

Návrhový výpočet kryogenního výměníku tepla

Bc. Petr Vlček

Vedoucí práce: Ing. Jan Skočilas, Ph.D.

Abstrakt

Tato práce řeší výpočet a zjednodušený konstrukční návrh kryogenního výměníku tepla pro odvod tepla z chladicího okruhu laserové hlavy. Ve výměníku se chladí hélium dusíkem. Oba plyny jsou v plynném skupenství. Teploty ve výměníku se pohybují v rozmezí 78 - 160 K. Vzhledem k požadavku na malé ovlivnění proudu hélia a jeho malou tlakovou ztrátu je výměník navržen jako trubkový výměník se segmentovými přepážkami.

Klíčová slova

Výměník tepla, kryogenika, konstrukce, přestup tepla, tlaková ztráta, trubkový výměník, segmentové přepážky, výpočet

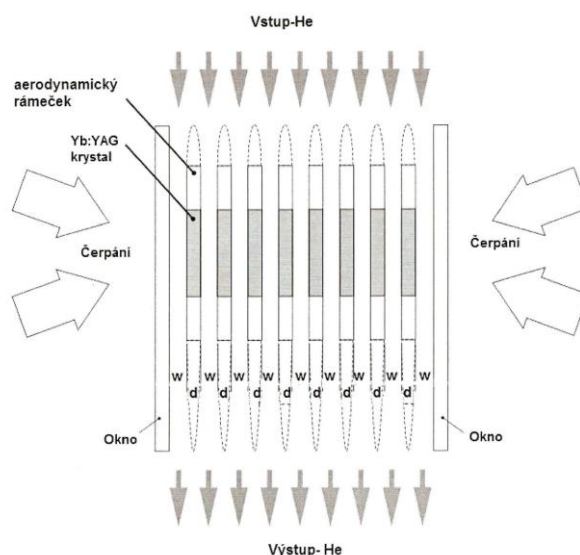
1 Úvod

Úkolem této práce je provést tepelně-hydraulický výpočet a zjednodušený konstrukční návrh kryogenního výměníku tepla pro odvod tepla z chladicího okruhu laserové hlavy.

1.1 Určení výměníku tepla

V Dolních Břežanech má vzniknout výzkumné centrum ELI Beamlines - první z výzkumných center ELI (Extreme Light Infrastructure). Hlavním cílem tohoto projektu je postavit nejmodernější laserové zařízení na světě. V něm budou realizovány výzkumné a aplikační projekty týkající se interakce látky se světelným pulsem o intenzitě mnohokrát větší, než jsou současné maximálně dosažitelné hodnoty. [6]

Hlavy zesilovačů těchto velmi výkonných laserů je nutné chladit. Schéma takové hlavy je na obr. 1.

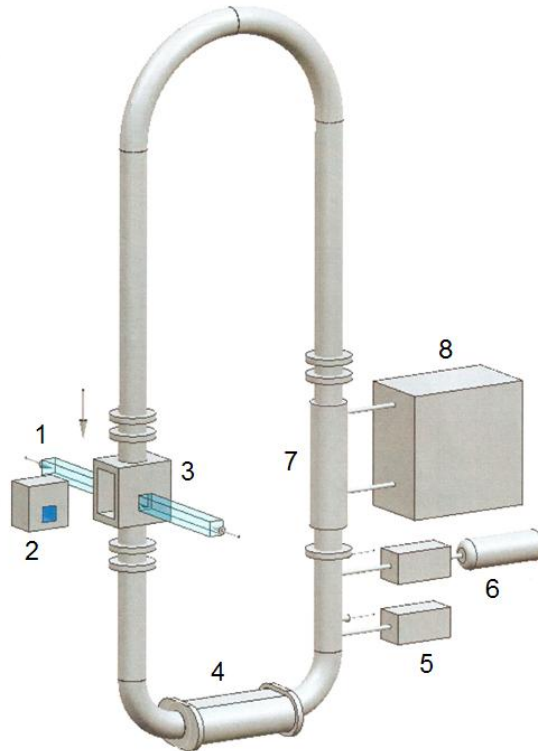


Obr. 1. Schéma hlavy zesilovače laseru [4]

Laserový paprsek prochází přes krystaly, které jsou uloženy v aerodynamických rámečcích, kolem kterých proudí chladičské médium. Aby nebyl ovlivněn paprsek, je jako

chladicí médium použito hélium při nízkých teplotách. Hélium se bude chladit dusíkem ve výměníku, jehož návrh je cílem této práce.

Schéma chladicího okruhu je na obr. 2. Laserový paprsek (1) prochází kazetou s deskovými krystaly (2), která je umístěna ve skříni (3). Hélium je poháněno cirkulačním dmychadlem (4). Vývěva (5) vytváří vakuum v dvouplášťovém kanálu. Hélium je doplňováno ze zásobníku (6) a je chlazeno dusíkem ve výměníku (7) s tepelným agregátem (8).



Obr. 2. Schéma chladicího okruhu hlavy zesilovače [4]

1.2 Zadané parametry výměníku

Výměník má být navrhnut pro tyto parametry a omezení:

Chlazený výkon	25 kW
Hélium	
– Teplota na vstupu	162 K
– Teplota na výstupu	110 K
– Tlak na vstupu	1,2 MPa
– Maximální tlaková ztráta (minimalizovat)	0,02 MPa
– Charakter proudění hélia nesmí být významně ovlivněn	
Dusík	
– Plynné skupenství	
– Parametry možno volit	
Maximální délka výměníku	1 400 mm
Průměr vstupního potrubí	120 mm

2 Volba typu výměníku

Podle ploch zúčastňujících se přenosu tepla výměníky dělíme na:

- Směšovací - přenos tepla přímým stykem pracovních látek
- Regenerační - přenos tepla střídavě přes akumulaci hmoty
- Rekuperační - přenos tepla přes pevnou stěnu oddělující oba proudy

Z důvodu zamezení úniku a kontaminace hélia dusíkem bude zvolen některý z rekuperačních výměníků.

Základní typy rekuperačních výměníků jsou:

- Dvoutrubkový (Trubka v trubce)
- Trubkový (Shell & Tube)
- Deskový
- Spirálový

Deskový či spirálový výměník nevyhovuje požadavku malého ovlivnění proudu hélia. Dvoutrubkový výměník potřebuje větší délku. Proto je zvolen trubkový výměník s jedním chodem trubek, v kterých bude proudit hélium.

Na straně dusíku není velikost tlakové ztráty tolik důležitá, jako velikost součinitele přestupu tepla. Proto jsou zvoleny segmentové přepážky.

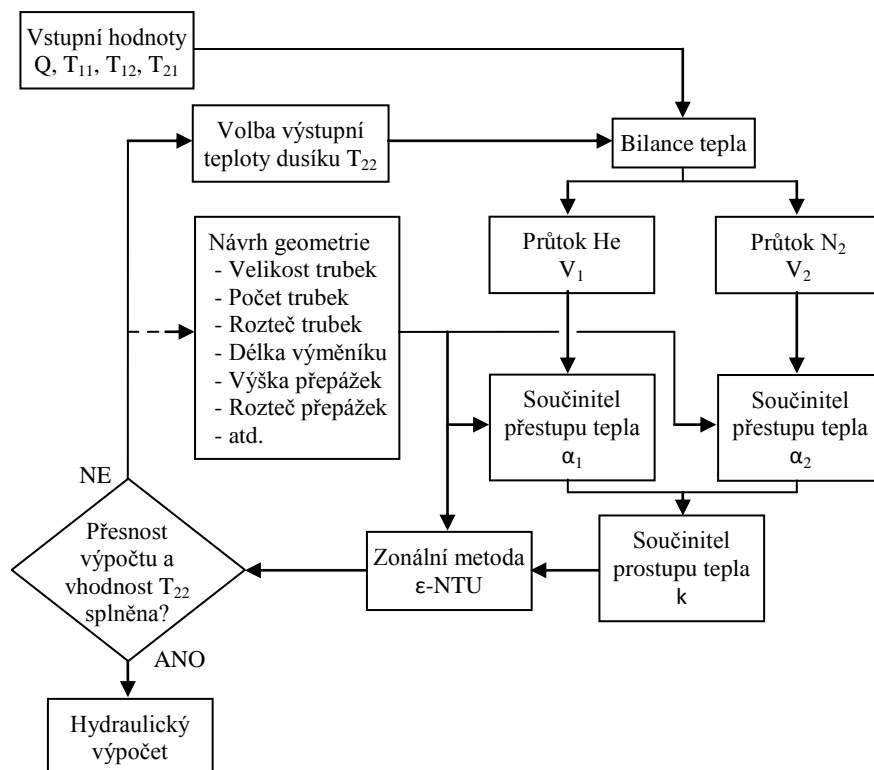
Pro lepší využití teplotního rozdílu je zvoleno protiproudé uspořádání.

3 Tepelný výpočet výměníku tepla

3.1 Postup výpočtu

Nejprve je nutné zvolit vstupní parametry dusíku. Vstupní tlak dusíku je zvolen 0,2 MPa. Tomuto tlaku odpovídá teplota varu 83,6 K, proto jako vstupní teplota dusíku do výměníku byla zvolena teplota 84 K.

Postup návrhu výměníku je znázorněn na obr. 3.



Obr. 3. Znázornění postupu iteračního tepelného výpočtu

3.2 Vlastnosti plynů

Výpočet bude proveden pro vlastnosti plynů při střední teplotě a středním tlaku. Tyto vlastnosti, tedy měrná tepelná kapacita c_p , hustota ρ , dynamická viskozita μ a součinitel tepelné vodivosti λ , jsou vyhledány z databáze NIST (National Institute of Standards and Technology) [5]. Z těchto hodnot se získá Pradtlovo číslo:

$$Pr_i = \frac{\nu_i}{a_i} = \frac{\mu_i \cdot c_{pi}}{\lambda_i} \quad (1)$$

3.3 Bilance tepla

Ze zadaných hodnot se dopočte tepelná kapacita proudů, hmotnostní a objemový průtok obou plynů dle následujících rovnic:

$$W_i = \frac{\dot{Q}}{\Delta T_i} \quad (2)$$

$$\dot{m}_i = \frac{\dot{Q}}{c_{pi} \cdot \Delta T_i} \quad (3)$$

$$\dot{V}_i = \frac{\dot{Q}}{c_{pi} \cdot \Delta T_i \cdot \rho_i} \quad (4)$$

3.4 Součinitel přestupu tepla v trubkách – na straně hélia

Součinitel přestupu tepla v trubce lze vyjádřit ze vztahu:

$$Nu_1 = \frac{\alpha_1 \cdot d_1}{\lambda_1} \quad (5)$$

Podle [1] při přechodovém a turbulentním proudění v trubce kruhového průřezu ($Re > 2320$) nejlépe vyhovuje Gnielinského vztah pro Nusseltovo číslo ve tvaru:

$$Nu_1 = \frac{x_5 \cdot (Re_1 - 1000) \cdot Pr_1}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{x_5} \cdot \left(Pr_1^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \cdot \left(1 + y_1^{\frac{2}{3}}\right) \cdot y_{21} \quad (6)$$

s platností:

a) $Re \in \langle 2320; 10^6 \rangle$

b) $Pr \in \langle 0,6; 2000 \rangle$

kde:

$$x_5 = \frac{1}{8} \cdot (1,82 \cdot \log Re_1 - 1,64)^{-2} \quad (7)$$

Reynoldsovo číslo je:

$$Re_1 = \frac{u_1 \cdot d_1 \cdot \rho_1}{\mu_1} \quad (8)$$

kde střední rychlost proudění se vypočte ze vztahu:

$$u_1 = \frac{\dot{V}_1}{S_1} \quad (9)$$

a průtočný průřez v trubkách trubkového svazku s jedním chodem je:

$$S_1 = n_t \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \quad (10)$$

Součinitel y_1 zohledňuje vliv nátoky pracovní látky do trubky:

$$y_1 = \frac{d_1}{l_t} \quad (11)$$

Korekční faktor y_{21} zohledňuje změnu látkových vlastností v mezní vrstvě. Pro plyny je dán vztahem:

$$y_{21} = \left(\frac{\bar{T}_1}{\bar{T}_{1S}} \right)^{a_1} \quad (12)$$

Kde $a_1 = 0,45$ pro směr tepelného toku do TP
 $a_1 = 0$ pro směr tepelného toku z TP

3.5 Součinitel přestupu tepla v mezitrubkovém prostoru – na straně dusíku

Součinitel přestupu tepla lze vyjádřit ze vztahu:

$$Nu_2 = \frac{\alpha_2 \cdot l}{\lambda_2} \quad (13)$$

kde charakteristický rozměr je délka proudnice:

$$l = \frac{\pi \cdot d_2}{2} \quad (14)$$

Podle [1] lze pro případ proudění v mezitrubkovém prostoru se segmentovými přepážkami Nusseltovo číslo vyjádřit ve tvaru:

$$Nu_2 = \left[0,3 + \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2} \right] \cdot y_{22} \cdot y_3 \cdot y_4 \cdot y_5 \cdot y_6 \cdot y_7 \cdot y_8 \quad (15)$$

s platností:

- a) $Re \in \langle 10; 10^6 \rangle$
- b) $Pr \in \langle 0,6; 10^3 \rangle$
- c) $n_{rc} > 10$

kde:

$$Nu_{lam} = 0,664 \cdot \sqrt{Re_2} \cdot \sqrt[3]{Pr_2} \quad (16)$$

$$Nu_{turb} = \frac{0,037 \cdot Re_2^{0,8} \cdot Pr_2}{1 + 2,443 \cdot Re_2^{-0,1} \cdot \left(Pr_2^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \quad (17)$$

Reynoldsovo číslo je dáno vztahem

$$Re_2 = \frac{u_2 \cdot l \cdot \rho_2}{\mu_2} \quad (18)$$

Rychlost u_2 v trubkovém svazku se vypočte ze vztahu

$$u_2 = \frac{\dot{m}_2}{S_{2N} \cdot \rho_2 \cdot \psi} \quad (19)$$

kde volný nezaplňný průřez mezi jednou roztečí v ose výměníku je:

$$S_{2N} = (t_p - s_p) \cdot D_1 \quad (20)$$

Mezerovitost trubkového svazku ψ se určí ze vztahů:

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{4 \cdot x_6} \quad \text{Pro } x_7 \geq 1 \quad (21)$$

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{4 \cdot x_6 \cdot x_7} \quad \text{Pro } x_7 < 1 \quad (22)$$

$$x_6 = \frac{t_{t1}}{d_2} \quad (23)$$

$$x_7 = \frac{t_{t2}}{d_2} \quad (24)$$

Kde t_{t1} je příčná a t_{t2} je podélná rozteč trubky s ohledem na smysl proudění pracovní látky v MP. Je zvoleno uspořádání trubek do trojúhelníku se základnou kolmou na směr proudění, tedy:

$$t_{t1} = c_1 \cdot t_t = 1 \cdot t_t \quad (25)$$

$$t_{t2} = c_2 \cdot t_t = \cos 30^\circ \cdot t_t \quad (26)$$

Vzhledem k omezenému rozsahu práce nebude uveden výpočet korekčních faktorů. Ty jsou k nalezení v [1].

y_{22} zohledňuje změny látkových vlastností v mezní vrstvě včetně vlivu směru tepelného toku.

y_3 zohledňuje převod součinitele přestupu tepla z řady na svazek trubek.

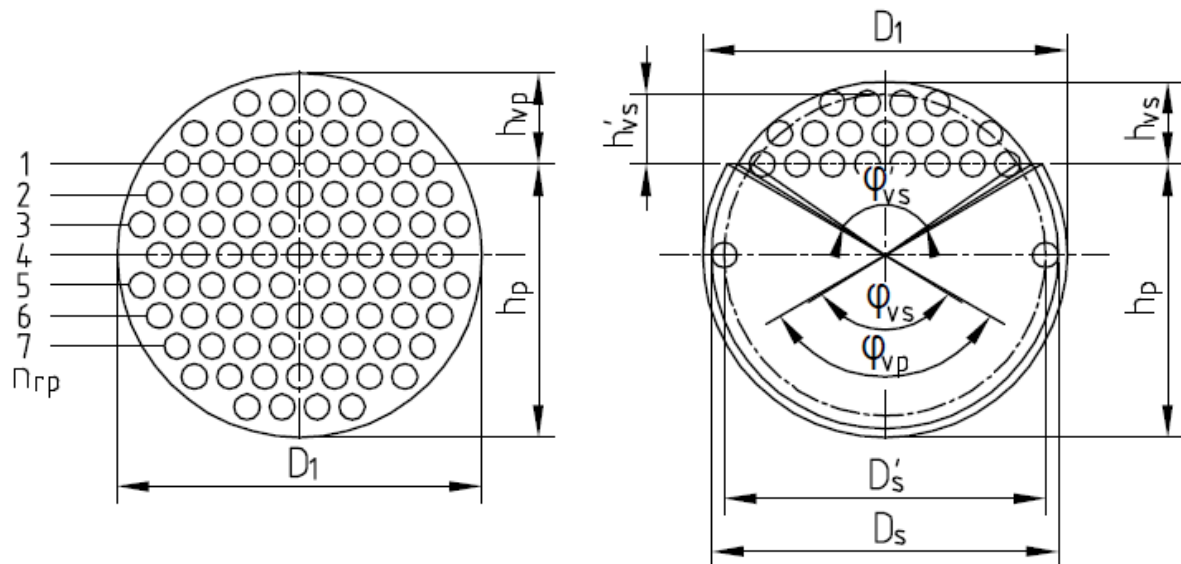
y_4 zohledňuje nepříznivý tvar tepelného profilu v proudě pracovní látky při laminárním proudění.

y_5 zohledňuje podíl podélně obtékaných trubek na příčném proudění ve výřezu přepážek.

y_6 zohledňuje vliv zkratových proudů mezi přepážkou a pláštěm a mezi trubkami svazku a otvory v přepážkách.

y_7 zohledňuje vliv obtokových proudů mezi trubkovým svazkem a pláštěm výměníku.

y_8 zohledňuje vliv neopřepážkovaných prostorů pod vstupními hrdly MP.



Obr. 4. Počet příčně obtékaných řad; charakteristika svazku trubek a přepážky [1]

3.6 Součinitel prostupu tepla

Z výše vypočtených součinitelů přestupu tepla uvnitř a vně trubek a součinitele tepelné vodivosti trubek se určí součinitel prostupu tepla. Vzhledem k tomu, že obě média jsou čisté plyny, nevzniká na teplosměnných plochách fouling. Součinitel prostupu tepla vyjádřený pro vnitřní plochu trubek tedy je:

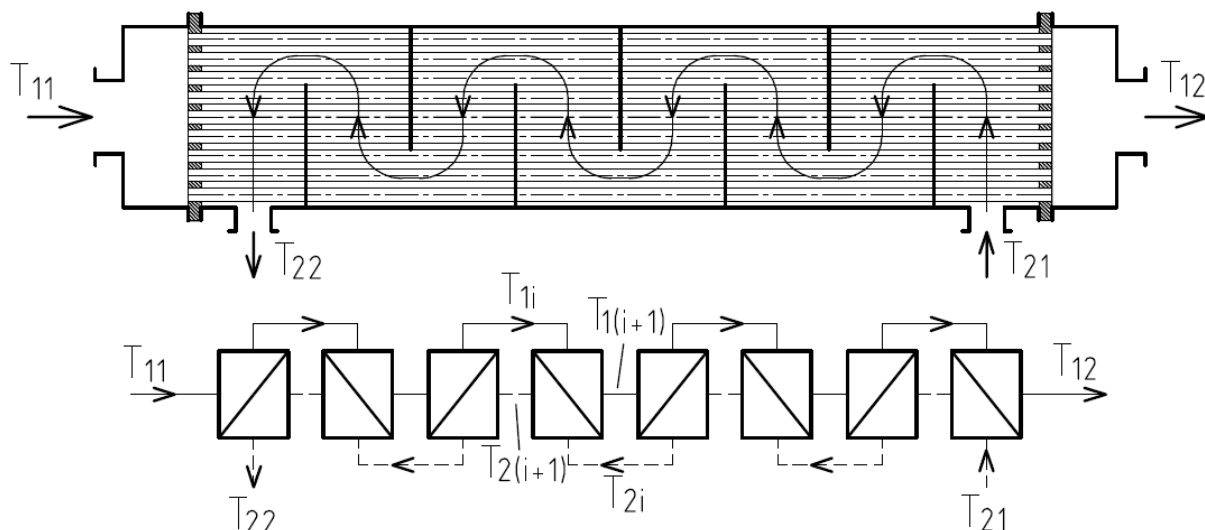
$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_1}{2 \cdot \lambda_t} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_1}{d_2 \cdot \alpha_2}} \quad (27)$$

3.7 Zonální metoda $\epsilon - NTU$

Jak je uvedeno v [2], u složitějších výměníků nejsou k dispozici vztahy $\epsilon = f(NTU, W)$ pro metodu $\epsilon - NTU$, proto je nutné výměník rozdělit na několik menších výměníků – zón. Zóny je třeba vytvořit takové, aby přibližně odpovídaly případům, pro které jsou vztahy již k dispozici a respektovaly způsob toku médií ve výměníku. Tyto zóny mají navíc menší

teplosměnnou plochu a tomu odpovídají i menší NTU_i . Pro malé NTU je vliv vzájemné orientace proudů a poměru jejich tepelných kapacit v korelaci $\varepsilon = f(NTU, W)$ zanedbatelný, proto není tolik důležité, jak přesná korelace je pro zóny použita.

Rozdělení do zón bude provedeno podle obr. 5., kde je znázorněno i označení teplot na hrdlech výměníku i mezi jednotlivými zónami.



Obr. 5. Zonální rozdělení výměníku

Pro jednotlivé zóny bude použita korelace pro křížový tok. Nevýhoda této metody u tohoto uspořádání proudů spočívá v tom, že záleží, který proud je silnější – má větší tepelnou kapacitu. V [2] jsou pro křížový tok uvedeny vztahy:

Pro $W_1 > W_2$ - příčně promíchávaný slabší proud, silnější proud v trubkách platí:

$$\varepsilon = 1 - e^{-\frac{1}{W} \cdot (1 - e^{-NTU \cdot W})} \quad (28)$$

kde:

$$W = \frac{W_{min}}{W_{max}} = \frac{W_2}{W_1} \quad (29)$$

$$NTU = \frac{k \cdot S_i}{W_{min}} = \frac{k \cdot S_i}{W_2} \quad (30)$$

$$S_i = n_t \cdot \pi \cdot d_1 \cdot t_p \quad (31)$$

Respektive pro první a poslední zónu:

$$S_i = n_t \cdot \pi \cdot d_1 \cdot l_{tn} \quad (32)$$

Dále pro tento případ platí:

$$\varepsilon = \frac{T_{2(i+1)} - T_{2i}}{T_{1i} - T_{2i}} \quad (33)$$

Odtud:

$$T_{2i} = \frac{T_{2(i+1)} - \varepsilon \cdot T_{1i}}{1 - \varepsilon} \quad (34)$$

A z bilance tepla se dopočte $T_{1(i+1)}$:

$$T_{1(i+1)} = T_{1i} - W \cdot (T_{2(i+1)} - T_{2i}) \quad (35)$$

V první zóně je zadána teplota T_{11} a zvolena T_{22} . Z těchto teplot se dopočítají podle výše zmíněných vztahů zbylé dvě teploty. Obdobně se vypočtou i ostatní zóny, až v poslední zóně se dostanou hodnoty teplot T_{12} a T_{21} . Pokud velikost teploty T_{21} neodpovídá zvolené vstupní teplotě dusíku, je třeba měnit velikost teploty T_{22} tak, aby teplota T_{21} dosáhla požadované

hodnoty. (Například pomocí funkce Řešitel v programu MS Excel.) Nově zjištěná hodnota teploty T_{22} se dosadí na začátek tepelného výpočtu a celý výpočet se několikrát opakuje, dokud není dosaženo požadované přesnosti, viz obr.3. V takovém případě by velikost teploty T_{12} měla dosahovat žádané hodnoty.

Pro $W_1 < W_2$ – příčně promíchávaný silnější proud, slabší proud v trubkách platí:

$$\varepsilon = \frac{1}{W} \cdot (1 - e^{-W \cdot (1 - e^{-NTU})}) \quad (36)$$

kde:

$$W = \frac{W_{min}}{W_{max}} = \frac{W_1}{W_2} \quad (37)$$

$$NTU = \frac{k \cdot S_i}{W_{min}} = \frac{k \cdot S_i}{W_1} \quad (38)$$

Dále pro tento případ platí:

$$\varepsilon = \frac{T_{1i} - T_{1(i+1)}}{T_{1i} - T_{2i}} \quad (39)$$

Odtud:

$$T_{1i} = \frac{T_{1(i+1)} - \varepsilon \cdot T_{2i}}{1 - \varepsilon} \quad (40)$$

A z bilance tepla se dopočte $T_{2(i+1)}$:

$$T_{2(i+1)} = T_{2i} - W \cdot (T_{1i} - T_{1(i+1)}) \quad (41)$$

V poslední zóně je zadána teplota T_{12} a zvolena T_{21} . Z těchto teplot se dopočítají podle výše zmíněných vztahů zbylé dvě teploty. Obdobně se vypočtou i ostatní zóny, až v první zóně se dostanou hodnoty teplot T_{11} a T_{22} . Pokud velikost teploty T_{11} neodpovídá zadané vstupní teplotě hélia, je třeba měnit velikost teploty T_{21} tak, aby teplota T_{11} dosáhla požadované hodnoty. Tato úprava má za následek i získání nové hodnoty pro teplotu T_{22} . Ta se dosadí na začátek tepelného výpočtu a celý výpočet se několikrát opakuje, dokud není dosaženo požadované přesnosti, viz obr.3. V takovém případě by velikost teploty T_{21} měla být v rámci dané přesnosti rovna zvolené teplotě dusíku na vstupu.

Vhledem k tomu, že je žádoucí co nejnižší spotřeba dusíku, bude teplotní rozdíl dusíku ΔT_2 nejspíše větší než teplotní rozdíl hélia ΔT_1 . Proto podle vztahu (2) bude velikost tepelné kapacity proudu hélia větší než velikost tepelné kapacity proudu dusíku $W_1 > W_2$ a uplatní se první z uvedených způsobů výpočtu.

4 Hydraulický výpočet výměníku

Tlakové ztráty se dělí na tlakové ztráty třením a tlakové ztráty místních odporů. Do tlakových ztrát se nezahrnují tlakové ztráty hrdel. Velikost hrdel se řídí velikostí potrubí, proto se tato tlaková ztráta započítává do tlakové ztráty potrubí. Podle velikosti tlakových ztrát je třeba upravit střední hodnotu tlaku, pro kterou se odečítají vlastnosti plynu, nebo velikost vstupního tlaku plynu, který může ovlivnit jeho vstupní teplotu, a s takto upravenými hodnotami znova provést tepelný výpočet.

Hydraulický výpočet není tak sěžejní jako tepelný výpočet, proto vzhledem k omezení délky práce budou uvedeny pouze vztahy pro výpočet složek tlakové ztráty. Výpočet jednotlivých veličin v těchto vztazích je v [1].

4.1 Tlakové ztráty v trubkovém prostoru

Celková tlaková ztráta trubkového prostoru lze vyjádřit vztahem:

$$\Delta p_{z1} = \Delta p_{t1} + \Delta p_{m1} \quad (42)$$

Tlakové ztráty třením

Tlakové ztráty třením v trubkách se stanoví z upravené Darcy-Weissbachovy rovnice o korekční faktor dle [1]:

$$\Delta p_{t1} = \lambda_{11} \cdot \frac{l_t}{d_1} \cdot \frac{u_1^2}{2} \cdot \rho_1 \cdot z_{21} \quad (43)$$

K tlakové ztrátě třením v trubkách by se měla ještě přičíst tlaková ztráta třením v komorách. Vzhledem ale k menší rychlosti proudění, velkému průřezu a malé délce je její velikost zanedbatelná.

Tlakové ztráty místními odpory

Tlakové ztráty místními odpory jsou tvořeny tlakovou ztrátou na vstupu a výstupu pracovní látky z trubkového svazku.

$$\Delta p_{m1} = \xi_{11} \cdot \frac{u_1^2}{2} \cdot \rho_1 \quad (44)$$

kde $\xi_{11} = 0,7$ je podle [1] součinitel místní ztráty pro vstup a výstup z trubkového svazku dohromady.

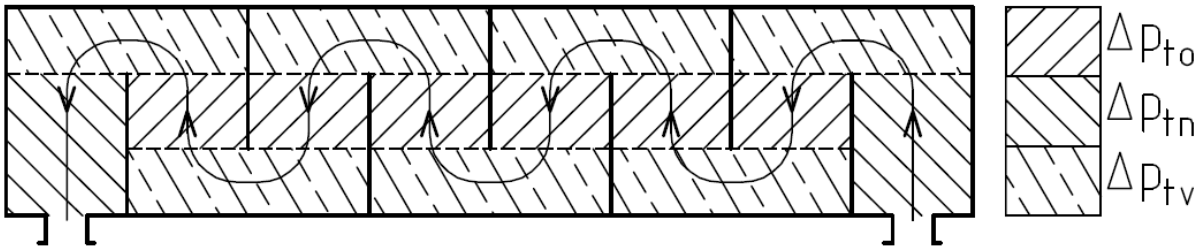
4.2 Tlakové ztráty v mezitrubkovém prostoru se segmentovými přepážkami

Podle [1] jsou v mezitrubkovém prostoru místní tlakové ztráty pouze na vstupu a na výstupu, tedy na hrdlech. Jak bylo řečeno výše, tyto ztráty se započítávají do tlakových ztrát potrubí. Tlakové ztráty mezitrubkového prostoru se segmentovými přepážkami jsou tedy tvořeny pouze ztrátami třením.

Tyto ztráty lze rozdělit na:

- Δp_{to} - Tlakové ztráty třením při příčném obtékání trubek v opřepážkovaném svazku
- Δp_{tn} - Tlakové ztráty třením při příčném obtékání trubek v neopřepážkovaném svazku
- Δp_{tv} - Tlakové ztráty třením při podélném a příčném obtékání trubek v prostoru nad seříznutím přepážek – včetně otočení proudu

Jednotlivé ztráty jsou znázorněny na obr. 6.



Obr. 6. Rozdělení třecích tlakových ztrát v mezitrubkovém prostoru se segmentovými přepážkami

Celková tlaková ztráta mezitrubkového lze vyjádřit vztahem:

$$\Delta p_{z2} = \Delta p_{t2} + \Delta p_{m2} = \Delta p_{to} + \Delta p_{tn} + \Delta p_{tv} \quad (45)$$

kde:

$$\Delta p_{to} = 2 \cdot \lambda_{22} \cdot n_{rp} \cdot (n_p - 1) \cdot \rho_2 \cdot u_2'^2 \cdot z_{22} \cdot z_3 \cdot z_4 \quad (46)$$

$$\Delta p_{tn} = 2 \cdot \lambda_{22} \cdot (n_{rp} + n_{rv}) \cdot \rho_2 \cdot u_2'^2 \cdot z_2 \cdot z_3 \cdot z_5 \quad (47)$$

Pro laminární proudění v MP prostoru $Re_2 \leq 100$:

$$\Delta p_{tv} = n_p \cdot \left[2 \cdot \frac{\rho_2 \cdot u_{2v}^2}{2} + 26 \cdot \frac{\dot{m}_2 \cdot \mu_2}{\sqrt{S_{2Z} \cdot S_{vZ}}} \cdot \left(\frac{n_{rv}}{t_t - d_2} + \frac{t_p}{d_{hv}^2} \right) \right] \cdot z_4 \quad (48)$$

Pro turbulentní proudění v MP prostoru $Re_2 > 100$:

$$\Delta p_{tv} = n_p \cdot \left[(2 + 0,6 \cdot n_{rv}) \cdot \frac{\rho_2 \cdot u_{zv}^2}{2} \right] \cdot z_4 \quad (49)$$

5 Návrh geometrie výměníku

Jelikož je dusík drahý, je třeba, aby byla jeho spotřeba co možná nejmenší. To znamená, že je potřeba ho ve výměníku ohřát na co nejvyšší teplotu, jak plyne ze vzorce (3). K tomu je zapotřebí dostatečná teplosměnná plocha výměníku. Plochu lze zvětšovat buď délkou výměníku anebo počtem trubek. Prodloužením výměníku se nemění rychlost proudění médií, a tedy téměř ani součinitel přestupu tepla. Respektive díky větší ploše se dosáhne menší spotřeby a rychlost dusíku o něco klesne, ale ne významně. Naopak zvýšením počtu trubek rychlost proudění obou médií klesá výrazněji, a tedy i součinitel přestupu tepla. Proto je žádoucí využít maximální možnou délku výměníku, a až následně zvyšovat počet trubek. S počtem trubek se samozřejmě zvětšuje průměr výměníku. Celý výměník bude navíc umístěn ve vakuovém plášti a celá trať zabalena do izolace, proto nemůže být průměr výměníku příliš veliký.

Poměr teplosměnné plochy výměníku k průtočnému průřezu lze kromě délky výměníku zvýšit i zmenšováním průměru trubek. Protože jsou média čisté plyny, nehrozí ucpávání trubek, a tak jejich minimální velikost je limitována pouze obtížností konstrukce.

Součinitel přestupu tepla na straně dusíku lze také ovlivnit počtem přepážek. Zvýšením jejich počtu roste součinitel přestupu tepla, ale výrazně také tlaková ztráta.

Podle výše uvedeného postupu jsem vytvořil program v aplikaci MS Excel pro rychlý výpočet různých variant. Geometrie výměníku je navržena vždy tak, aby byla využita maximální délka výměníku. Nakonec jsem zvolil trubky o velikosti $\varnothing 8 \times 1$. Výpočet jsem provedl pro různé počty trubek a přepážek. Nakonec jsem zvolil použití 397 trubek a patnácti přepážek.

Po vyřešení konstrukce byly jednotlivé geometrické parametry výměníku upraveny. Hodnoty nejdůležitějších z nich jsou:

Činná délka trubek	l_t	1 120 mm
Vnější průměr trubek	d_2	8 mm
Vnitřní průměr trubek	d_1	6 mm
Počet trubek	n_t	397
Rozteč trubek	t_t	11 mm
Vnitřní průměr pláště	D_1	240 mm
Počet přepážek	n_p	15
Rozteč přepážek	t_p	70 mm
Délka neopřepážkované části	l_{tn}	70 mm
Výška přepážky	h_p	177 mm
Průměr přepážky	D_p	238 mm
Průměr otvorů v přepážce	d_{2p}	8,5 mm
Průměr svazku trubek	D_s	237 mm

Po provedení výpočtu s touto geometrií byly získány teploty médií, kterým odpovídá zkrácení trubek i pláště vůči montážní teplotě o cca 4 mm. Proto jsem pro další výpočet

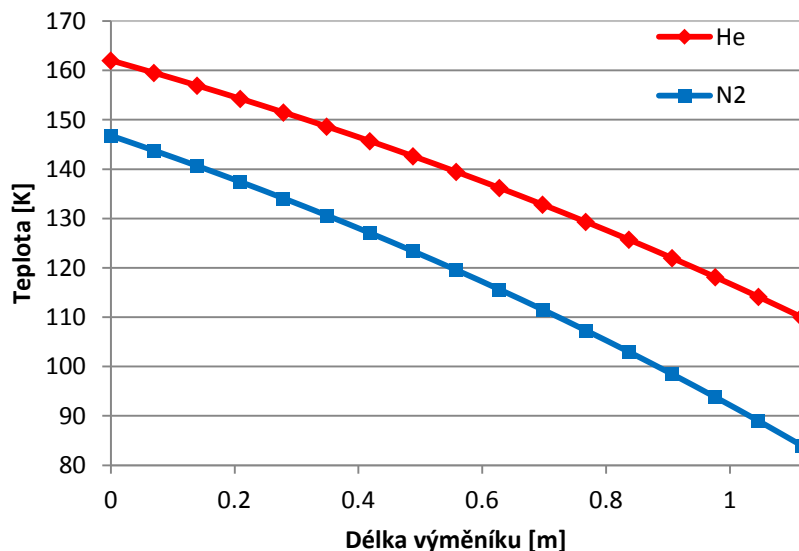
upravil délku trubek na 1 116 mm a rozteč přepážek i délku neopřepážkované části na 69,75 mm. S takto upravenou geometrií pro výpočet jsem získal následující hodnoty veličin:

Teplota hélia na vstupu	T_{11}	162 K
Teplota hélia na výstupu	T_{12}	110 K
Teplota dusíku na vstupu	T_{21}	84 K
Teplota dusíku na výstupu	T_{22}	146,8 K
Hmotnostní průtok He	\dot{m}_1	0,0925 kg.s ⁻¹
Hmotnostní průtok N ₂	\dot{m}_2	0,0370 kg.s ⁻¹
Součinitel přestupu tepla na straně He	α_1	217 W.m ⁻² .K ⁻¹
Součinitel přestupu tepla na straně N ₂	α_2	359 W.m ⁻² .K ⁻¹
Součinitel prostupu tepla vztažen k vnitřní ploše	k	149 W.m ⁻² .K ⁻¹
Vstupní tlak He	p_1	1 200 kPa
Vstupní tlak N ₂	p_2	200 kPa
Tlaková ztráta He v trubkovém prostoru	Δp_{z1}	0,09 kPa
Tlaková ztráta N ₂ v mezitrubkovém pr.	Δp_{z2}	55,0 kPa
Střední tlak He	\bar{p}_1	1 200 kPa
Střední tlak N ₂	\bar{p}_2	172,4 kPa

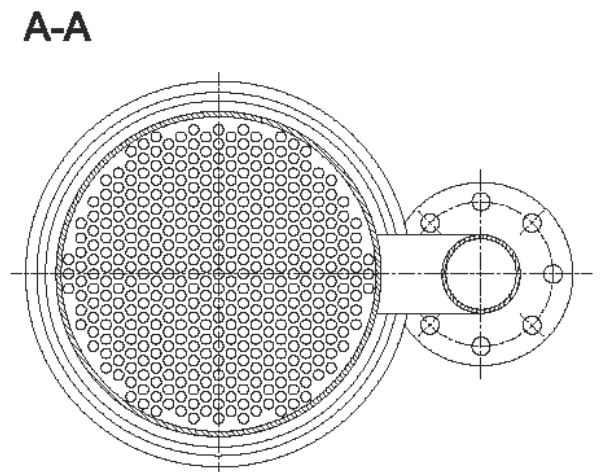
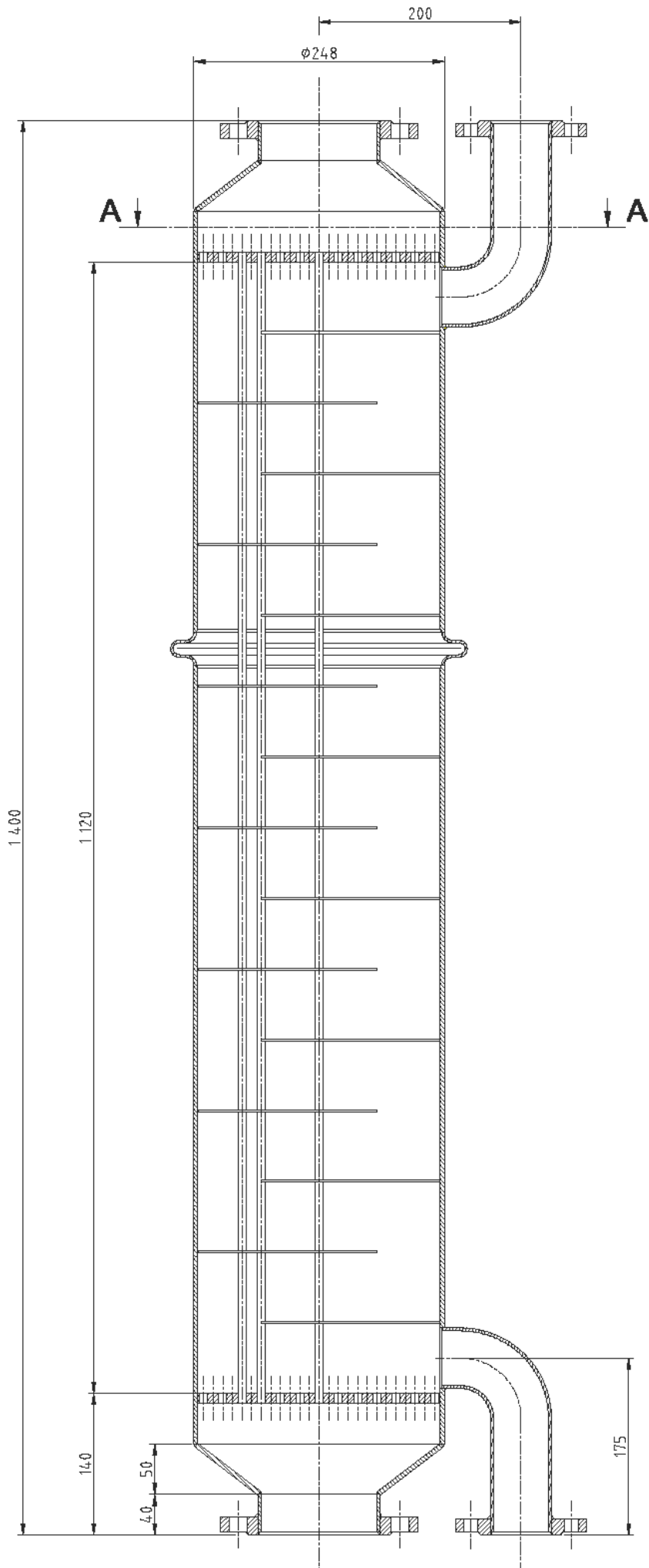
Podobnostní kritéria:

Prandtlovo číslo He	Pr_1	0,671
Prandtlovo číslo N ₂	Pr_2	0,755
Reynoldsovo číslo He v trubkách	Re_1	4 177
Reynoldsovo číslo N ₂ v mezitrubkovém pr.	Re_2	83 516
Nusseltovo číslo He v trubkách	Nu_1	14,2
Nusseltovo číslo N ₂ v mezitrubkovém pr.	Nu_2	396

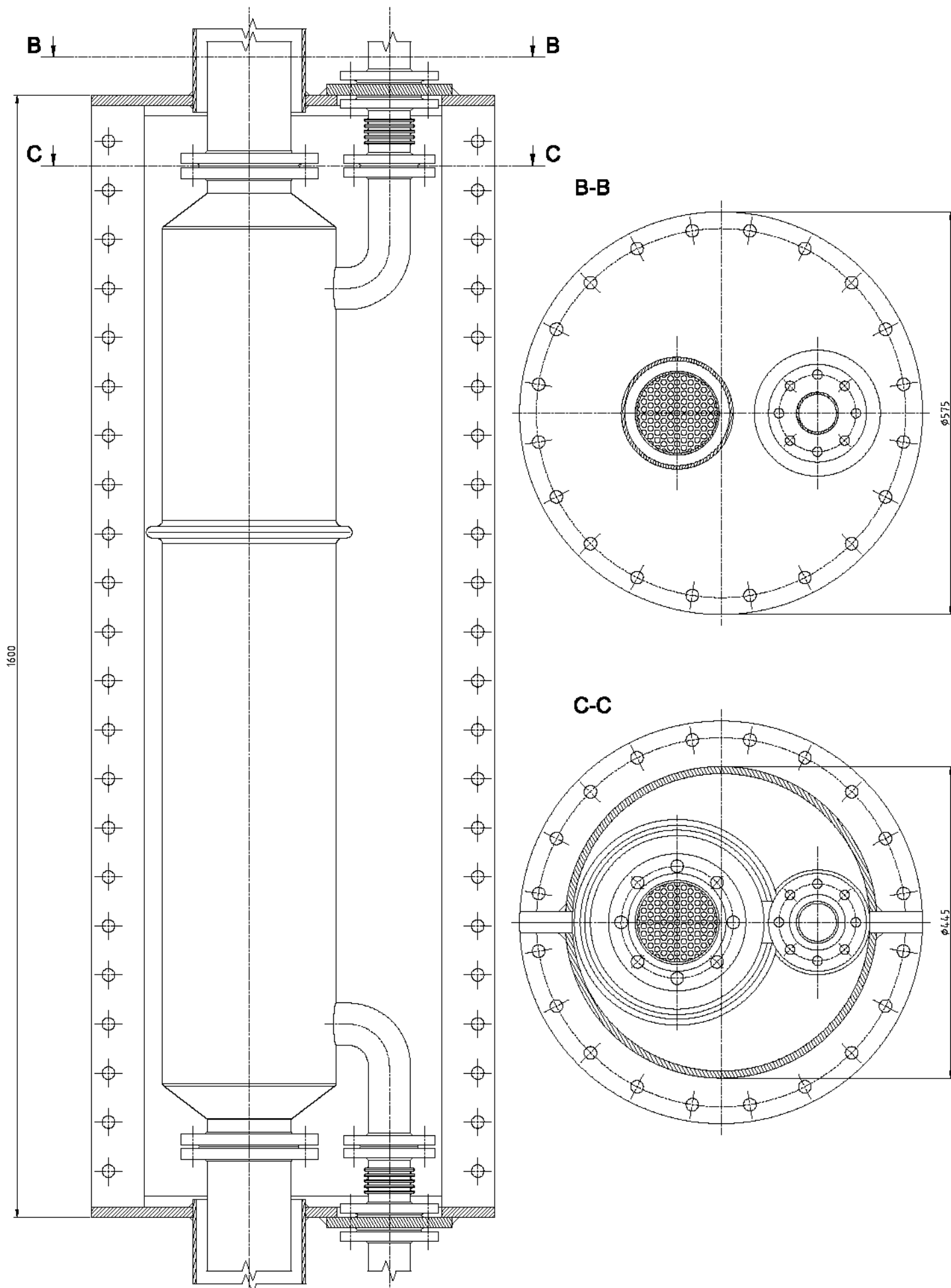
Průběh teplot ve výměníku obou médií vycházející ze zonální metody je znázorněn na obr. 7.



Obr. 7 Průběh teplot ve výměníku



Obr. 8 Výkres navrženého výměníku



Obr. 9 Výkres navrženého výměníku ve vakuovém plášti

6 Konstrukce výměníku

Výměník bude zkonstruován ze slitiny hliníku, protože hliník a jeho slitiny dobře snáší velmi nízké teploty a zároveň nejsou tak obtížně svařitelné. Váha celého výměníku je přibližně 45 kg, proto bude uchycen pouze za příruby. Není tedy třeba řešit jeho teplotní dilatace vůči chladicímu okruhu. Ty se projeví v kolenech okruhu znázorněného na obr. 2. Je ovšem třeba kompenzovat dilatace mezi trubkami a pláštěm a mezi výměníkem a vakuovým opláštěním. Tyto vzájemné dilatace budou kompenzovány vlnovcovými kompenzátory. Přírubové spoje budou těsněny expandovaným teflonem.

Řez výměníkem je znázorněn na obr. 8. a výměník s vakuovým pláštěm je znázorněn na obr. 9. Na výkresu nejsou znázorněny šrouby.

Závěr

V této práci jsem se zabýval návrhem a zjednodušenou konstrukcí kryogenního výměníku tepla, ve kterém se chladí hélium dusíkem. Zvolil jsem trubkový výměník se segmentovými přepážkami. Pro jeho výpočet jsem vytvořil program dle uvedených vztahů. Návrh byl proveden s ohledem na spotřebu dusíku. Navržený výměník splňuje zadané požadavky. Výstupní teplota hélia je 110 K při průtoku dusíku $0,370 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ se zvolenou vstupní teplotou 84 K. Tlaková ztráta hélia je mnohem menší než maximální povolená a délka výměníku je právě povolených 1 400 mm. Dusík se ve výměníku ohřeje na teplotu 146,8 K.

Pokud se dusík nebude někde dále využívat, bylo by vhodné provést pro snížení jeho spotřeby některá z následujících opatření: povolit větší délku výměníku; použít trubky menšího průměru; vracet dusík pomocí kompresoru zpět do zásobníku s kapalným dusíkem; použít výparník. Poslední jmenovaná možnost ovšem vyžaduje zcela jinou konstrukci a hůře se také reguluje.

Seznam symbolů

a	Proměnný exponent	[-]
	Teplotní vodivost	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$
c	Konstanta	[-]
c_p	Měrná tepelná kapacita	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
d_1	Vnitřní průměr trubek	[m]
d_2	Vnější průměr trubek	[m]
d_{2p}	Průměr otvoru v přepážce	[m]
D_1	Vnitřní průměr pláště výměníku	[m]
D_p	Průměr přepážky	[m]
D_s	Průměr svazku trubek	[m]
h_p	Výška přepážek	[m]
h_{vp}	Výška výřezu přepážek	[m]
k	Součinitel prostupu tepla	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$
l	Charakteristický rozměr	[m]
l_t	Délka trubek	[m]
l_{tn}	Délka neopřepážkované části trubek	[m]
\dot{m}	Hmotnostní tok	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
n_p	Počet přepážek	[-]
n_{rc}	Počet činných řad trubek	[-]
n_t	Počet trubek	[-]
NTU	Počet převodových jednotek	[-]
Nu	Nusseltovo číslo	[-]

\dot{Q}	Tepelný výkon	[W]
Δp	Tlakový rozdíl	[Pa]
Pr	Prandtlovo číslo	[-]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
s_p	Tloušťka přepážky	[m]
S	Průřez	[m ²]
t_p	Rozteč přepážek	[m]
t_t	Rozteč trubek	[m]
T	Termodynamická teplota	[K]
\bar{T}	Střední teplota	[K]
\bar{T}_{iS}	Střední teplota stěny na straně proudu i	[K]
ΔT	Teplotní rozdíl	[K]
u	Střední rychlost	[m.s ⁻¹]
\dot{V}	Průtok	[m ³ .s ⁻¹]
W	Poměr tepelných kapacit proudů	[-]
W_i	Tepelná kapacita proudu i	[J.kg ⁻¹]
x	Substituce veličin	[-]
y	Korekční faktor součinitele přestupu tepla	[-]
z	Korekční faktor tlakových ztrát	[-]
α	Součinitel přestupu tepla	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
ε	Účinnost výměníku	[-]
λ	Součinitel tepelné vodivosti	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
	Součinitel tření	[-]
μ	Dynamická viskozita	[Pa.s]
ν	Kinematická viskozita	[m ² .s ⁻¹]
ξ	Součinitel místní tlakové ztráty	[-]
ρ	Hustota	[kg.m ⁻³]
φ	Úhel	[°]
ψ	Mezerovitost trubkového svazku	[-]

Použité zkratky

MP	Mezitrubkový prostor
TP	Trubkový prostor

Seznam použité literatury

- [1] Stehlík, Petr, Kohoutek, Josef, Němčanský, Jan,. Tepelné pochody : výpočet výměníku tepla / Vyd. 1. Brno : Vysoké učení technické, 1991. 129 s. : ISBN 80-214-0363-2.
- [2] Šesták, Jiří, Žitný, Rudolf,. Tepelné pochody II : výměníky tepla, odpařování, sušení, průmyslové pece a elektrický ohřev / Vyd. 1. Praha : ČVUT, 1997. 165 s. : ISBN 80-01-01630-7.
- [3] Rieger, František, Novák, Václav, Jirout, Tomáš,. Hydromechanické procesy I / Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2005. 209 s. : ISBN 80-01-03286-8.
- [4] Materiály Akademie věd obdržené se zadáním
- [5] *NIST* [online]. c2011 [cit. 2012-02-12]. NIST Webbook chemie. Dostupné z WWW: <<http://webbook.nist.gov/chemistry/>>.
- [6] *ELI Beamlines* [online]. c2011 [cit. 2012-02-11]. FAQ. Dostupné z WWW: <<http://www.eli-beams.eu/cs/faq-2/>>.