Mez kluzu:  $R_{p0,2} = 265 \text{ MPa}$

Minimální hodnota smluvní meze kluzu při teplotě 150°C:  $R_{p0,2t} = 223 \text{ MPa}$

Pevnost v tahu:  $R_m = 410 \text{ MPa}$

Opravný součinitel k dovolenému namáhání:  $\tau = 1$

Součinitel bezpečnosti pro provoz:  $n_T = 1,5$

Součinitel bezpečnosti k mezi pevnosti:  $n_B = 2,4$

Součinitel bezpečnosti pro tlakovou zkoušku:  $n_{T-z} = 1,1$

Dovolené namáhání:

$$[\sigma] = \tau \cdot \min \left\{ \frac{R_{p0,2t}}{n_T}, \frac{R_m}{n_B} \right\} = 1 \cdot \min \left\{ \frac{223}{1,5}, \frac{410}{2,4} \right\} = 148,667 \text{ MPa}$$

Dovolené namáhání pro tlakovou zkoušku:

$$[\sigma]_z = \tau \cdot \left\{ \frac{R_{p0,2}}{n_{T-z}} \right\} = 1 \cdot \left\{ \frac{265}{1,1} \right\} = 240,909 \text{ MPa}$$

Výpočtový tlak:  $p = 0,2 \text{ MPa}$

Zkušební tlak:  $p_t = 1,5 \cdot p = 1,5 \cdot 0,2 = 0,3 \text{ MPa}$

### 6.10.1. Hladká válcová skořepina zatížená vnitřním přetlakem

Vnitřní průměr skořepiny:  $D = 159,3 \text{ mm}$

Součinitel hodnoty svarového spoje:  $\varphi_p = 0,7$

Přídavek k výpočtové tloušťce zohledňující vliv koroze:  $c_1 = 1 \text{ mm}$

Technologický přídavek:  $c_3 = 0,5 \text{ mm}$

Celkový přídavek k výpočtové tloušťce:  $c = c_1 + c_3 = 1 + 0,5 = 1,5 \text{ mm}$

Tloušťka stěny:

$$s_R = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi_p \cdot [\sigma] - p} = \frac{0,2 \cdot 797}{2 \cdot 0,7 \cdot 148,667 - 0,2} = 0,767 \text{ mm}$$

$$s = s_R + c = 0,767 + 1,5 = 2,267 \text{ mm}$$

Pro plášť byla zvolena tloušťka  $s = 8 \text{ mm}$ .

Dovolený vnitřní přetlak:

$$[p] = \frac{2 \cdot (s - c) \cdot \varphi_p \cdot [\sigma]}{D + (s - c)} = \frac{2 \cdot (8 - 1,5) \cdot 0,7 \cdot 148,667}{797 + (8 - 1,5)} = 1,684 \text{ MPa} \geq 0,2 \text{ MPa}$$

Z výsledků je patrné, že pro zvolenou tloušťku válcová skořepina vyhovuje.

### 6.10.2. Rozsah platnosti výpočtových vzorců

Pro výpočtové vzorce platí:

$$\frac{s - c}{D} = \frac{8 - 1,5}{797} = 0,008 \leq 0,3 \text{ pro skořepiny s } D \leq 200 \text{ mm}$$

## 7. Průběh tlaku páry přes trubkový svazek

Hlavním úkolem této kapitoly je určit průběh tlaku páry (tlaková ztráta) přes trubkový svazek. Jelikož množství zkondenzované páry je ve svazku S1 a S2 jiné, je výpočet proveden pro každý svazek zvlášť. Dále si trubkovou síť rozdělíme na jednotlivá mezikruží a jím odpovídající počet trubek. Zvolíme si podmínku, že tlak páry při průchodu svazkem je konstantní a všechna pára zkondenzuje (množství páry ve středu svazku bude nulová). Pokud známe množství páry zkondenzované na jednotlivých mezikruzích, tak můžeme určit rychlosti proudění páry v mezerách pro jednotlivá mezikruží a z nich určit průměrnou rychlost proudění páry. Pro průměrnou rychlost vypočteme tlakovou ztrátu pro jednotlivá mezikruží a jejich součtem získáme celkovou tlakovou ztrátu páry přes trubkový svazek. Výpočet pro svazek S1 a S2 je shodný.

### 7.1. Průběh tlaku páry přes svazek S1

Parametry potřebné pro výpočet:

Vstupní tlak páry: dle zadání  $p_{p-in} = 0,0396 \text{ MPa}$

Teplota páry na vstupu: z tepelného výpočtu  $t_{p-in} = 75,62^\circ\text{C}$

Entalpie páry na vstupu: dle zadání  $i_p'' = 2405,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Entalpie kondenzátu: z tepelného výpočtu  $i_k' = 317,566 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Hustota páry na vstupu: z tepelného výpočtu  $\rho_p'' = 0,248 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Hustota kondenzátu: z tepelného výpočtu  $\rho_k' = 970,874 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Dynamická viskozita páry: z parních tabulek [8]  $\eta_p = 11,446 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$

Teplota vody na vstupu: dle zadání  $t_{v-in} = 55^\circ\text{C}$

Teplota na výstupu ze svazku S1 (teplota na začátku obrátové komory bez vlivu chladiče): z tepelného výpočtu  $t_{v-out-S1} = 67,67^\circ\text{C}$

Měrná tepelná kapacita vody: z tepelného výpočtu  $c_{p-v} = 4182 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Jmenovitý hmotnostní průtok topné vody: dle zadání  $\dot{m}_{v-jmen} = 315,54 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

Počet trubek ve svazku S1: z tepelného výpočtu  $n_{t-S1} = 1132 \text{ trubek}$

Počet mezikruží ve svazku S1:  $n_{m-S1} = 21$

Počet trubek ve svazku S1 pro první mezikruží:  $n_{t-S1-m1} = 86 \text{ trubek}$

### 7.1.1. Průběh páry přes svazek S1

Hmotnostní průtok páry svazkem S1:

$$\dot{m}_{v-jmen} \cdot c_{p-v} \cdot (t_{v-out-S1} - t_{v-in}) = \dot{m}_{p-S1} \cdot (i_p'' - i_k') \rightarrow \dot{m}_{p-S1} = \frac{\dot{m}_{v-jmen} \cdot c_{p-v} \cdot (t_{v-out-S1} - t_{v-in})}{(i_p'' - i_k')} =$$

$$= \frac{315,54 \cdot 4182 \cdot (67,67 - 55)}{(2405,6 \cdot 1000 - 317,566 \cdot 1000)} = 8,007 \frac{kg}{s}$$

Množství páry zkondenzované na jedné trubce:

$$\dot{m}_{p-S1-1t} = \frac{\dot{m}_{p-S1}}{n_{t-S1}} = \frac{8,007}{1132} = 7,073 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s}$$

Množství páry po průchodu prvním mezikružím svazku S1:

$$\dot{m}_{p-S1-m1} = \dot{m}_{p-S1} - (\dot{m}_{p-S1-1t} \cdot n_{t-S1-m1}) = 8,007 - (7,073 \cdot 10^{-3} \cdot 86) = 7,398 \frac{kg}{s}$$

Stejný postup byl proveden pro zbývající mezikruží a jím odpovídající počet trubek. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 13. Průběh páry přes svazek S1

| mezikruží                | [—]    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
|--------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| počet trubek v mezikruží | [—]    | 86    | 79    | 76    | 75    | 72    | 69    |
| pára - vstup             | [kg/s] | 8,007 | 7,398 | 6,840 | 6,302 | 5,771 | 5,262 |
| pára - zkondenzovaná     | [kg/s] | 0,608 | 0,558 | 0,537 | 0,530 | 0,509 | 0,488 |
| pára - výstup            | [kg/s] | 7,398 | 6,840 | 6,302 | 5,771 | 5,262 | 4,774 |

Pokračování Tab. 13.

|       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    |
| 66    | 63    | 60    | 57    | 54    | 51    | 48    | 45    |
| 4,774 | 4,307 | 3,862 | 3,437 | 3,034 | 2,652 | 2,291 | 1,952 |
| 0,466 | 0,445 | 0,424 | 0,403 | 0,381 | 0,360 | 0,339 | 0,318 |
| 4,307 | 3,862 | 3,437 | 3,034 | 2,652 | 2,291 | 1,952 | 1,633 |

Pokračování Tab. 13.

|       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    |
| 42    | 39    | 36    | 33    | 30    | 27    | 24    |
| 1,633 | 1,336 | 1,061 | 0,806 | 0,572 | 0,360 | 0,169 |
| 0,297 | 0,275 | 0,254 | 0,233 | 0,212 | 0,190 | 0,169 |
| 1,336 | 1,061 | 0,806 | 0,572 | 0,360 | 0,169 | 0     |

### 7.1.2. Výpočet střední rychlosti ve svazku S1

Vnější průměr trubek:  $d = 0,018m$

Délka trubky:  $L = 6,121m$

Rozteč trubek:  $t = 0,026m$

Výška rovnostranného trojúhelníku mezi trubkami:  $v_t = 0,023m$

Mezera mezi trubkami:  $m_t = 0,008$

Plocha mezery mezi trubkami:

$$S_m = L \cdot m_t = 6,121 \cdot 0,008 = 0,049 m^2$$

Počet mezer mezi trubkami v prvním mezikruží:  $n_{mez-S1-1m} = 85$

Plocha mezery mezi trubkami pro první mezikruží:

$$S_{1m} = S_m \cdot n_{mez-S1-1m} = 0,049 \cdot 85 = 4,162 m^2$$

Rychlost páry v prvním mezikruží svazku S1:

$$v_{p-S1-1m} = \frac{\dot{m}_{p-S1-1m}}{S_{1m} \cdot \rho_p} = \frac{8,007}{4,162 \cdot 0,248} = 7,757 \frac{m}{s}$$

Stejný postup byl proveden pro zbývající mezikruží a jím odpovídající počet trubek. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 14. Průběh rychlosti svazkem S1

|                      |                   |       |       |       |       |       |       |
|----------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| mezikruží            | [—]               | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| počet mezer          | [—]               | 85    | 78    | 75    | 74    | 71    | 68    |
| plocha mezikruží     | [m <sup>2</sup> ] | 4,162 | 3,819 | 3,673 | 3,623 | 3,476 | 3,329 |
| rychlost v mezikruží | [m / s]           | 7,757 | 7,810 | 7,509 | 7,013 | 6,694 | 6,372 |

Pokračování Tab. 14.

|       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    |
| 65    | 62    | 59    | 56    | 53    | 50    | 47    | 44    |
| 3,182 | 3,036 | 2,889 | 2,742 | 2,595 | 2,448 | 2,301 | 2,154 |
| 6,048 | 5,712 | 5,390 | 5,054 | 4,714 | 4,368 | 4,015 | 3,653 |

Pokračování Tab. 14.

|       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    |
| 41    | 38    | 35    | 32    | 29    | 26    | 23    |
| 2,007 | 1,861 | 1,713 | 1,566 | 1,420 | 1,273 | 1,126 |
| 3,281 | 2,896 | 2,496 | 2,075 | 1,626 | 1,142 | 0,607 |

Průměrná rychlost páry ve svazku S1:

$$v_{p-S1-stř} = \frac{\sum v_{p-S1-m}}{n_{m-S1}} = \frac{96,252}{21} = 4,583 \frac{m}{s}$$

### 7.1.3. Tlaková ztráta ve svazku S1

Výpočet tlakové ztráty podle literatury [10].

Ukázka výpočtu tlakové ztráty pro první mezikruží:

Poměry charakterizující rozložení trubek:

$$P_T = \frac{t}{d} = \frac{26}{18} = 1,44 \quad ; \quad P_L = \frac{v_t}{d} = \frac{22,52}{18} = 1,25$$

Reynoldsovo číslo:

$$Re_p = \frac{v_{p-S1-stř} \cdot \rho_p \cdot l}{\eta_p} = \frac{4,583 \cdot 0,248 \cdot 6,121}{11,446 \cdot 10^{-6}} = 607871,221 \geq 10^5$$

Korekční faktor:  $\chi = 1,06$

Součinitel tření:  $f = 0,4$

Tlaková ztráta pro první mezikruží ve svazku S1:

$$\Delta p_{p-S1-1m} = n_{t-S1-1m} \cdot \chi \cdot \left( \frac{\rho_p \cdot v_{p-S1-stř}^2}{\eta_p} \right) = 86 \cdot 0,4 \cdot \left( \frac{0,248 \cdot 4,583^2}{11,446 \cdot 10^{-6}} \right) = 94,987 Pa$$

Stejný postup byl proveden pro zbývající mezikruží a jím odpovídající počet trubek. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 15. Průběh tlaku ve svazku S1:

| mezikruží                | [–]   | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
|--------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| počet trubek v mezikruží | [–]   | 86     | 79     | 76     | 75     | 72     | 69     |
| $\Delta p$ pro mezikruží | [Pa]  | 94,987 | 87,256 | 83,942 | 82,838 | 79,524 | 76,211 |
| tlak v mezikružích       | [kPa] | 39,550 | 39,417 | 39,333 | 39,250 | 39,171 | 39,095 |

Pokračování Tab. 15.

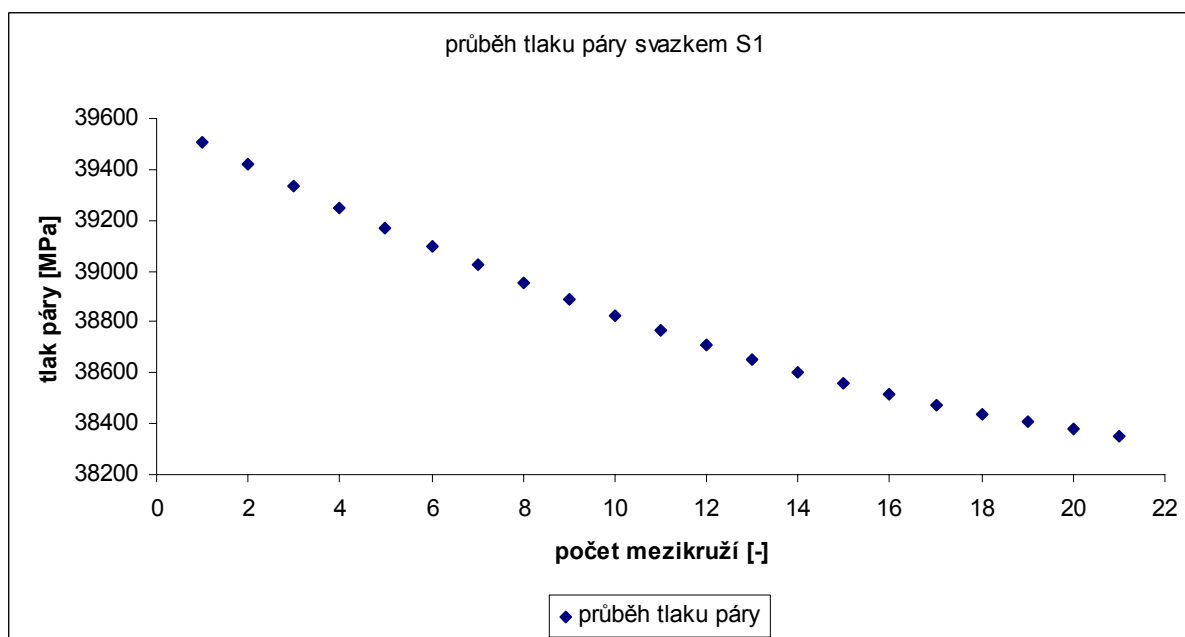
|        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 7      | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     | 13     | 14     |
| 66     | 63     | 60     | 57     | 54     | 51     | 48     | 45     |
| 72,897 | 69,584 | 66,270 | 62,957 | 59,643 | 56,330 | 53,016 | 49,703 |
| 39,022 | 38,952 | 38,886 | 38,823 | 38,763 | 38,707 | 38,654 | 38,604 |

Pokračování Tab. 15.

|        |        |        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 15     | 16     | 17     | 18     | 19     | 20     | 21     |
| 42     | 39     | 36     | 33     | 30     | 27     | 24     |
| 46,389 | 43,075 | 39,762 | 36,448 | 33,135 | 29,821 | 26,508 |
| 38,558 | 38,515 | 38,475 | 38,439 | 38,406 | 38,376 | 38,349 |

Celková tlaková ztráta ve svazku S1:

$$\Delta p_{p-c-S1} = p_{p-in} - p_{p-S1-21m} = 39600 - 38349 = 1250,306 Pa$$



Graf. 3. Průběh tlaku páry přes svazek S1

## 7.2. Průběh tlaku páry přes svazek S2

Parametry potřebné pro výpočet:

Vstupní tlak páry: dle zadání  $p_{p-in} = 0,0396 \text{ MPa}$

Teplota páry na vstupu: z tepelného výpočtu  $t_{p-in} = 75,62^\circ\text{C}$

Entalpie páry na vstupu: dle zadání  $i_p'' = 2405,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Entalpie kondenzátu: z tepelného výpočtu  $i_k' = 317,566 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Hustota páry na vstupu: z tepelného výpočtu  $\rho_p'' = 0,248 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Hustota kondenzátu: z tepelného výpočtu  $\rho_k' = 970,874 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Dynamická viskozita páry: z parních tabulek [8]  $\eta_p = 11,446 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$

Teplota vody na vstupu (teplota na výstupu z obrátové komory):  
z tepelného výpočtu  $t_{v-S2-in} = 69,96^\circ\text{C}$

Teplota na výstupu ze svazku S2: dle zadání  $t_{v-out} = 72,3^\circ\text{C}$

Měrná tepelná kapacita vody: z tepelného výpočtu  $c_{p-v} = 4182 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Jmenovitý hmotnostní průtok topné vody: dle zadání  $\dot{m}_{v-jmen} = 315,54 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

Počet trubek ve svazku S2: z tepelného výpočtu  $n_{t-S2} = 1214 \text{ trubek}$

Počet trubek ve svazku S2 pro první mezikruží:  $n_{t-S2-m1} = 95 \text{ trubek}$

### 7.2.1. Průběh páry přes svazek S2

Hmotnostní průtok páry svazkem S2:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{v-jmen} \cdot c_{p-v} \cdot (t_{v-out} - t_{v-S2-in}) &= \dot{m}_{p-S2} \cdot (i_p'' - i_k') \rightarrow \dot{m}_{p-S2} = \frac{\dot{m}_{v-jmen} \cdot c_{p-v} \cdot (t_{v-out} - t_{v-S2-in})}{(i_p'' - i_k')} = \\ &= \frac{315,54 \cdot 4182 \cdot (72,3 - 69,96)}{(2405,6 \cdot 1000 - 317,566 \cdot 1000)} = 3,374 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Množství páry zkondenzované na jedné trubce:

$$\dot{m}_{p-S2-1t} = \frac{\dot{m}_{p-S2}}{n_{t-S2}} = \frac{3,347}{1214} = 2,779 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Množství páry po průchodu prvním mezikružím svazku S2:

$$\dot{m}_{p-S2-m1} = \dot{m}_{p-S2} - \left( \dot{m}_{p-S2-1t} \cdot n_{t-S2-m1} \right) = 3,374 - (2,779 \cdot 10^{-3} \cdot 95) = 3,110 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Stejný postup byl proveden pro zbývající mezikruží a jím odpovídající počet trubek. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 16. Průběh páry přes svazek S2

| mezikruží                | [—]      | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
|--------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| počet trubek v mezikruží | [—]      | 95    | 90    | 86    | 82    | 79    | 74    |
| pára - vstup             | [kg / s] | 3,374 | 3,110 | 2,860 | 2,621 | 2,393 | 2,173 |
| pára - zkondenzovaná     | [kg / s] | 0,264 | 0,250 | 0,239 | 0,227 | 0,219 | 0,205 |
| pára - výstup            | [kg / s] | 3,110 | 2,860 | 2,621 | 2,393 | 2,173 | 1,968 |

Pokračování Tab. 16.

|       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    |
| 71    | 68    | 65    | 62    | 59    | 56    | 53    | 50    |
| 1,968 | 1,770 | 1,581 | 1,401 | 1,228 | 1,064 | 0,909 | 0,761 |
| 0,197 | 0,189 | 0,180 | 0,172 | 0,164 | 0,155 | 0,147 | 0,138 |
| 1,770 | 1,581 | 1,401 | 1,228 | 1,064 | 0,909 | 0,761 | 0,622 |

Pokračování Tab. 16.

|       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    |
| 45    | 42    | 39    | 36    | 33    | 29    |
| 0,622 | 0,497 | 0,380 | 0,272 | 0,172 | 0,080 |
| 0,125 | 0,116 | 0,108 | 0,100 | 0,091 | 0,080 |
| 0,497 | 0,380 | 0,272 | 0,172 | 0,080 | 0,0   |

### 7.2.2. Výpočet střední rychlosti ve svazku S2

Vnější průměr trubek:  $d = 0,018m$ Délka trubky:  $L = 6,121m$ Rozteč trubek:  $t = 0,026m$ Výška rovnostranného trojúhelníka mezi trubkami:  $v_t = 0,023m$ Mezera mezi trubkami:  $m_t = 0,008$ 

Plocha mezery mezi trubkami:

$$S_m = L \cdot m_t = 6,121 \cdot 0,008 = 0,049m^2$$

Počet mezer mezi trubkami v prvním mezikruží:  $n_{mez-S2-1m} = 94$ 

Plocha mezery mezi trubkami pro první mezikruží:

$$S_{1m} = S_m \cdot n_{mez-S2-1m} = 0,049 \cdot 94 = 4,602m^2$$

Rychlost páry v prvním mezikruží svazku S2:

$$v_{p-S2-1m} = \frac{m_{p-S2-1m}}{S_{1m} \cdot \rho_p} = \frac{3,374}{4,602 \cdot 0,248} = 2,956 \frac{m}{s}$$

Stejný postup byl proveden pro zbývající mezikruží a jím odpovídající počet trubek. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 17. Průběh rychlosti svazkem S2

| mezikruží            | [—]               | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
|----------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| počet mezer          | [—]               | 94    | 89    | 85    | 81    | 78    | 73    |
| plocha mezikruží     | [m <sup>2</sup> ] | 4,602 | 4,358 | 4,162 | 3,966 | 3,819 | 3,574 |
| rychlost v mezikruží | [m / s]           | 2,956 | 2,878 | 2,771 | 2,664 | 2,526 | 2,452 |

Pokračování Tab. 17.

|       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    |
| 70    | 67    | 64    | 61    | 58    | 55    | 52    | 49    |
| 3,427 | 3,280 | 3,133 | 2,987 | 2,840 | 2,693 | 2,546 | 2,399 |
| 2,315 | 2,176 | 2,035 | 1,891 | 1,744 | 1,594 | 1,439 | 1,280 |

Pokračování Tab. 17.

|       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    |
| 44    | 41    | 38    | 35    | 32    | 28    |
| 2,154 | 2,007 | 1,860 | 1,713 | 1,566 | 1,371 |
| 1,165 | 0,999 | 0,825 | 0,640 | 0,443 | 0,237 |

Průměrná rychlost páry ve svazku:

$$v_{p-S2-str} = \frac{\Sigma v_{p-S2-m}}{n_{m-S2}} = \frac{35,036}{20} = 1,668 \frac{m}{s}$$

### 7.2.3. Tlaková ztráta ve svazku S2

Výpočet tlakové ztráty podle literatury [10].

Ukázka výpočtu tlakové ztráty pro první mezikruží:

Poměry charakterizující rozložení trubek:

$$P_T = \frac{t}{d} = \frac{26}{18} = 1,44 \quad ; \quad P_L = \frac{v_t}{d} = \frac{22,52}{18} = 1,25$$

Reynoldsovo číslo:

$$Re_p = \frac{v_{p-S2-str} \cdot \rho_p \cdot l}{\eta_p} = \frac{1,668 \cdot 0,248 \cdot 6,121}{11,446 \cdot 10^{-6}} = 221271,455 \geq 10^5$$

Korekční faktor:  $\chi = 1,06$ Součinitel tření:  $f = 0,4$ 

Tlaková ztráta pro první mezikruží ve svazku S2:

$$\Delta p_{p-S2-lm} = n_{t-S2-m1} \cdot \chi \cdot \left( \frac{\rho_p \cdot v_{p-S2-str}^2}{\eta_p} \right) = 95 \cdot 0,4 \cdot \left( \frac{0,248 \cdot 1,668^2}{11,446 \cdot 10^{-6}} \right) = 13,903 Pa$$

Stejný postup byl proveden pro zbývající mezikruží a jím odpovídající počet trubek. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 18. Průběh tlaku ve svazku S2:

|                          |       |        |        |        |        |        |        |
|--------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| mekruží                  | [–]   | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| počet trubek v mezikruží | [–]   | 95     | 90     | 86     | 82     | 79     | 74     |
| $\Delta p$ pro mezikruží | [Pa]  | 13,903 | 13,171 | 12,586 | 12,0   | 11,561 | 10,830 |
| tlak v mezikružích       | [kPa] | 39,586 | 39,572 | 39,560 | 39,548 | 39,536 | 39,525 |

Pokračování Tab. 18.

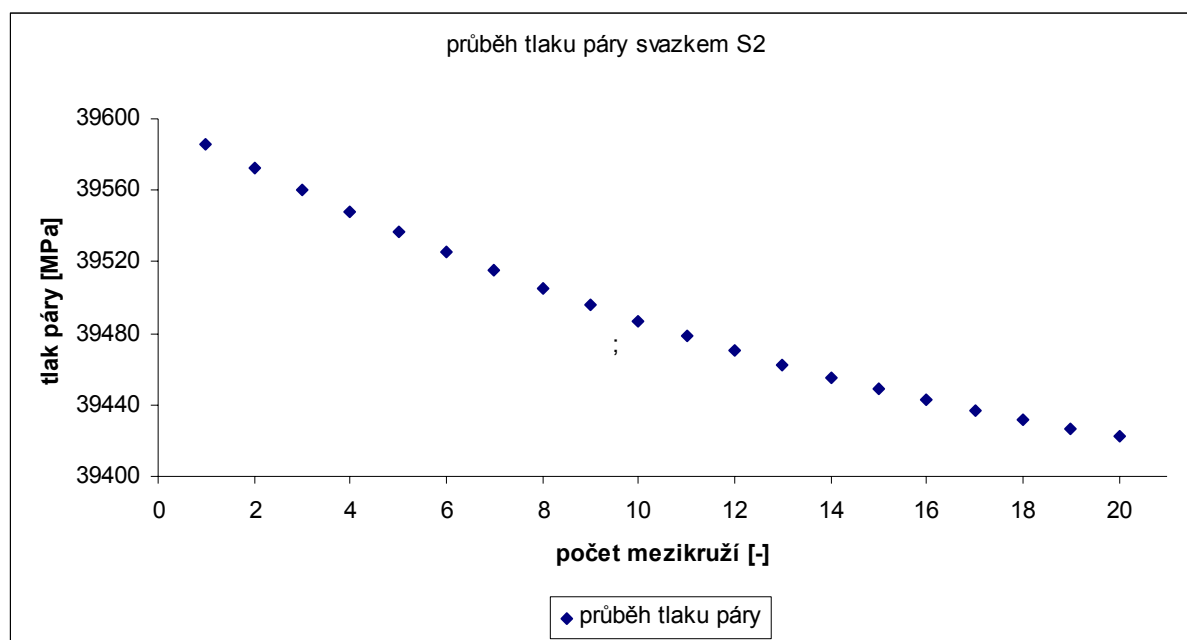
|        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 7      | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     | 13     | 14     |
| 71     | 68     | 65     | 62     | 59     | 56     | 53     | 50     |
| 10,390 | 9,951  | 9,512  | 9,073  | 8,634  | 8,195  | 7,756  | 7,317  |
| 39,515 | 39,505 | 39,496 | 39,487 | 39,478 | 39,470 | 39,462 | 39,455 |

Pokračování Tab. 18.

|        |        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 15     | 16     | 17     | 18     | 19     | 20     |
| 45     | 42     | 39     | 36     | 33     | 29     |
| 6,585  | 6,146  | 5,707  | 5,268  | 4,829  | 4,244  |
| 39,448 | 39,442 | 39,436 | 39,431 | 39,426 | 39,422 |

Celková tlaková ztráta ve svazku S2:

$$\Delta p_{p-c-S2} = p_{p-in} - p_{p-S2-20m} = 39600 - 39422,33 = 177,670 Pa$$



Graf. 4. Průběh tlaku páry přes svazek S2

## 8. Závěr

Zadání diplomové práce spočívalo v návrhu topného výměníku dle zadáných parametrů a základního popisu konstrukčního řešení. Cílem bylo seznámení se s celkovým procesem návrhu. Rozsahem byl tepelný návrh, určení hlavních rozměrů, určení tlakové ztráty, zvolit materiály pro hlavní části výměníku a provést pevnostní výpočet dle ČSN 69 0010. Pro zadaný materiál trubek byl proveden předběžný tepelný výpočet a na jeho základě navržena trubková síť a zjištěna předběžná velikost teplosměnné plochy. Součástí výměníku je i chladič parovzdušné směsi, který je součástí teplosměnné plochy, ale pro tepelný výpočet byl zanedbán. Na základě tohoto výpočtu byla stanovena skutečná délka výměníku a skutečná teplosměnná plocha pro zadaný součinitel zanesení.

Tab. 19. Parametry teplosměnné plochy

| počet trubek |         |          |        | délka trubky | velikost toplosměnné plochy |
|--------------|---------|----------|--------|--------------|-----------------------------|
| svazek 1     | chladič | svazek 2 | celkem | [m]          | [m <sup>2</sup> ]           |
| 1132         | 82      | 1214     | 2428   | 6,121        | 840,414                     |

Před hydraulickým výpočtem byly navrženy rozměry vstupních a výstupních hrdel na straně topné vody, hrdlo pro vstup páry a hrdlo pro odvod kondenzátu.

Tab. 20. Rozměry hrdel

| vstup vody | výstup vody | vstup páry  | výstup kondenzátu |
|------------|-------------|-------------|-------------------|
| DN600 PN25 | DN600 PN25  | 2xDN800 PN6 | DN150 PN6         |

Další z hlavních bodů zadání byl hydraulický výpočet. Byla určena celková tlaková ztráta topné vody a to pro nezanesený stav a pro stav s vrstvou nánosů. V obou případech se tlaková ztráta spočetla z tlakové ztráty třením a tlakové ztráty způsobené místními odpory.

Tab. 21. Tlaková ztráta topné vody

| nezanesený stav |            |            | zanesený stav |            |            |
|-----------------|------------|------------|---------------|------------|------------|
| místní          | tření      | celková    | místní        | tření      | celková    |
| [Pa]            | [Pa]       | [Pa]       | [Pa]          | [Pa]       | [Pa]       |
| 3 546,886       | 34 339,067 | 37 885,953 | 3 714,796     | 40 782,167 | 44 496,963 |

Před samotným pevnostním výpočtem byly navrženy rozměry hlavních částí výměníku a pro tyto části zvolen vhodný materiál. Samotný výpočet pak kontroloval volené tloušťky stěn pro maximální dovolené tlaky v prostoru pláště a prostoru trubkového svazku.

Tab. 22. Hlavní části výměníku

| hlavní části        | trubkovnice | plášť (voda) | klenuté dno (voda) | plášť 1700 (pára) | plášť 2100 (pára) | plášť-kužel (pára) |
|---------------------|-------------|--------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| materiál            | P355GH      | P265GH       | P265GH             | P265GH            | P265GH            | P265GH             |
| Tloušťka stěny v mm | 100         | 18           | 18                 | 10                | 10                | 10                 |

Posledním úkolem zadání bylo zjištění průběhu tlaku páry přes trubkový svazek pro zvolený typ sítě. Jelikož množství zkondenzované páry v části S1 je rozdílná než v části S2, proběhl výpočet pro každou část svazku zvlášť. Z výsledků je patrné, že v části S1 je vyšší tlaková ztráta než v části S2.

Tab. 23. Tlaková ztráta páry

| celková tlaková ztráta |          |
|------------------------|----------|
| svazek 1               | svazek 2 |
| $[Pa]$                 | $[Pa]$   |
| 1250,306               | 177,670  |

Práce splňuje všechny body zadání.

## Literatura:

- [1] ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.2 Všeobecná část pro nádoby z oceli
- [2] ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.13 Trubkové výměníky tepla
- [3] ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.18 Přírubové spoje
- [4] ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.5 Válcové části nádob
- [5] ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.6 Kuželové části nádob
- [6] ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní – Technická pravidla – Výpočet pevnosti – Část 4.7 Klenutá dna nádob
- [7] Stehlík P., Kohoutek J., Němčanský J.: Tepelné pochody, Výpočet výměníku tepla, VUT Brno 1991
- [8] Mareš R., Šifer O., Kadrnožka J.: Tabulky vlastností vody a páry podle průmyslové formulace IAPWS – IF97, VUTIUM 1999
- [9] Kadrnožka J., Ochrana L.: Teplárenství, CERM, s.r.o. Brno, 2001
- [10] Jícha M.: Přenos tepla a látky, CERM, s.r.o. Brno, 2001
- [11] Pavelek M. a kolektiv: Termomechanika, CERM, s.r.o. Brno, 2003
- [12] Šob F.: Hydromechanika, CERM, s.r.o. Brno, 2002
- [13] Ibler Z. a kolektiv: Technický průvodce energetika, BEN Praha, 2002
- [14] Ibler Z. a kolektiv: Energetika v příkladech, BEN Praha, 2003



## Seznam použitých symbolů

### Tepelný výpočet

|                    |                          |                                                                                                           |
|--------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $p_v$              | [MPa]                    | provozní tlak topné vody                                                                                  |
| $p_{p-in}$         | [MPa]                    | vstupní tlak páry                                                                                         |
| $t_{p-in}$         | [°C]                     | teplota páry na vstupu                                                                                    |
| $t_{p-out}$        | [°C]                     | teplota vystupujícího kondenzátu                                                                          |
| $p_{v-in}$         | [MPa]                    | vstupní tlak topné vody                                                                                   |
| $p_{v-out}$        | [MPa]                    | výstupní tlak topné vody                                                                                  |
| $\dot{m}_{v-jmen}$ | [kg / s]                 | jmenovitý hmotnostní průtok topné vody                                                                    |
| $t_{v-in}$         | [°C]                     | vstupní teplota topné vody                                                                                |
| $t_{v-out}$        | [°C]                     | výstupní teplota topné vody                                                                               |
| $\rho_{v-in}$      | [kg / m <sup>3</sup> ]   | vstupní hustota topné vody                                                                                |
| $\rho_{v-out}$     | [kg / m <sup>3</sup> ]   | výstupní hustota topné vody                                                                               |
| $\rho_{v-stř}$     | [kg / m <sup>3</sup> ]   | hustota topné vody pro střední teplotu                                                                    |
| $S_v$              | [m <sup>2</sup> ]        | průtočný průřez vody v jedné cestě                                                                        |
| $\dot{m}_{v-max}$  | [kg / s]                 | maximální hmotnostní průtok topné vody                                                                    |
| $v_v$              | [m / s]                  | rychlost proudění topné vody                                                                              |
| $d_{t-in}$         | [m]                      | vnitřní průměr trubky                                                                                     |
| $d$                | [m]                      | vnější průměr trubky                                                                                      |
| $t$                | [m]                      | tloušťka stěny trubky                                                                                     |
| $n_t$              | [-]                      | počet trubek v jedné cestě                                                                                |
| $i_p''$            | [kJ / kg]                | entalpie páry                                                                                             |
| $i_p'$             | [kJ / kg]                | entalpie kondenzátu                                                                                       |
| $t_{předběžn}$     | [°C]                     | předběžně zvolená teplota na vnější stěně trubky                                                          |
| $g$                | [m / s <sup>2</sup> ]    | gravitační zrychlení                                                                                      |
| $\eta'$            | [kg / m · s]             | dynamická viskozita kondenzátu                                                                            |
| $\lambda'$         | [W / m · K]              | tepelná vodivost kondenzátu                                                                               |
| $l$                | [kJ / kg]                | latentní teplo                                                                                            |
| $\rho_p''$         | [kg / m <sup>3</sup> ]   | hustota páry                                                                                              |
| $\rho_p'$          | [kg / m <sup>3</sup> ]   | hustota kondenzátu                                                                                        |
| $\alpha_p$         | [W / m <sup>2</sup> · K] | součinitel přestupu tepla na straně páry                                                                  |
| $N_{tr-prům}$      | [-]                      | průměrný počet trubek řazených pod sebou                                                                  |
| $N_{tr}$           | [-]                      | počet trubek reprezentující celý trubkový svazek                                                          |
| $\alpha_{p-prům}$  | [W / m <sup>2</sup> · K] | průměrná hodnota součinitele přestupu tepla na straně páry pro trubku reprezentující celý trubkový svazek |
| $t_{v-stř}$        | [°C]                     | střední teplota topné vody                                                                                |

|                       |                     |                                                              |
|-----------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------|
| $\eta_v$              | $[kg / m \cdot s]$  | dynamická viskozita topné vody                               |
| $\nu_v$               | $[m^2 / s]$         | kinematická viskozita topné vody                             |
| $c_{p-v}$             | $[J / kg \cdot K]$  | měrná tepelná kapacita topné vody                            |
| $\lambda_v$           | $[W / m \cdot K]$   | součinitel tepelné vodivosti topné vody                      |
| $a_v$                 | $[m^2 / s]$         | součinitel teplotní vodivosti topné vody                     |
| Re                    | $[-]$               | Reynoldsovo číslo                                            |
| Pr                    | $[-]$               | Prandtovo číslo                                              |
| Nu                    | $[-]$               | Nusseltovo číslo                                             |
| $C, m, n$             | $[-]$               | konstanty pro výpočet Nusseltova čísla                       |
| $\alpha_v$            | $[W / m^2 \cdot K]$ | součinitel přestupu tepla na straně topné vody               |
| $R_p$                 | $[m^2 \cdot K / W]$ | tepelný odpor proti konvekci na straně páry                  |
| $R_t$                 | $[m^2 \cdot K / W]$ | tepelný odpor proti vedení tepla stěnou trubky               |
| $\lambda$             | $[W / m \cdot K]$   | součinitel tepelné vodivosti pro materiál trubek             |
| $R_v$                 | $[m^2 \cdot K / W]$ | tepelný odpor proti konvekci na straně topné vody            |
| $k$                   | $[W / m^2 \cdot K]$ | součinitel prostupu tepla válcovou stěnou trubky             |
| $k_{nános}$           | $[W / m^2 \cdot K]$ | souč. prostupu tepla válcovou stěnou trubky s vrstvou nánosů |
| $S_{nános}$           | $[-]$               | součinitel zanesení                                          |
| $t_1$                 | $[^{\circ}C]$       | teplota na vnější stěně trubky                               |
| $\Delta t_{\log}$     | $[^{\circ}C]$       | střední logaritmický teplotní spád                           |
| $\Delta t_{spád-in}$  | $[^{\circ}C]$       | teplotní spád na vstupu                                      |
| $\Delta t_{spád-out}$ | $[^{\circ}C]$       | teplotní spád na výstupu                                     |
| $\dot{Q}$             | $[W]$               | přenášený tepelný výkon                                      |
| $S$                   | $[m^2]$             | teplosměnná plocha                                           |
| $n_{tr-ch}$           | $[-]$               | počet trubek v chladiči                                      |
| $n_{tr-S1}$           | $[-]$               | počet trubek ve svazku S1                                    |
| $n_{tr-S2}$           | $[-]$               | počet trubek ve svazku S2                                    |
| $S_{tr}$              | $[m^2]$             | průtočný průřez jedné trubky                                 |
| $S_{tr-S1}$           | $[m^2]$             | průtočný průřez všech trubek ve svazku S1                    |
| $\dot{m}_{v-S1-max}$  | $[kg / s]$          | maximální hmotnostní průtok topné vody ve svazku S1          |
| $\dot{m}_{v-ch-max}$  | $[kg / s]$          | maximální hmotnostní průtok topné vody v chladiči            |
| $\dot{m}_{v-S1-\%}$   | $[kg / s]$          | hmotnostní průtok topné vody ve svazku S1 v procentech       |
| $\dot{m}_{v-ch-\%}$   | $[kg / s]$          | hmotnostní průtok topné vody v chladiči v procentech         |
| $c_{p-v-ch}$          | $[J / kg \cdot K]$  | měrná tepelná kapacita topné vody v chladiči                 |
| $\Delta S$            | $[m^2]$             | element teplosměnné plochy                                   |
| $S_{skut}$            | $[m^2]$             | skutečná velikost teplosměnné plochy                         |
| $L_{skut}$            | $[m]$               | skutečná délka teplosměnné plochy                            |

$\Delta L$   $[m]$  element délky teplosměnné plochy

## Hydraulický výpočet

|                    |                    |                                                                 |
|--------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------|
| $\dot{m}_{v-\max}$ | $[kg / s]$         | maximální hmotnostní průtok topné vody                          |
| $v_v$              | $[m / s]$          | rychlost proudění topné vody                                    |
| $p_v$              | $[MPa]$            | tlak topné vody                                                 |
| $t_{v-in}$         | $[^{\circ}C]$      | vstupní teplota topné vody                                      |
| $\rho_{v-in}$      | $[kg / m^3]$       | hustota topné vody na vstupu                                    |
| $S_{v-in}$         | $[m^2]$            | průtočný průřez topné vody vstupním hrdlem                      |
| $D_{v-in}$         | $[m]$              | vnitřní průměr vstupního hrdla topné vody                       |
| $t_{v-out}$        | $[^{\circ}C]$      | výstupní teplota topné vody                                     |
| $\rho_{v-out}$     | $[kg / m^3]$       | hustota topné vody na výstupu                                   |
| $S_{v-out}$        | $[m^2]$            | průtočný průřez topné vody výstupním hrdlem                     |
| $D_{v-out}$        | $[m]$              | vnitřní průměr výstupního hrdla topné vody                      |
| $\dot{m}_p$        | $[kg / s]$         | hmotnostní průtok páry                                          |
| $S_p$              | $[m^2]$            | průtočný průřez páry vstupním hrdlem                            |
| $D_p$              | $[m]$              | vnitřní průměr parního hrdla                                    |
| $S_k$              | $[m^2]$            | průtočný průřez kondenzátu výstupním hrdlem                     |
| $D_k$              | $[m]$              | vnitřní průměr hrdla kondenzátu                                 |
| $\rho_p''$         | $[kg / m^3]$       | hustota páry                                                    |
| $\rho_p'$          | $[kg / m^3]$       | hustota kondenzátu                                              |
| $v_k$              | $[m / s]$          | rychlost proudění kondenzátu                                    |
| $t_{in-t}$         | $[^{\circ}C]$      | teplota na vnitřní stěně trubky                                 |
| $\eta_{m-v}$       | $[kg / m \cdot s]$ | dyn. viskozita topné vody v mezní vrstvě u vnitřní stěny trubky |
| $\eta_v$           | $[kg / m \cdot s]$ | dynamická viskozita topné vody ve středu proudu                 |
| $a$                | $[-]$              | konstanta pro výpočet korekčního faktoru                        |
| $z_1$              | $[-]$              | korekční faktor                                                 |
| $z_2$              | $[-]$              | korekční faktor                                                 |
| $k_t$              | $[m]$              | střední absolutní drsnost stěny trubky                          |
| $k_{rel}$          | $[m]$              | relativní drsnost stěny trubky                                  |
| $x_9$              | $[-]$              | substituční faktor                                              |
| $x_{10}$           | $[-]$              | substituční faktor                                              |
| $\lambda_{11}$     | $[-]$              | součinitel třecích ztrát                                        |
| $n_{ch}$           | $[-]$              | počet chodů výměníku                                            |
| $\Delta p_t$       | $[MPa]$            | tlaková ztráta třením v potrubí                                 |
| $\xi_{11}$         | $[-]$              | součinitel ztrát pro vstup a výstup ze svazku                   |
| $\xi_{12}$         | $[-]$              | součinitel ztrát při ohybu proudu                               |

|                 |                          |                                                                |
|-----------------|--------------------------|----------------------------------------------------------------|
| $\Delta p_m$    | [MPa]                    | tlaková ztráta místními odpory                                 |
| $\Delta p_c$    | [MPa]                    | celková tlaková ztráta                                         |
| $\sigma_n$      | [m]                      | výška vrstvy nánosu                                            |
| $k_{tn}$        | [m]                      | střední absolutní drsnost vrstvy nánosu                        |
| $v_{vn}$        | [m / s]                  | rychlost proudění topné vody při zanesení                      |
| $Re_n$          | [–]                      | Reynoldsovo číslo – zanesený stav                              |
| $Pr$            | [–]                      | Prandtovo číslo                                                |
| $Nu_n$          | [–]                      | Nusseltovo číslo – zanesený stav                               |
| $\alpha_{vn}$   | [W / m <sup>2</sup> · K] | součinitel přestupu tepla na straně topné vody – zanesený stav |
| $t_{in-tn}$     | [°C]                     | teplota na vnitřní stěně trubky – zanesený stav                |
| $\eta_{v-mv}$   | [kg / m · s]             | dyn. viskozita topné vody v mezní vrstvě – zanesený stav       |
| $z_{1n}$        | [–]                      | korekční faktor – zanesený stav                                |
| $z_{2n}$        | [–]                      | korekční faktor – zanesený stav                                |
| $k_{rel-n}$     | [m]                      | relativní drsnost stěny trubky – zanesený stav                 |
| $x_{9n}$        | [–]                      | substituční faktor – zanesený stav                             |
| $x_{10n}$       | [–]                      | substituční faktor – zanesený stav                             |
| $\lambda_{11n}$ | [–]                      | součinitel třecích ztrát – zanesený stav                       |
| $\Delta p_{tn}$ | [MPa]                    | tlaková ztráta třením v potrubí – zanesený stav                |
| $\Delta p_{mn}$ | [MPa]                    | tlaková ztráta místními odpory – zanesený stav                 |
| $\Delta p_{cn}$ | [MPa]                    | celková tlaková ztráta – zanesený stav                         |

## Pevnostní výpočet

Označení použitých symbolů podle literatury [1], [2], [3], [4], [5] a [6].

## Průběh tlaku páry přes trubkový svazek

|                    |                        |                                                               |
|--------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------|
| $p_{p-in}$         | [MPa]                  | vstupní tlak páry                                             |
| $t_{p-in}$         | [°C]                   | teplota páry na vstupu                                        |
| $i_p$              | [kJ / kg]              | entalpie páry                                                 |
| $i_k'$             | [kJ / kg]              | entalpie kondenzátu                                           |
| $\rho_p$           | [kg / m <sup>3</sup> ] | hustota páry                                                  |
| $\rho_k'$          | [kg / m <sup>3</sup> ] | hustota kondenzátu                                            |
| $\eta_p$           | [kg / m · s]           | dynamická viskozita páry                                      |
| $t_{v-in}$         | [°C]                   | vstupní teplota topné vody                                    |
| $t_{v-out-S1}$     | [°C]                   | teplota topné vody na výstupu ze svazku S1 bez vlivu chladiče |
| $c_{p-v}$          | [J / kg · K]           | měrná tepelná kapacita topné vody                             |
| $\dot{m}_{v-jmen}$ | [kg / s]               | jmenovitý hmotnostní průtok topné vody                        |
| $n_{t-S1}$         | [–]                    | počet trubek ve svazku S1                                     |

|                      |               |                                                          |
|----------------------|---------------|----------------------------------------------------------|
| $n_{m-S1}$           | $[-]$         | počet mezikruží ve svazku S1                             |
| $n_{t-S1-m1}$        | $[-]$         | počet trubek ve svazku S1 pro první mezikruží            |
| $\dot{m}_{p-S1}$     | $[kg / s]$    | hmotnostní průtok páry svazkem S1                        |
| $\dot{m}_{p-S1-1t}$  | $[kg / s]$    | množství páry zkondenzované na jedné trubce ve svazku S1 |
| $\dot{m}_{p-S1-m1}$  | $[kg / s]$    | hmotnostní průtok páry po průchodu prvním mezikružím S1  |
| $v_t$                | $[m]$         | výška rovnostranného trojúhelníku mezi trubkami          |
| $m_t$                | $[m]$         | mezera mezi trubkami                                     |
| $S_m$                | $[m^2]$       | plocha mezery mezi trubkami                              |
| $n_{mez-S1-1m}$      | $[-]$         | počet mezer mezi trubkami v prvním mezikruží svazku S1   |
| $S_{1m}$             | $[m^2]$       | plocha mezery mezi trubkami pro první mezikruží          |
| $v_{p-S1-1m}$        | $[m / s]$     | rychlost proudění páry v prvním mezikruží svazku S1      |
| $v_{p-S1-stř}$       | $[m / s]$     | průměrná rychlost páry ve svazku S1                      |
| $P_T, P_L$           | $[-]$         | poměry charakterizující rozložení trubek                 |
| $Re_p$               | $[-]$         | Reynoldsovo číslo pro páru                               |
| $\chi$               | $[-]$         | korekční faktor                                          |
| $f$                  | $[-]$         | součinitel tření                                         |
| $\Delta p_{p-S1-1m}$ | $[MPa]$       | tlaková ztráta páry pro první mezikruží svazku S1        |
| $\Delta p_{p-c-S1}$  | $[MPa]$       | celková tlaková ztráta páry ve svazku S1                 |
| $t_{v-S2-in}$        | $[^{\circ}C]$ | teplota na vstupu do svazku S2                           |
| $t_{v-out}$          | $[^{\circ}C]$ | teplota na výstupu ze svazku S2                          |
| $n_{t-S2}$           | $[-]$         | počet trubek ve svazku S2                                |
| $n_{t-S2-m1}$        | $[-]$         | počet trubek ve svazku S2 pro první mezikruží            |
| $\dot{m}_{p-S2}$     | $[kg / s]$    | hmotnostní průtok páry svazkem S2                        |
| $\dot{m}_{p-S2-1t}$  | $[kg / s]$    | množství páry zkondenzované na jedné trubce ve svazku S2 |
| $\dot{m}_{p-S2-m1}$  | $[kg / s]$    | hmotnostní průtok páry po průchodu prvním mezikružím S2  |
| $n_{mez-S2-1m}$      | $[-]$         | počet mezer mezi trubkami v prvním mezikruží svazku S2   |
| $v_{p-S2-1m}$        | $[m / s]$     | rychlost proudění páry v prvním mezikruží svazku S2      |
| $v_{p-S2-stř}$       | $[m / s]$     | průměrná rychlost páry ve svazku S2                      |
| $\Delta p_{p-S2-1m}$ | $[MPa]$       | tlaková ztráta páry pro první mezikruží svazku S2        |
| $\Delta p_{p-c-S2}$  | $[MPa]$       | celková tlaková ztráta páry ve svazku S2                 |

## Seznam příloh:

[výkres] Tepelný výměník