

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

VENTILACE TLAKOVÉ OBÁLKY REAKTORU GFR

HEAT TRANSFER IN THE PRESSURE COVER OF THE GFR REACTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ROMAN KORYČANSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ MARTINEC, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Roman Koryčanský

který/která studuje v magisterském navazujícím studijním programu

obor: Energetické inženýrství (2301T035)

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Ventilace tlakové obálky reaktoru GFR

v anglickém jazyce:

Heat transfer in the pressure cover of the GFR reactor

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Plynem chlazené rychlé reaktor (GFR) představují jednu z aplikovatelných možností budoucích reaktorů generace IV. Tyto reaktory navazují z historického pohledu na množivé reaktory. Reaktory typu GFR nemají v současné době referenční jednotku. Projekt Allegro je koncipován jako malý experimentální reaktor, který bude z pohledu složení aktivní zóny zaměřen na palivo typu MOX a případně jiné keramické palivo. Z pohledu aplikovatelnosti navrhované technologie je potřeba prokázat nejen připravenost na havarijní stavy technologie, ale také zabezpečit provozuschopnost v nominálním režimu, což klade nároky na celkovou tepelnou bilanci uvnitř tlakové obálky reaktoru.

Cíle diplomové práce:

Rešerše projektů GFR se zaměřením na demonstrátor ALLEGRO.

Analýza vlivu teploty na materiály a zařízení uvnitř tlakové obálky.

Analýza tepelné bilance a teplot uvnitř tlakové obálky.

Návrh způsobu odvodu tepla z tlakové obálky.

Seznam odborné literatury:

SEHGAL, Edited by Bal Raj. Nuclear safety in light water reactors: severe accident phenomenology. 1st ed. Amsterdam: Elsevier/Academic Press. ISBN 01-238-8446-2.

Richard Stainsby, Karen Peers, Colin Mitchell, Christian Poette, Konstantin Mikityuk, Joe Somers, Gas cooled fast reactor research in Europe, Nuclear Engineering and Design, Volume 241, Issue 9, September 2011, Pages 3481-3489, ISSN 0029-5493

Giorgio Locatelli, Mauro Mancini, Nicola Todeschini, Generation IV nuclear reactors: Current status and future prospects, Energy Policy, Volume 61, October 2013, Pages 1503-1520, ISSN 0301-4215

Principles of heat and mass transfer. 7th ed., international student version. Singapore: John Wiley, c2013, xxiii, 1048 s. ISBN 978-0-470-64615-1.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Martinec, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 22.10.2013

L.S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt:

Tato práce se zabývá návrhem ventilace tlakové obálky demonstrátoru GFR. V první části je stručná rešerše projektu GFR a přehled vlivů teplot na vnitřní struktury. V části následující části je spočtena bilance tepelných ztrát uvnitř tlakové obálky a to pro tři případy: nezaizolovaný, plně zaizolovaný a částečně izolovaný povrch reaktoru. V následující části je proveden návrh odvodu tepla pro částečně zaizolovaný povrch.

Abstract:

This paper describes the design of the ventilation pressure cover of the demonstrator GFR. The first part is a brief research project GFR and the effects of temperature on the inside structures. In the following part is calculated balance heat losses within the pressure cover for three cases: non-insulated, fully-insulated and partially insulated surface of the reactor. The following is a design of a heat sink for partially insulated surface.

Klíčová slova:

ALLEGRO, GFR, odvod tepla, chladící deska, tlaková obálka

Keywords:

ALLEGRO, GFR, heat transfer, cooling plate, pressure cover

Bibliografická citace:

KORYČANSKÝ, R. *Ventilace tlakové obálky reaktoru GFR*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 89 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Martinec, Ph.D..

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Ventilace tlakové obálky reaktoru GFR vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce Ing. Jiřího Martince, Ph.D. a konzultanta Ing. Ladislava Bělovského, CSc. V práci jsem využil znalostí nabytých na energetickém ústavu, konzultací a z literatury, která je uvedena v seznamu zdrojů.

V Brně dne: _____

Bc. Roman Koryčanský

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Martincovi, Ph.D., panu Ing. Ladislava Bělovskému, CSc. a Ing. Jiřímu Hejčíkovi, Ph.D. za všechny čas, odborné rady a konzultace týkající se mé diplomové práce.

Obsah

1. Úvod.....	15
2. Koncept GFR.....	16
2.1. Koncept GFR2400.....	17
2.2. Demonstrátor ALLEGRO	18
3. Posouzení vlivu teplot na struktury v tlakové obálce	20
3.1. Betonové struktury	20
3.2. Měřicí přístroje.....	20
3.3. Shrnutí.....	20
4. Tepelná bilance uvnitř tlakové obálky	21
4.1. Předběžný výpočet tepelných ztrát	21
4.1.1. Předběžný výpočet neizolovaná tlaková nádoba	21
4.1.2. Předběžný výpočet izolovaná tlaková nádoba	29
4.1.3. Shrnutí.....	32
4.2. Tepelné ztráty částečně zaizolovaného reaktoru.....	33
4.2.1. Ztráty tlaková nádoba.....	34
4.2.1.1. Dno + neizolovaný válec 1	34
4.2.1.2. Válcová část 1.3	44
4.2.1.3. Opora 1.4	47
4.2.1.4. Izolovaný válec 1.6	52
4.2.1.5. Izolovaný válec 1.7	55
4.2.1.6. Potrubí k hlavním výměníkům	57
4.2.1.7. Izolovaný válec 1.8	59

4.2.1.8. Potrubí k DHR výměníkům	61
4.2.1.9. Neizolovaný válec + příruba + vrchlík.....	63
4.2.2. Ztráty hlavní výměník	70
4.2.3. Ztráty větve DHR	70
4.2.3.1. Výpočet tepelných ztrát potrubí.....	70
4.2.3.2. Výpočet tepelných ztrát DHR.....	73
5. Návrh způsobů odvodu tepla z tlakové obálky.....	73
5.1. Tepelný výměník	73
5.1.1. Návrh výměníku pro šachtu reaktoru.....	74
5.2. Chladicí desky	81
6. Závěr.....	85

1. Úvod

Evropská komise prostřednictvím EURATOM usiluje o realizaci programu dlouhodobého udržitelné energetiky, jehož cílem je v rámci spolupráce zemí EU uvést do provozu demonstrátory reaktorů 4. Generace s rychlými neutrony. V reaktorech na rychlých neutronech je možné používat uzavřený palivový cyklus, jež výrazně zvyšuje využití jaderného paliva s čímž je spojené menší množství jaderného odpadu.

Rychlé reaktory generace 4. jsou sodíkem chlazený rychlí reaktor (SFR), olovem chlazený rychlí reaktor (LFR) a heliem chlazený rychlý reaktor (GFR)

Projekt rychlého plynem chlazeného reaktoru byl zahájen v rámci 5. Rámcového programu EURATOM v roce 2000, na který navázal 4letý projekt v rámci 6. rámcového programu EURATOM v roce 2005. Koncepce GFR byla vybrána jako jeden z perspektivních projektů v rámci GIF (Generation IV International Forum).

Mezi hlavní přednosti konceptu GFR patří vysoká výstupní teplota chladiva (850°C), jež umožňuje využití plynové turbíny o vysoké účinnosti, mimo to je též atraktivní pro průmyslové aplikace zejména výrobu vodíku.

V rámci programů GIV ((FP5 GCFR, FP6 GCFR STREP, FP7 GoFastR) probíhá vývoj energetického reaktoru GFR o výkonu 2400W a zároveň demonstrátoru technologie ALLEGRO o výkonu 75MW. Vývoj nabyl na intenzitě po roce 2005, kdy byla ve Francii přijata strategie výzkumu a vývoje SFR a GFR. Vývoj GFR byl však z finančních důvodů pozastaven. Ve vývoji demonstrátoru ALLEGRO pokračují partneři ve střední Evropě (ČR,SR, Maďarsko).

Cílem projektu ALLEGRO je navrhnout a do roku 2025 postavit výzkumný reaktor ALLEGRO, jehož hlavním posláním má být:

- 1) Testovat karbidické palivo $(\text{U,Pu})\text{C}$ v keramických povlácích SiC (keramické palivo vyvíjené v CEA, krátkodobě odolá 1600°C)
- 2) Ověřit použitelnost heliových technologií (bezpečnostní systémy, materiály, komponenty, procedury)

Cílem této práce je stanovit tepelné ztráty z tělesa ALLEGRO a navrhnout systém chlazení tlakové obálky. Jako výchozí hodnoty jsou uvažovány teplota na vnitřní stěně komponent reaktoru 400°C a vstupní teplota chladícího dusíku 35°C .

Nejprve spočteme ztráty neizolovaného a plně izolovaného reaktoru, následně navrhneme částečnou izolaci. Ztráty pro částečně izolovaný povrch budeme počítat pro dílčí úseky, to nám umožní počítat s aktuální teplotou chladiva. Pro odvod tepla volíme dva oddělené okruhy jeden pro chlazení dusíku, druhý pro odvod ztrát radiací.

2. Koncept GFR

GFR je jedním z šesti konceptů vybraných v rámci GIF (Gen IV International Forum), tři z nich jsou rychlé reaktory, Rychlé reaktory výrazně zlepšují využití štěpného materiálu, díky čemuž dochází k výraznému snížení množství a radiotoxicity z radioaktivního odpadu, tím naplňují jeden z cílů Gen IV udržitelnost.

Využití plynu jako chladiva umožňuje dosáhnout na výstupu mnohem vyšší teploty a tím i vyšší tepelné účinnosti cyklu, mimo to lze teplo též využít při výrobě vodíku.

Přínosy:

- udržitelnost hlavní cílem GFR konceptu, znamená plné využití uranu a recyklaci aktinidů v uzavřeném cyklu, je uvažováno též odebrání a recyklace dlouho žijících štěpných produktů.
- zabránění šíření jaderných zbraní - díky vysokému stupni vyhoření a recyklaci je ve výsledné odpadu minimální množství vysoce aktivních štěpných produktů
- ekonomika vyšší výstupní teplota (850°C) umožňuje použití kombinace plynové a parní turbíny pro dosažení vysoké účinnosti výroby elektrické energie a též k výrobě vodíku termochemickou cestou.
- bezpečnost je nejdůležitějším aspektem každého jaderného zařízení, kombinace jednoduché a robustní konstrukce ve spojení s kvalitními materiály, pokrytí paliva s karbidu křemíku odolá teplotám 1600°C a výše, součástí projektu je též systém odvodu zbytkového tepla DHR (decay heat removal system).

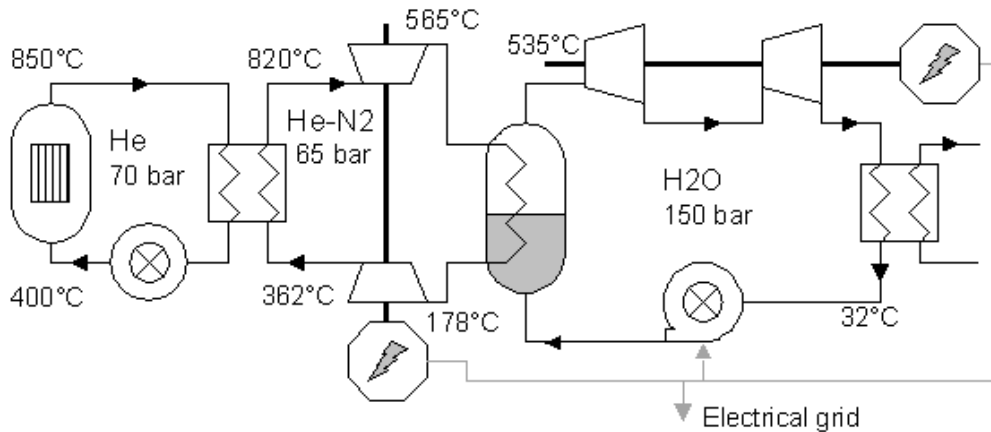
Při návrhu jsou zvažovány dva hlavní parametry teplota a hustota výkonu. Vysoká teplota ukládá vysoké nároky na materiál zejména na pokrytí palivových souborů. Hustota tepelného výkonu má vliv zejména na ekonomiku provozu (menší náklady na palivo, menší zásoby paliva, rozměry tlakových nádob), vysoká hustota představuje problém v případě havárie. Hustota výkonu je 100MW/ m³.

Cíle k řešení:

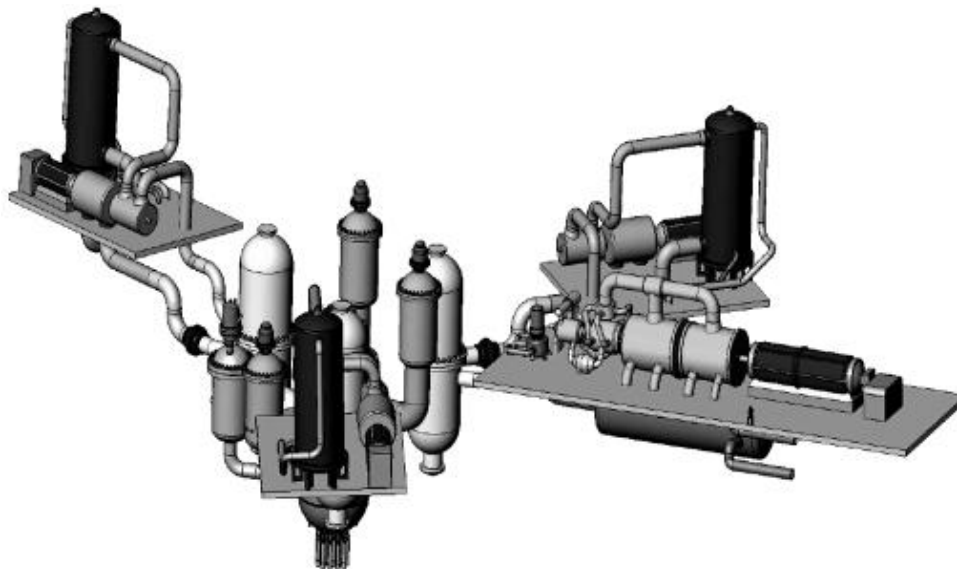
- palivový elementy pro provoz při vysokých teplotách
- jádro soběstačné v produkci štěpných materiálů bez použití heterogenní množivé zóny
- bezpečnost - systém odvodu zbytkového tepla, vyvažující vysokou hustotu výkonu.

2.1. Koncept GFR2400

Cílem projektu GFR je energetický reaktor o tepelném výkonu 2400 MW_t (1120 MW_{el}). Chlazení reaktoru probíhá skrze tři primární chladicí smyčky ($3 \times 800 \text{ MW}$), ke konverzi energie slouží plynové turbíny v nepřímém cyklu ($3 \times 130 \text{ MW}$) a jedna parní turbína (730 MW). Jako chladivo primárního okruhu slouží helium, v sekundárním okruhu obíhá směs helia a dusíku.



obr 1 schéma GFR [2]



obr 2 GFR 2400 [2]

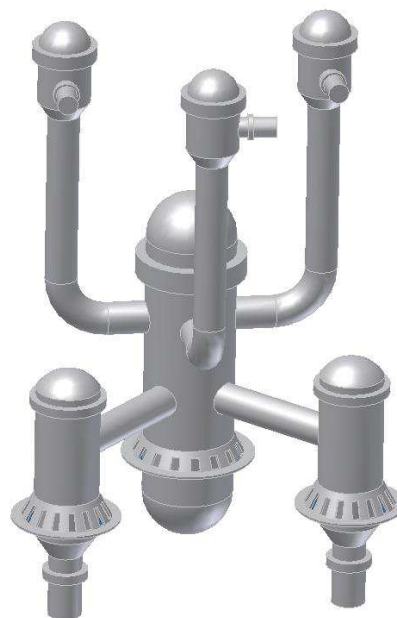
Tlaková nádoba má mít vnitřní průměr 7,3m výšku 20m tloušťku stěny 0,19m a hmotnost 1000t, jako materiál byla zvolena feritická ocel 9Cr1Mo.

2.2. Demonstrátor ALLEGRO

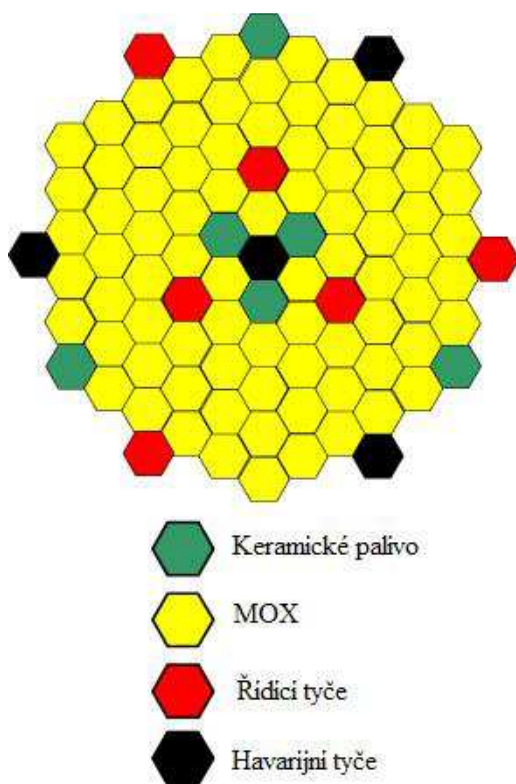
Reaktor ALLEGRO bude rychlí množivý reaktor o tepelném výkonu 75MW. Reaktor se skládá z tlakové nádoby (h 14 m a d 3,5 m), dvou hlavních výměníků (h 7,5m d 2,5 m) a tří větví DHR - rozměry výměníků (h 3,75 m d 2,05 m). Primární okruh bude ochlazován heliem o tlaku 7 MPa, sekundární okruh bude naplněn vodou o tlaku 6,5 MPa. Průběh teploty závisí na použitém palivu.

V rámci testování nového paliva jsou plánovány dvě konfigurace aktivní zóny, nejprve bude aktivní zóna vyplněna odzkoušeným MOX palivem s ocelovým pokrytím, na několika místech budou umístěny testované keramické palivové tyče. Aktivní zóna s MOX palivem

bude provozována při 260°C na vstupu a 570°C na výstupu.



obr 3 Demonstrátor GFR

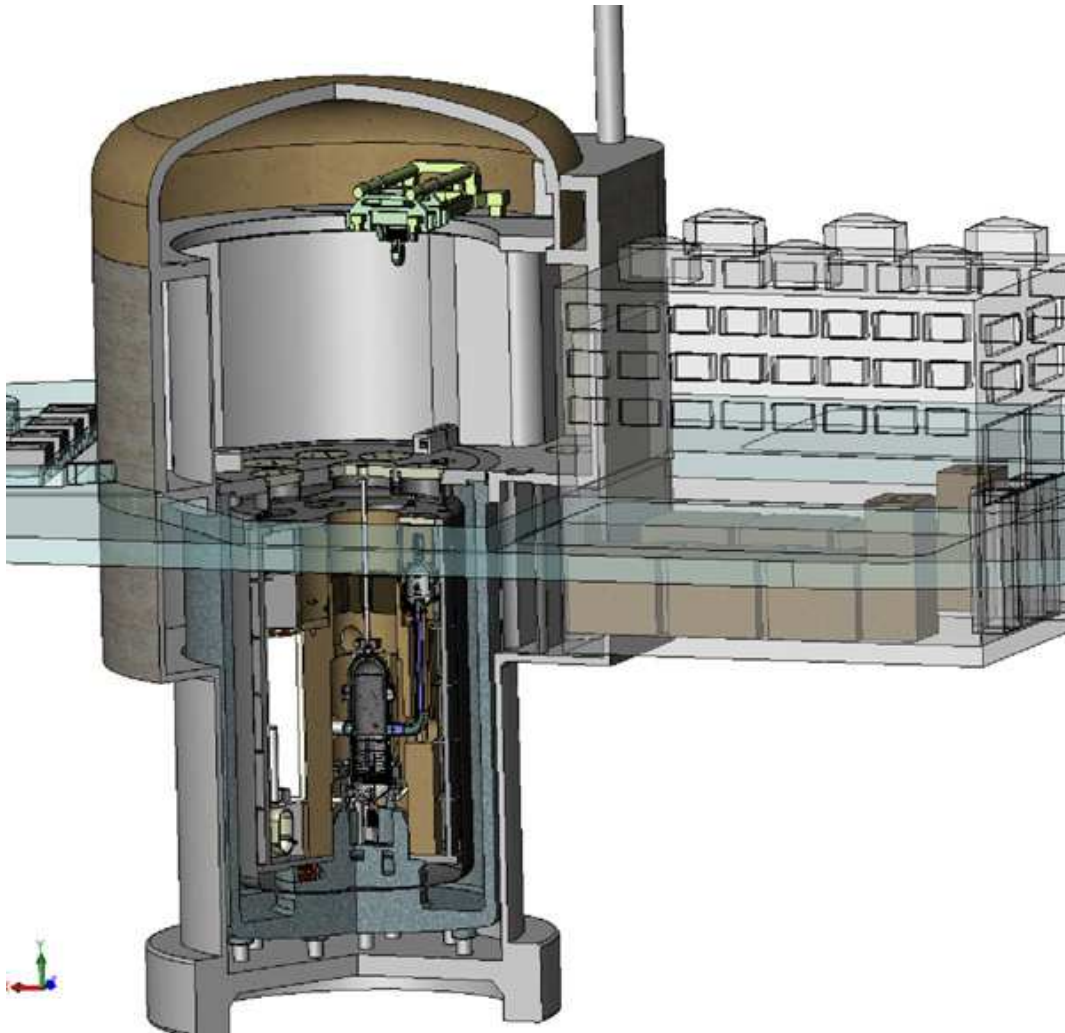


obr 4 MOX zóna s testovaným keramickým palivem [3]

V případě, že se nové keramické palivo osvědčí, bude jím zaplněna celá aktivní zóna. Díky tomu bude možné zvýšit provozní teploty na 400/850°C.

Mimo testování keramického paliva poslouží ALLEGRO též k prověření použitelnosti heliových technologií.

Reaktor bude uložen uvnitř tlakové obálky (H 30 m D 17 m), vnitřní prostor bude z velké části vyplněn betonovými strukturami, předpokládá se 20% volného prostoru. Vnitřní prostor tlakové obálky bude vyplněn dusíkem o tlaku 0,1 MPa.



obr 5 Budova reaktoru ALLEGRO [1]

3. Posouzení vlivu teplot na struktury v tlakové obálce

Cílem je zjistit vhodnou teplotu uvnitř tlakové obálky z hlediska jejího vlivu na životnost a spolehlivost používaných materiálů a zejména vnitřního zařízení. Původní návrh uvažuje vnitřní teplotu 50°C tato teplota se však jeví poměrně nízká.

3.1. Betonové struktury

Zvýšené teploty mají za následek rychlejší vysychání betonu, v důsledku dlouhodobé expozice teplotám do 100°C dochází ke zvýšení pevnosti v tlaku, zároveň dochází k poklesu modulu pružnosti, tyto změny dále nepokračují po stabilizaci vlhkosti betonu.

Z hlediska vlivu na strukturu betonu nebyly pozorovány žádné změny při teplotách v rozmezí 100-300°C. U vysoko-pevnostních betonů vyztužených polypropylenovými vlákny dochází při teplotách přesahujících 170 °C k tavení těchto vláken, to má za následek vznikání kanálek a zvyšování poréznosti betonu, nicméně vliv na pevnost v tlaku a modul pružnosti je malý.

3.2. Měřicí přístroje

Přístroje pro měření teploty tlaku a průtoku jsou dimenzovány pro provoz při teplotách měřeného média, Vodiče v závislosti na druhu použité izolace mohou být provozovány při teplotách v rozsahu 90-260°C

3.3. Shrnutí

Vzhledem k tepelným odolnostem jednotlivých komponent uvnitř tlakové obálky můžeme považovat za bezpečnou teplotu do 100°C

4. Tepelná bilance uvnitř tlakové obálky

Reaktor ALLEGRO má pracovat ve dvou konfiguracích při rozdílných teplotách, nejprve při 260°C a posléze při 400°C, výpočty proto budeme provádět pro vyšší z teplot.

Nejprve spočítáme tepelné ztráty neizolovaného reaktoru, následně zhodnotíme možnosti chlazení, poté spočteme též ztráty pro plně zaizolovaný povrch reaktoru. Na základě výsledků těchto dvou krajních situací navrhne prakticky proveditelnou izolaci, s cílem zaizolovat co největší plochu s ohledem na přístupy pro manipulaci.

4.1. Předběžný výpočet tepelných ztrát

Při prvotním výpočtu ještě nebyly k dispozici podklady k rozměrům tlakové obálky, proto byl výpočet proveden pro přirozenou konvekci kolem osamocené tělesa, jednotlivá tělesa byla nahrazena ekvivalentními válci o stejném povrchu. Výstupem tohoto výpočtu jsou řádové hodnoty tepelných ztrát.

4.1.1. Předběžný výpočet neizolovaná tlaková nádoba

Nádoba reaktoru

Výchozí hodnoty

- Rozměry $S=155,0058\text{m}^2$ $d=3,5\text{m}$ $L=14,09\text{m}$ $\delta=0,1\text{m}$ $\lambda = 50 \text{ W/m.K}$
- teploty $T_1=400^\circ\text{C}$ $T_w^* = 380^\circ\text{C}$ $T_w = 378,5689^\circ\text{C}$

S - povrch tlakové nádoby

D - průřez tlakové nádoby

L - délka ekvivalentního válce

δ - tloušťka stěny

T_1 - vnitřní teplota

T_w^* - odhadovaná teplota povrchu - poslouží při prvním výpočtu

T_w - teplota povrchu - získáme ji iterativním přepočtem

T_∞ - teplota okolí

Ztráty konvekci

Z tabulek dusíku

- $T_{\infty}=50^{\circ}\text{C}$ $Pr = 0,7158$ — $\beta = 0,003095$ $\nu = 1,82 \cdot 10^{-5}$ $\lambda = 0,02759 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$

Pr - Prandtlovo číslo

β - součinitel teplotní roztažnosti

ν - kinematická viskozita

λ - tepelná vodivost

Grashofovo číslo

$$Gr_L = \frac{g \cdot \beta \cdot L^3 \cdot (T_W - T_{\infty})}{\nu^2}$$

Rov. 4.1.1

$$Gr_L = \frac{9,81 \cdot 0,003095 \cdot 14,09^3 \cdot (378,5689 - 50)}{1,82 \cdot 10^{-10}} = 8,45 \cdot 10^{13} [-]$$

Rayleighovo číslo

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr$$

Rov. 4.1.2

$$Ra_L = (8,45 \cdot 10^{13}) \cdot 0,7158 = 6,05 \cdot 10^{13}$$

Nuseltovo číslo

$$Nu_L = \left\{ \frac{0,825 + 0,387 \cdot Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

Rov. 4.1.3

$$Nu_L = \left\{ \frac{0,825 + 0,387 \cdot (6,05 \cdot 10^{13})^{1/6}}{[1 + (0,492/0,7158)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 = 4226,69 [-]$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = \frac{Nu_L \cdot \lambda}{L}$$

Rov. 4.1.4

$$\alpha_k = \frac{4226,69 \cdot 0,02759}{14,09} = 8,272216 [W/m^2 \cdot K]$$

Ztráty konvekcí

$$Q_k = S \cdot \alpha_k \cdot (T_W - T_\infty)$$

Rov. 4.1.5

$$Q_k = 155,0058 \cdot 8,272216 \cdot (378,5689 - 50) = 421304,86 [W]$$

Záření

$$\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8}; \varepsilon = 0,8$$

σ - Stefan-Boltzmanova konstanta

ε - emisivita

Tepelné ztráty radiací

$$Q_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot (T_W^4 - T_\infty^4)$$

Rov. 4.1.6

$$Q_{rad} = 5,669 \cdot 10^{-8} \cdot 0,8 \cdot 155,0058 \cdot (378,57^4 - 50^4) = 1191746,017 [W]$$

Ze ztrát radiací spočteme součinitel přestupu tepla radiací

$$\alpha_{rad} = \frac{Q_{rad}}{S \cdot (T_W - T_\infty)}$$

Rov. 4.1.7

$$\alpha_{rad} = \frac{1191746,017}{155,0058 \cdot (378,5689 - 50)} = 23,3996 [W/m^2 \cdot K]$$

Součinitel prostupu tepla

$$d_i = d - 2 \cdot \delta$$

$$d_i = 3,3 [m]$$

$$k = \frac{1}{\frac{d}{\lambda} \cdot \ln \frac{d}{d_i} + \frac{1}{\alpha_k + \alpha_{rad}}}$$

Rov. 4.1.8

$$k = \frac{1}{\frac{3,5}{50} \cdot \ln \frac{3,5}{3,3} + \frac{1}{8,272216 + 23,3996}} = 29,7325 [W/m \cdot K]$$

Tepelný tok z tlakové nádoby

$$Q = k \cdot S \cdot (T_1 - T_\infty)$$

Rov. 4.1.9

$$Q = 29,7325 \cdot 155,0058 \cdot (400 - 50) = 1613060,878 [W]$$

Upravená teplota stěny

$$T_W = T_1 - \frac{Q_{reak} \cdot \ln \frac{d_o}{d_i}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda}$$

Rov. 4.1.10

$$T_W = T_1 - \frac{1613060,878 \cdot \ln \frac{3,5}{3,4}}{2 \cdot \pi \cdot 14,09 \cdot 50} = 378,5689 [^\circ C]$$

Výslednou hodnotu dosadíme do předchozích vztahů.

Výsledné hodnoty

$$Q_k = 421304,86 [W]$$

$$Q_{rad} = 1191746,017 [W]$$

$$Q_{celk} = 1613060,878 [W]$$

Hlavní výměníky

Výchozí hodnoty

- Rozměry $S=71,563\text{m}^2$ $d=2,5\text{m}$ $L=9,11\text{m}$ $\delta=0,05\text{m}$ $\lambda = 50 \text{ W/m.K}$
- teploty $T_1=400^\circ\text{C}$ $T_W^* = 380^\circ\text{C}$ $T_W = 388,7178^\circ\text{C}$ $T_\infty=50^\circ\text{C}$

Pro výpočet použijeme stejný postup jako u nádoby reaktoru.

Výsledné hodnoty

$$Q_k = 203586,3978 [W]$$

$$Q_{rad} = 587546,6963 [W]$$

$$Q_{celk} = 791133,0942 [W]$$

Potrubí 1

Výchozí hodnoty

- Rozměry $S=19,634\text{m}^2$ $d=1,25\text{m}$ $L=5\text{m}$ $\delta=0,05\text{m}$ $\lambda = 50 \text{ W/m.K}$
- teploty $T_1=400^\circ\text{C}$ $T_W^* = 380^\circ\text{C}$ $T_W^* = 357,6556^\circ\text{C}$ $T_\infty=50^\circ\text{C}$

Jedná se o horizontální potrubí, proto za charakteristický rozměr uvažujeme vnější průměr potrubí.

Grashofovo číslo

$$Gr_D = \frac{g \cdot \beta \cdot d^3 \cdot (T_W - T_\infty)}{\nu^2}$$

Rov. 4.1.11

$$Gr_D = \frac{9,81 \cdot 0,003095 \cdot 1,25^3 \cdot (357,65 - 50)}{1,82 \cdot 10^{-10}} = 5,52 \cdot 10^{10} [-]$$

Rayleighovo číslo

$$Ra_D = Gr_D \cdot Pr$$

Rov. 4.1.12

Ventilace tlakové obálky reaktoru GFR

$$Ra_D = 5,52 \cdot 10^{10} \cdot 0,7158 = 3,95 \cdot 10^{10}$$

Nuseltovo číslo

$$Nu_D = \left\{ \frac{0,6 + 0,387 \cdot Ra_d^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

Rov. 4.1.13

$$Nu_D = \left\{ \frac{0,6 + 0,387 \cdot (3,95 \cdot 10^{10})^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 = 370,9401 [-]$$

Součinitel přestupu konvekci

$$\alpha_k = \frac{Nu_L \cdot \lambda}{d}$$

Rov. 4.1.14

$$\alpha_k = \frac{370,9401 \cdot 0,003095}{1,25} = 8,1873 [W/m^2 \cdot K]$$

Ztráty konvekci

$$Q_k = \alpha_k \cdot S \cdot (T_W - T_\infty)$$

Rov. 4.1.15

$$Q_k = 370,9401 \cdot 19,634 \cdot (357,64 - 50) = 68118,47 [W]$$

Záření

- $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8}$ $\varepsilon = 0,8$
 σ - Stefan-Boltzmanova konstanta
 ε - emisivita

Tepelné ztráty radiací

$$Q_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot (T_W^4 - T_\infty^4)$$

Rov. 4.1.16

$$Q_{rad} = 5,669 \cdot 10^{-8} \cdot 0,8 \cdot 19,634 \cdot (357,64^4 - 50^4) = 131309,1963 [W]$$

Součinitel přestupu tepla radiací

$$\alpha_{rad} = \frac{Q_{rad}}{S \cdot (T_W - T_{\infty})}$$

Rov. 4.1.17

$$\alpha_{rad} = \frac{131309,1963}{19,634 \cdot (357,64 - 50)} = 21,7370 [W/m^2 \cdot K]$$

Součinitel prostupu tepla

$$d_i = d - 2 \cdot \delta$$

$$d_i = 1,15 [m]$$

$$k = \frac{1}{\frac{d}{\lambda} \cdot \ln \frac{d}{d_i} + \frac{1}{\alpha_k + \alpha_{rad}}}$$

Rov. 4.1.18

$$k = \frac{1}{\frac{3,5}{50} \cdot \ln \frac{1,25}{1,15} + \frac{1}{8,1873 + 23,3996}} = 29,01934 [W/m \cdot K]$$

Tepelný tok z potrubí

$$Q = k \cdot S \cdot (T_1 - T_{\infty})$$

Rov. 4.1.19

$$Q = 29,01934 \cdot 19,634 \cdot (400 - 50) = 199427,6705 [W]$$

Upravená teplota stěny

$$T_W = T_1 - \frac{Q_{reak} \cdot \ln \frac{d}{d_i}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda}$$

Rov. 4.1.20

$$T_W = T_1 - \frac{199427,6705 \cdot \ln \frac{1,25}{1,15}}{2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 50} = 357,5689 [^{\circ}C]$$

Výsledné hodnoty:

$$Q_k = 68118,47 [W]$$

$$Q_{rad} = 131309,1963 [W]$$

$$Q = 199427,7 [W]$$

DHR výměníky

Výchozí hodnoty

- Rozměry $S=24,535\text{m}^2$; $d=2,05\text{m}$; $L=3,78\text{m}$ $\delta=0,05\text{m}$ $\lambda = 50\text{ W/m.K}$
- teploty $T_1=400^\circ\text{C}$ $T_W^* = 380^\circ\text{C}$ $T_W = 388,6296^\circ\text{C}$ $T_\infty=50^\circ\text{C}$

Pro výpočet použijeme stejný postup jako u nádoby reaktoru.

Výsledné hodnoty

$$Q_k = 70247,69881[W]$$

$$Q_{rad} = 199777,8815 [W]$$

$$Q_{celk} = 270025,5803[W]$$

Potrubí 2

Výchozí hodnoty

- Rozměry $S = 41,776\text{m}^2$; $d=2,05\text{m}$ $L = 10,638\text{m}$ $\delta=0,05\text{m}$ $\lambda = 50\text{ W/m.K}$
- teploty $T_1=400^\circ\text{C}$ $T_W^* = 380^\circ\text{C}$ $T_W = 388,4981^\circ\text{C}$ $T_\infty=50^\circ\text{C}$

Pro výpočet použijeme stejný postup jako u nádoby reaktoru.

Výsledné hodnoty

$$Q_k = 118510,9108 [W]$$

$$Q_{rad} = 342504,2001 [W]$$

$$Q_{celk} = 461015,1109 [W]$$

Celková ztráta nezaizolovaného reaktoru

$$Q_{celk} = Q_{reak} + 2 \cdot Q_{vým} + 2 \cdot Q_{potr1} + 3 \cdot Q_{DHR} + 3 \cdot Q_{potr2}$$

$$Q_{celk} = 1613060,878 + 2 \cdot 791133,1 + 2 \cdot 199427,7 + 3 \cdot 270025,6 + 3 \cdot 461015,1$$

$$Q_{celk} = 5787294,481 \text{ W}$$

Tepelné ztráty z povrchu nezaizolovaného reaktoru jsou velmi vysoké, zejména pak ztráty radiací, které představují více než 70% všech ztrát. Tepelný tok radiací je závažným problémem jelikož se přímo přenáší na okolní plochy. Odvedení tohoto tepla konvekcí je nereálné, budeme-li uvažovat výstupní teplotu dusíku 70°C tedy ohřev o 35°C, pak pro dosažení této výstupní teploty by byl nutný hmotnostní průtok:

$$\dot{m} = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta T} = \frac{5787294,481}{1042 \cdot (70 - 35)} = 158,687 \text{ [kg/s]}$$

Rov. 4.1.21

Budeme-li uvažovat pouze ztráty konvekcí při stejném ohřevu dusíku:

$$\dot{m} = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta T} = \frac{1530990,434}{1042 \cdot (70 - 35)} = 41,98 \text{ [kg/s]}$$

Z výše uvedených výpočtů je patrné, pro udržení teploty uvnitř tlakové obálky pod hranicí 70°C by byl nutný vysoký hmotnostní průtok, kterého by bylo nutné dosáhnout nucenou konvekcí o vysoké rychlosti proudění, to by mělo za následek další nárůst konvektivních ztrát.

4.1.2. Předběžný výpočet izolovaná tlaková nádoba

V následující části zkoumáme tepelné ztráty pro plně zaizolovaný povrch, jako izolační materiál uvažujeme minerální vatu, pro další snížení ztrát radiací pokryjeme povrch izolace hliníkovou folií o emisivitě 0,09.

Nádoba reaktoru

Výchozí hodnoty

- Rozměry $S_{iz} = 163,8633455 \text{ m}^2$ $d = 3,5 \text{ m}$ $L = 14,09 \text{ m}$
 $\delta = 0,1 \text{ m}$ $\delta_{iz} = 0,1 \text{ m}$ $\lambda = 50 \text{ W/m.K}$ $\lambda_{iz} = 0,04 \text{ W/m.K}$
- teploty $T_1 = 400^\circ\text{C}$ $T_w^* = 80^\circ\text{C}$ $T_w = 77,0338^\circ\text{C}$ $T_\infty = 50^\circ\text{C}$

Pro stanovení součinitele přestupu tepla konvekcí a radiací, použijeme stejné vztahy jako u nezaizolované verze.

Ventilace tlakové obálky reaktoru GFR

Při stanovení součinitele prostupu tepla připočteme izolaci:

$$d_i = d - 2 \cdot \delta$$

$$d_i = 3,3 \text{ [m]}$$

$$d_o = d + 2 \cdot \delta_{iz}$$

$$d_o = 3,7 \text{ [m]}$$

$$k = \frac{1}{\frac{d_o}{\lambda} \cdot \ln \frac{d}{d_i} + \frac{d_o}{\lambda_{iz}} \cdot \ln \frac{d_o}{d} + \frac{1}{\alpha_k + \alpha_{rad}}}$$

Rov. 4.1.22

$$k = \frac{1}{\frac{3,7}{50} \cdot \ln \frac{3,5}{3,3} + \frac{3,7}{0,04} \cdot \ln \frac{3,7}{3,5} + \frac{1}{3,68 + 0,7837}} = 0,378 \text{ [W/m} \cdot \text{K]}$$

Výsledné hodnoty

$$Q_k = 16910,11027 \text{ [W]}$$

$$Q_{rad} = 3600,257244 \text{ [W]}$$

$$Q_{celk} = 20510,36751 \text{ [W]}$$

Hlavní výměníky

Výchozí hodnoty

- Rozměry $S_{iz} = 77,289 \text{ m}^2$ $d = 2,5 \text{ m}$ $L = 9,11 \text{ m}$
 $\delta = 0,05 \text{ m}$ $\delta_{iz} = 0,1 \text{ m}$ $\lambda = 50 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ $\lambda = 0,04 \text{ W/m} \cdot \text{K}$
- Teploty $T_1 = 400^\circ \text{C}$ $T_W^* = 80^\circ \text{C}$ $T_W = 77,6989^\circ \text{C}$ $T_\infty = 50^\circ \text{C}$

Pro výpočet použijeme stejný postup jako u nádoby reaktoru.

Výsledné hodnoty

$$Q_k = 7910,965 \text{ [W]}$$

$$Q_{rad} = 1675,269 \text{ [W]}$$

$$Q_{celk} = 9586,233 \text{ [W]}$$

Potrubí 1

Výchozí hodnoty

- Rozměry $S=22,7766 \text{ m}^2$ $d=1,25 \text{ m}$ $L=5 \text{ m}$
 $\delta=0,05\text{m}$ $\delta_{iz}=0,1 \text{ m}$ $\lambda = 50 \text{ W/m.K}$ $\lambda = 0,04 \text{ W/m.K}$
- Teploty $T_1=400^\circ\text{C}$ $T_W^*=80^\circ\text{C}$ $T_W=90,2554^\circ\text{C}$ $T_\infty=50^\circ\text{C}$

Použijeme stejný postup jako nezaizolovaného potrubí, při stanovení součinitele prostupu tepla připočteme izolaci viz výpočet izolované tlakové nádoby.

Výsledné hodnoty

$$Q_k = 1861,684935 [W]$$

$$Q_{rad} = 759,6707951 [W]$$

$$Q_{celk} = 2621,356 [W]$$

Výměník DHR

Výchozí hodnoty

- Rozměry $S=26,722 \text{ m}^2$ $d=2,05 \text{ m}$ $L=3,78 \text{ m}$
 $\delta=0,05\text{m}$ $\delta_{iz}=0,1 \text{ m}$ $\lambda = 50 \text{ W/m.K}$ $\lambda = 0,04 \text{ W/m.K}$
- teploty $T_1=400^\circ\text{C}$ $T_W^*=80^\circ\text{C}$ $T_W=77,1807^\circ\text{C}$ $T_\infty=50^\circ\text{C}$

Výsledné hodnoty

$$Q_k = 2726,379 [W]$$

$$Q_{rad} = 567,034 [W]$$

$$Q_{celk} = 3293,413 [W]$$

Potrubí 2

Výchozí hodnoty

- Rozměry $S=48,460 \text{ m}^2$ $d=1,25 \text{ m}$ $L=10,63 \text{ m}$
 $\delta=0,05\text{m}$ $\delta_{iz}=0,1 \text{ m}$ $\lambda = 50 \text{ W/m.K}$ $\lambda = 0,04 \text{ W/m.K}$
- teploty $T_1=400^\circ\text{C}$ $T_W^*=80^\circ\text{C}$ $T_W=76,9756^\circ\text{C}$ $T_\infty=50^\circ\text{C}$

Výsledné hodnoty

$$Q_k = 4795,111 [W]$$

$$Q_{rad} = 1019,594 [W]$$

$$Q_{celk} = 5814,705 [W]$$

Celková ztráta nezaizolovaného reaktoru

$$Q_{celk} = Q_{reak} + 2 \cdot Q_{vým} + 2 \cdot Q_{potr1} + 3 \cdot Q_{DHR} + 3 \cdot Q_{potr2}$$

$$Q_{celk} = 20510,368 + 2 \cdot 9586,233 + 2 \cdot 2621,356 + 3 \cdot 3293,413 + 3 \cdot 5814,705$$

$$Q_{celk} = 72249,899 [W]$$

Při plném zaizolování došlo k výraznému poklesu ztrát. Nyní spočteme množství dusíku potřebné pro odvod tepla:

$$\dot{m} = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta T} = \frac{72249,899}{1042 \cdot (70 - 35)} = 1,981077572 [kg/s]$$

Rov. 4.1.23

4.1.3. Shrnutí

Chlazení tlakové obálky na 70°C je u nezaizolovaného reaktoru technicky neproveditelné a to i za předpokladu, že bychom tepelné ztráty radiací odváděly jiným způsobem (skrže chlazení okolních stěn řešeno v kapitole 5.). U plně izolovaného reaktoru je chlazení skrže přirozenou konvekci proveditelné, nicméně musíme brát v úvahu proveditelnost izolace všech povrchů.

4.2. Tepelné ztráty částečně zaizolovaného reaktoru

Pokrytí izolací

Při návrhu izolace byly zohledněny tři hlavní kritéria

- Pokrytí izolací co největší plochu
- umožnit snadný přístup k přírubám a dalšímu zařízení
- zachovat průtočný průřez v kritických částech

Řídící tyče jsou u koncepce GFR umístěny ve spodu tlakové nádoby, proto nebylo možné tuto část zaizolovat. Navazující válcová část je umístěna ve velmi úzké šachtě, instalace izolace by zde byla velmi komplikovaná a tloušťka izolace by výrazně ovlivnila průtočný kanál.

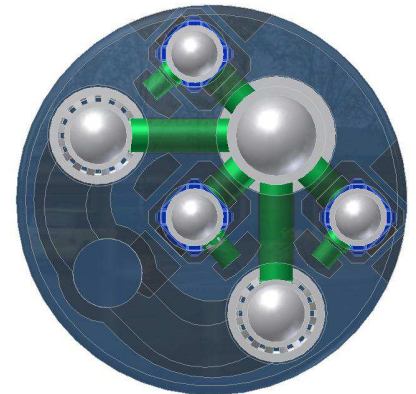
V horní části jednotlivých těles jsou umístěny manipulační otvory a u výměníků i potrubí pro médium sekundárního okruhu, proto nebylo tuto část možné zaizolovat.



obr 6 částečná izolace

Betonové struktury

Většina vnitřního prostoru tlakové obálky je vyplněna betonovou strukturou, kde jsou tělesa výměníků a těleso reaktoru uložena v šesti vertikálních šachtách. V mezikruží mezi tělesy a betonovou strukturou proudí chladící médium. Uložení jednotlivých komponent v oddělených šachtách nám umožňuje řešit chlazení jednotlivých těles odděleně.

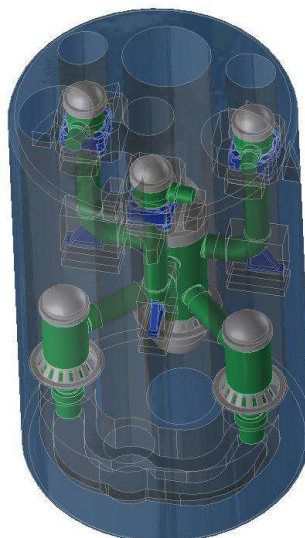


obr 7 částečná izolace uložení

Výpočet ztrát

Při výpočtu tepelných ztrát uvažujeme nucenou konvekci, u které si zvolíme rychlost proudění, z rychlosti proudění a průtočného průřezu stanovíme hmotnostní tok chladicího média. Jednotlivá řešená tělesa si rozdělíme na několik vrstev, tento přístup nám umožní průběžně aktualizovat teplotu chladicího média a aplikovat do výpočtu rozdílné rychlosti proudění v závislosti na změnách průtočného průřezu a hustoty.

Pro jednotlivé vrstvy stanovíme ztrátu konvekci na stěně a ztrátu radiací. Na závěr spočteme výslednou teplo tu chladicího média, postup zopakujeme v následující vrstvě.



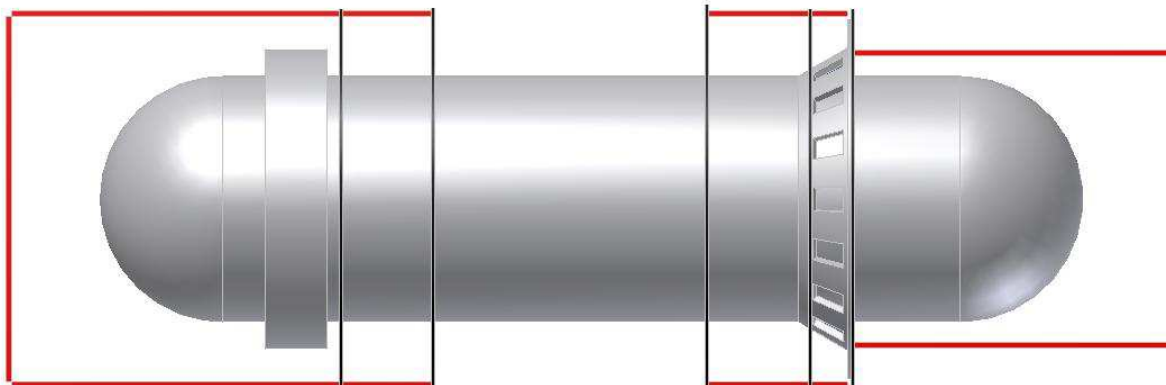
obr 8 částečná izolace uložení 2

4.2.1. Ztráty tlaková nádoba

Tlaková nádoba je rozdělena na části, základní rozdělení je na izolované a neizolované části dále pak budeme řešit samostatně opěrný prstavec a úseky na kterých jsou připojena potrubí.

U nezaizolovaných částí se zaměříme zejména na stanovení množství tepla přenášeného na okolní povrchy, okolní stěny jsou pokryty chladicími deskami (viz kapitola 5), ze kterých je teplo odváděno vodou protékající v kanálech uvnitř desky, část tepla je odváděno z povrchu desky konvekcí.

U zaizolovaných ploch jsou ztráty radiací řádově o polovinu nižší než ztráty konvekcí proto předpokládáme, že toto teplo bude odvedeno konvekcí z protější stěny.



obr 9 rozdělení tlakové nádoby na části

4.2.1.1. Dno + neizolovaný válec 1

Volím rychlost proudění 0,3 m/s, vstupní teplota dusíku 35°C Konvekci budeme řešit pro ekvivalentní válec.

Výchozí hodnoty

- Rozměry tlak nádoba
 Dno $S = 19,242 \text{ m}^2$ $d = 3,5 \text{ m}$
 Válec $S = 16,603 \text{ m}^2$ $d = 3,5 \text{ m}$ $l = 1,5 \text{ m}$
 Ekvivalentní válec $S = 35,846 \text{ m}^2$ $d = 3,5 \text{ m}$ $l_1 = 3,26 \text{ m}$
 $\delta = 0,1 \text{ m}$ $\lambda = 50 \text{ W/m.K}$ $\varepsilon = 0,8$
 Teploty $T_1 = 400^\circ\text{C}$ $T_w^* = 380^\circ\text{C}$ $T_w = 391,92^\circ\text{C}$
- Vlastnosti dusíku $T_\infty = 35^\circ\text{C}$ $Pr = 0,71574$ - $\nu = 1,673 \cdot 10^{-5}$ $\lambda = 0,0266$
 $c_p = 1041,4 \text{ J/kg}\cdot\text{k}$ $\rho = 1,0952 \text{ kg/m}^3$
- Okolní povrchy $\varepsilon = 0,18$
 Chladicí plocha dno $S = 13,074 \text{ m}^2$ $T_{\text{dno}} = 32,43^\circ\text{C}$
 Chladicí plocha 2.1 $S = 19,355 \text{ m}^2$ $D = 4,08 \text{ m}$ $L = 1,5 \text{ m}$ $T_{2,1} = 37,68^\circ\text{C}$
 Chladicí plocha 2.2 $S = 19,355 \text{ m}^2$ $D = 4,08 \text{ m}$ $L = 1,5 \text{ m}$ $T_{2,2} = 45,78^\circ\text{C}$
 Chladicí plocha 2.3 $S = 19,355 \text{ m}^2$ $D = 4,08 \text{ m}$ $L = 1,5 \text{ m}$ $T_{2,3} = 52,234^\circ\text{C}$
 Opora 1.4 $S = 6,8719 \text{ m}^2$ $\varepsilon = 0,8$ $T_{1,4} = 345,051^\circ\text{C}$

Ztráty konvekci

Hydraulický průměr

$$dh = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{\pi(D + d)}$$

Rov. 4.2.1

$$dh = \frac{\pi(4,08^2 - 3,5^2)}{\pi(4,08 + 3,5)} = 0,58 \text{ [m]}$$

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{dh \cdot u}{\nu}$$

Rov. 4.2.2

$$Re = \frac{0,58 \cdot 0,3}{1,673 \cdot 10^{-5}} = 10397,99211 \text{ [-]}$$

Nusseltovo číslo

Vzhledem ke konfiguraci můžeme použít vztahy pro proudění v kruhové trubce.

$$Nu_{fd} = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

Rov. 4.2.3

$$Nu_{fd} = 0,023 \cdot 10397,99211^{0,8} \cdot 0,71574^{0,4} = 32,8995 [-]$$

Výše uvedený vztah platí pro plně vyvinuté proudění

$$l/d \geq 10$$

$$3,26/3,5 \not\geq 10$$

Náš případ nesplňuje podmínku pro plně vyvinuté proudění, proto použijeme korekční přepočít pro vstupní úsek potrubí.

Délka vstupního úseku

Abychom mohli výsledek vztáhnout na celý počítaný úsek, uvažujeme polovinu délky počítaného úseku.

$$x = \frac{l_1}{2}$$

$$x = \frac{3,26}{2} = 1,63 \text{ m}$$

Lokální Nusseltovo číslo

$$Nu = Nu_{fd} \cdot \left(1 + \left(\frac{x}{dh} \right)^{\frac{2}{3}} \right)$$

Rov. 4.2.4

$$Nu = 32,8995 \cdot \left(1 + \left(\frac{1,63}{0,58} \right)^{\frac{2}{3}} \right) = 49,42 [-]$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda}{dh}$$

Rov. 4.2.5

$$\alpha_k = \frac{49,42 \cdot 0,0266}{0,58} = 2,266 [W/m^2 \cdot K]$$

Ztráty konvekcí

$$Q_k = \alpha_k \cdot S \cdot (T_w - T_\infty)$$

Rov. 4.2.6

$$Q_k = 2,266 \cdot 35,846 \cdot (391,9989 - 35) = 28998,0914 [W]$$

Konvekce z povrchu chladících desek

Část tepla přivedeného radiací je z povrchu chladících desek odváděna proudem dusíku.

$$Q_{k\ dno} = 2,266 \cdot 13,074 \cdot (32,171 - 35) = -76,171 [W]$$

$$Q_{k\ 2.1} = 2,266 \cdot 19,2265 \cdot (37,679 - 35) = 116,74 [W]$$

$$Q_{k\ 2.2} = 2,266 \cdot 19,2265 \cdot (45,78 - 35) = 469,75 [W]$$

$$Q_{k\ 2.3} = 2,266 \cdot 19,2265 \cdot (52,23 - 35) = 756,02 [W]$$

Ztráty radiací

Pro stanovení ztrát radiací je nutné určit úhlové součinitele udávající podíl vyzařovaného tepla dopadající na danou plochu.

Značení ploch:

- 1.x značí plochy reaktoru
- 2.y značí plochy okolních povrchů

Kulový vrchlík

Kulový vrchlík (povrch 1.1) vyzařuje na tři povrchy, součet všech úhlových součinitelů je 1

- Dno
- Chladící povrch 2.1
- Chladící povrch 2.2

Vyzařování na válcový povrch 2.2

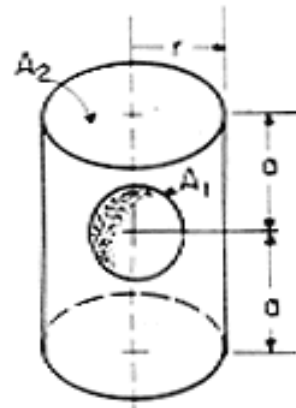
Pro výpočet úhlového faktoru potřebujeme znát poloměr válce r a vzdálenost konce válce od středu $a = L$

$$a = 2 \cdot L$$

$$R = r/a$$

$$R = \frac{2,04}{1,5} = 1,36$$

$$F_{1.1-2.2} = \frac{1}{\sqrt{1+R}}$$



obr 10 úhlový součinitel koule-válec [10]

Rov. 4.2.7

$$F_{1.1-2.2} = \frac{1}{\sqrt{1+1,36}} = 0,5923$$

Vyzařování na válcový povrch 2.1

Plocha 2.1 navazuje ze spodu na plochu 2.2, úhlový součinitel pro tuto plochu spočteme tak že budeme počítat součinitel pro obě plochy, od kterého odečteme součinitel pro plochu 2.1

$$a = 2 \cdot L$$

$$a = 2 \cdot 1,5 = 3 [m]$$

$$R = r/a$$

$$R = \frac{2,04}{3} = 0,68$$

$$F_{1.1-(2.2+2.1)} = \frac{1}{\sqrt{1+R}}$$

Rov. 4.2.8

$$F_{1.1-(2.2+2.1)} = \frac{1}{\sqrt{1+0,68}} = 0,8653$$

$$F_{1.1-2.1} = F_{1.1-(2.2+2.1)} - F_{2.2}$$

$$F_{1.1-2.1} = 0,8653 - 0,5923$$

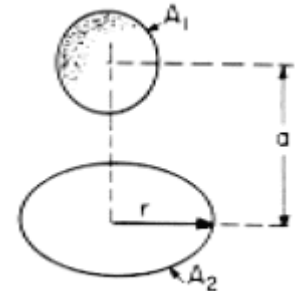
Vyzařování na dno

Dno je ve vzdálenosti

$$R = r/a$$

$$R = \frac{2,04}{3} = 0,68$$

$$F_{1.1-dno} = \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{1}{1+R}} \right]$$



obr 11 úhlový součinitel koule-deska [10]

Rov. 4.2.9

$$F_{1.1-dno} = \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{1}{1+0,68}} \right] = 0,0865$$

Součet úhlových součinitelů se musí rovnat 1, použité vztahy platí pro kouli, v našem případě je dno pouze polokoule v důsledku toho chybí do součtu 1 úhlový faktor pro horní víko.

Proto zavedeme korekci, součet součinitelů $F_{1.1-2.2}$, $F_{1.1-2.1}$, $F_{1.1-dno}$ považujeme za 100% a z něj spočteme podíl jednotlivých součinitelů.

$$\dot{F}_{1.1-2.2} = \frac{F_{1.1-2.2}}{F_{1.1-dno} + F_{1.1-2.1} + F_{1.1-2.2}}$$

Rov. 4.2.10

Upravené úhlové součinitele:

$$\dot{F}_{1.1-2.2} = 0,6485$$

$$\dot{F}_{1.1-2.1} = 0,2568$$

$$\dot{F}_{1.1-dno} = 0,0947$$

Nyní, když známe úhlové součinitele, můžeme stanovit množství vyzařovaného tepla.

Záření vrchlík 1.1 - dno

$$Q_{1.1-dno} = \frac{\sigma \cdot (T_{w1}^4 - T_{w dno}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot S_1} + \frac{1}{S_1 \cdot F_{1.1-dno}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \cdot S_2}}$$

Rov. 4.2.11

$$Q_{1.1-dno} = \frac{5,669 \cdot 10^{-8} \cdot (665,07^4 - 305,58^4)}{\frac{1 - 0,8}{0,8 \cdot 19,242} + \frac{1}{19,242 \cdot 0,0947} + \frac{1 - 0,18}{0,18 \cdot 13,074}} = 11647,3336 [W]$$

Záření vrchlík 1.1 - chladící povrch 2.1

$$Q_{1.1-2.1} = 23354,78 [W]$$

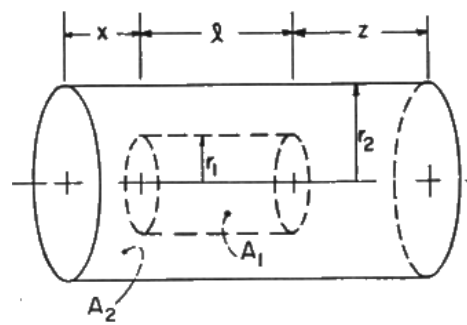
Záření vrchlík 1.1 - chladící povrch 2.2

$$Q_{1.1-2.2} = 31832,55 [W]$$

Válcová část 1.2

Neizolovaný válec 1 vyzařuje na tři povrchy:

- Válcový povrch 2.1
- Válcový povrch 2.2
- Válcový povrch 2.3
- Opora 1.4



Pro určení úhlových faktorů použijeme online **obr 12 úhlový součinitel válec-válec [10]** kalkulátor [2.]

Vztahy pro výpočet:

$$X = \frac{x}{r_2} \quad Z = \frac{z}{r_2} \quad L = \frac{l}{r_2} \quad R = \frac{r_1}{r_2}$$

$$A_\xi = \xi^2 + R^2 - 1 \quad B_\xi = \xi^2 - R^2 + 1$$

$$-\frac{\pi}{2} \leq \sin^{-1} \xi \leq \frac{\pi}{2} \quad 0 \leq \cos^{-1} \xi \leq \pi$$

$$F_{\xi} = \frac{B_{\xi}}{8 \cdot R \cdot \xi} + \frac{1}{2 \cdot \pi} \left\{ \cos^{-1} \frac{A_{\xi}}{B_{\xi}} - \frac{1}{2 \cdot \xi} \left[\frac{(A_{\xi} + 2)^2}{R^2} - 4 \right]^{1/2} \cos^{-1} \frac{A_{\xi} \cdot R}{B_{\xi}} - \frac{A_{\xi}}{2 \xi R} \sin^{-1} R \right\}$$

$$F_{1.2} = 1 + \frac{X}{L} \cdot F_x + \frac{Z}{L} \cdot F_z - \left(\frac{L+X}{L} \right) \cdot F_{L+X} - \left(\frac{L+Z}{L} \right) \cdot F_{L+Z}$$

Rov. 4.2.12

Nejprve spočteme úhlový faktor pro válcový povrch 2.3, tento povrch má stejnou délku jako válcová část a leží naproti ní. Za x a z dosadíme 0, $l = 1,5\text{m}$.

$$F_{1.1-2.3} = 0,845716021$$

Část tepla vyzařovaného z povrchu 1.2 dopadá na opěrný kruh 1.4, předpokládáme, že veškeré teplo vyzařované směrem vzhůru dopadá na povrch opěrného kruhu.

$$F_{1.1-1.4} = 0,077141989$$

Část tepla dopadá na nižší patra chladících desek, hodnotu úhlového součinitele pro desku 2.2 stanovíme tak, že spočteme úhlový faktor pro plochu (2.3+2.4), $l=1,5\text{ m}$ $x=0\text{m}$ $z=1,5\text{m}$ od výsledku odečteme faktor $F_{1.2-2.3}$

$$F_{1.1-2.2} = 0,075607662$$

Předpokládáme, že zbývající teplo dopadá na desku 2.1

$$F_{1.1-2.1} = 0,001230004$$

Záření válec 1.2 - chladící povrch 2.3

$$Q_{1.2-2.3} = \frac{\sigma \cdot (T_{w1}^4 - T_{w2.3}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot S_1} + \frac{1}{S_1 \cdot F_{1.2-2.3}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \cdot S_2}}$$

Rov. 4.2.13

$$Q_{1.2-2.3} = \frac{5,669 \cdot 10^{-8} \cdot (665,07^4 - 325,38^4)}{\frac{1 - 0,8}{0,8 \cdot 16,6033} + \frac{1}{16,6033 \cdot 0,8457} + \frac{1 - 0,18}{0,18 \cdot 19,2265}} = 32514,077 [W]$$

Záření válec 1.2 - opěrný kruh 1.4

$$Q_{1.2-1.4} = 1931,86 [W]$$

Záření válec 1.2 - chladící povrch 2.2

$$Q_{1.2-2.2} = 10020,002 [W]$$

Záření válec 1.2 - chladící povrch 2.1

$$Q_{1.2-2.1} = 214,64 [W]$$

Celková ztráta radiací

$$Q_{rad} = Q_{1.1-dno} + Q_{1.1-2.1} + Q_{1.1-2.2} + Q_{1.2-2.1} + Q_{1.2-2.2} + Q_{1.2-2.3} + Q_{1.2-1.4}$$

Rov. 4.2.14

$$Q_{rad} = 11647,3 + 23354,78 + 31832,55 + 214,64 + 10020,02 + 32514,017 + 1931,86$$

$$Q_{rad} = 111515,187 [W]$$

Vedení tepla stěnou nádoby

Nejprve zjistíme množství tepla odváděného z povrchu tlakové nádoby

$$Q_{celk} = Q_k + Q_{rad}$$

Rov. 4.2.15

$$Q_{celk} = 29003,92041 + 110260,5244 = 139264,4446 [W]$$

Poté spočteme tepelný odpor stěny nádoby

$$R_{ved} = \frac{\ln \frac{d}{d_i}}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \lambda} \qquad R_{ved} = \frac{\ln \frac{3,5}{3,3}}{2 \cdot \pi \cdot 3,26 \cdot \lambda} = 5,7452 \cdot 10^{-5} [K/W]$$

Rov. 4.2.16

Stanovíme teplo přenášené vedením

$$Q_{ved} = \frac{T_1 - T_w}{R_{ved}} \qquad Q_{ved} = \frac{400 - 391,9989}{5,7452 \cdot 10^{-5}} = 139264,4884 [W]$$

Rov. 4.2.17

Teplo přenášení vedením se musí rovnat teplu odvedenému, v případě že se liší, změníme teplotu T_w a výpočet zopakujeme. Výsledná hodnota byla nalezena s použitím nástroje MS Excel „hledání řešení“.

$$Q_{celk} = Q_{ved}$$

Stanovení výstupní teploty dusíku

Posledním krokem je stanovení výstupní teploty dusíku, nejprve stanovíme teplo odváděné konvekcí.

$$Q_{k cel} = Q_k + Q_{k dno} + Q_{2.1} + Q_{2.2} + Q_{2.3}$$

Rov. 4.2.18

$$Q_{k cel} = 28998,09 - 76,17 + 116,74 + 469,75 + 756,027 = 30264,44 [W]$$

Průtočný průřez

$$S_{prût} = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} \qquad S_{prût} = \frac{\pi \cdot (4,08^2 - 3,5^2)}{4} = 3,4592449 [m^2]$$

Rov. 4.2.19

Ze zvolené rychlosti proudění a průtočného průřezu spočteme hmotnostní průtok dusíku.

$$\dot{m} = S_{prût} \cdot \rho \cdot u$$

Rov. 4.2.20

$$\dot{m} = 3,4592449 \cdot 1,0952 \cdot 0,3 = 1,134493 [kg/s]$$

Výstupní teplota dusíku

$$T_{out} = T_{in} + \frac{Q_{k cel}}{m \cdot cp}$$

Rov. 4.2.21

$$T_{out} = 35 + \frac{30264,44}{1,134493 \cdot 1041,4} = 60,61 [^{\circ}C]$$

4.2.1.2. Válcová část 1.3

Výchozí hodnoty

- Rozměry tlak nádoba
Válec $S = 6,59 \text{ m}^2$ $d = 3,5 \text{ m}$ $l_2 = 0,6 \text{ m}$
 $\delta = 0,1 \text{ m}$ $\lambda = 50 \text{ W/m.K}$ $\varepsilon = 0,8$
- Teploty $T_1 = 400^\circ\text{C}$ $T_w^* = 380^\circ\text{C}$ $T_w = 397,17^\circ\text{C}$
- Vlastnosti dusíku $T_\infty = 60,61^\circ\text{C}$ $Pr = 0,715856$ - $\nu = 1,9602 \cdot 10^{-5}$ $\lambda = 0,028486$
 $c_p = 1042 \text{ J/kg}\cdot\text{k}$ $\rho = 1,0952 \text{ kg/m}^3$
- Okolní povrchy $\varepsilon = 0,18$
Chladicí plocha 2.2 $S = 19,355 \text{ m}^2$ $D = 4,08 \text{ m}$ $l = 1,5 \text{ m}$ $T_{2,2} = 45,075^\circ\text{C}$
Chladicí plocha 2.3 $S = 19,355 \text{ m}^2$ $D = 4,08 \text{ m}$ $l = 1,5 \text{ m}$ $T_{2,3} = 52,23^\circ\text{C}$
Opora 1.4 $S = 6,8719 \text{ m}^2$ $T_{1,4} = 345,051^\circ\text{C}$ $\varepsilon = 0,8$

Nejprve stanovíme rychlost proudění, průtočný průřez a hmotnostní tok je stejný jako v předchozí části.

$$S_{prût} = 3,4592449 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\dot{m} = 1,134493 \text{ [kg/s]}$$

Rychlost proudění

$$u = \frac{\dot{m}}{S \cdot \rho} \quad u = \frac{1,134493}{3,4592449 \cdot 1,0952} = 0,32603 \text{ [m/s]}$$

Rov. 4.2.21

Výpočet ztrát konvekcí

$$dh = 0,58 \text{ [m]}$$

$$Re_d = \frac{0,58 \cdot 0,32}{1,9602 \cdot 10^{-5}} = 9646,6455 \text{ [-]}$$

Reynoldsovo číslo je nižší než 10.000, pro výpočet Nusseltova čísla použijeme vztah:

Součinitel tření

$$f = (0,79 \cdot \ln Re_D - 1,64)^{-2}$$

Rov. 4.2.22

$$f = (0,79 \cdot \ln 9646,6455 - 1,64)^{-2} = 0,03179969$$

Nusseltovo číslo

$$Nu_{fd} = \frac{\frac{f}{8} \cdot (Re_d - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} \cdot (Pr^{2/3} - 1)}$$

Rov. 4.2.23

$$Nu_{fd} = \frac{\frac{0,03179969}{8} \cdot (9646,6455 - 1000) \cdot 0,715856}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{0,03179969}{8}\right)^{1/2} \cdot (0,715856^{2/3} - 1)} = 29,28886 [-]$$

Délka vstupního úseku

Stejně jako u předchozí části se nacházíme ve vstupním úseku, proto provedeme přepočítání Nusseltova čísla. Část 2 má stejný průtočný průřez jako část 1, proto při stanovení délky průtočného průřezu přičteme délku předchozího úseku.

$$x = l_1 + \frac{l_2}{2}$$

$$x = 3,26 + \frac{0,6}{2} = 3,56 [m]$$

Lokální Nusseltovo číslo

Stanovíme podle vztahu [4.2.4]

$$Nu = 38,0257 [-]$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

Stanovíme podle vztahu [4.2.5]

$$\alpha_k = 1,8676 [W/m^2 \cdot K]$$

Ztráty konvekcí

$$Q_k = 4146,82 [W]$$

Ventilace tlakové obálky reaktoru GFR

U této části neřešíme konvekci z okolních stěn, neboť teplo přenášené radiací dopadá na chladicí plochy 2.2 a 2.3, které jsou řešeny v předchozí části a na oporu, která bude řešena v části následující.

Ztráty radiací

Válcová část primárně vyzařuje na oporu, zbývající energie je vyzařována na chladicí desky 2.2 a 2.3. Pro stanovení úhlových faktorů využijeme stejný postup jako u válcové části 1.2 přičemž předpokládáme, že teplo vyzařované vzhůru a na protější stěnu dopadá na opěrný kruh. Použité vztahy: [4.2.12]

Záření válec 1.3 - opěrný kruh 1.4

$$F_{1.3-1.4} = 0,825961$$

$$Q_{1.3-1.4} = 4650,6 [W]$$

Záření válec 1.3 - chladicí plocha 2.3

$$F_{1.3-2.3} = 0,171989$$

$$Q_{1.3-2.3} = 9364,9 [W]$$

Záření válec 1.3 - chladicí plocha

$$F_{1.3-2.3} = 0,00205$$

$$Q_{1.3-2.3} = 146,32 [W]$$

Vedení tepla stěnou nádoby

Stejně jako v předchozím případě měníme teplotu T_w tak aby se teplo přenášené vedení rovnalo součtu tepel odváděných z povrchu.

$$Q_{ved} = Q_k + Q_{1.4} + Q_{2.3} + Q_{2.2}$$

Rov. 4.2.24

$$Q_{ved} = 18308,66 [W]$$

Výstupní teplota dusíku

Při stanovení výstupní teploty postupujeme jako u předchozího úseku. [4.2.21]

$$T_{out} = 64,124[^\circ C]$$

4.2.1.3. Opora 1.4

Opěrný kruh je posazen na betonové struktuře a nese celou hmotnost tlakové nádoby, z hlediska tepelného výpočtu považujeme opěrný kruh za žebro s izolovaným koncem. Opora se skládá z šestnácti žebér, na které je navařen opěrný prstenec. Pro zjednodušení výpočtu nahradíme prstenec prodloužením žebér tak abychom zachovali celkový povrch.

Výchozí hodnoty

- Rozměry
 Válec $S = 0,39076 \text{ m}^2$ $d = 3,5 \text{ m}$ $l_4 = 0,1 \text{ m}$
 $\delta = 0,1 \text{ m}$ $\lambda = 50 \text{ W/m.K}$ $\varepsilon = 0,8$
 Žebra $n_z = 16$ $l_z = 1,175 \text{ m}$ $s = 0,443 \text{ m}$ $t = 0,1 \text{ m}$ $h = 0,7 \text{ m}$
 $\lambda = 50 \text{ W/m.K}$ $\varepsilon = 0,8$
- Teploty $T_1 = 400^\circ\text{C}$ $T_w^* = 380^\circ\text{C}$ $T_w = 345,051^\circ\text{C}$
- Okolní povrchy
 Chladící plocha 2.4 $S = 32,6726 \text{ m}^2$ $D = 5,2 \text{ m}$ $L = 2 \text{ m}$ $\varepsilon = 0,18$ $T_{2,4} = 47,015^\circ\text{C}$
 Izolovaný válec 1.6 $S = 23,2477 \text{ m}^2$ $d = 3,7 \text{ m}$ $l = 2 \text{ m}$ $\varepsilon = 0,09$ $T_{2,4} = 187,1^\circ\text{C}$

Průtok dusíku

Vertikální šachta se v místě opory rozšiřuje z průměru 4,08m na 5,2m. to má za následek výrazné zvýšení průtočného průřezu.

$$S_{průt1} = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} \qquad S_{průt} = \frac{\pi \cdot (5,2^2 - 3,5^2)}{4} = 11,616 \text{ [m}^2\text{]}$$

Rov. 4.2.25

Pro zachování rychlosti proudění přivádíme další dusík. Množství přivedeného dusíku volíme: $\dot{m} = 2,32255 \text{ [kg/s]}$, teplota přiváděného dusíku: 35°C

Poznámka:

Rozdělení přívodu dusíku na dva proudy bylo zvoleno, abychom snížily ztráty konvekci v úvodní úzké šachtě, při plném průtoku by zde rychlost proudění dosahovala 0,99 m/s což by mělo za následek téměř trojnásobné navýšení ztrát konvekci.

Celkový hmotnostní průtok:

$$m_{celk} = \dot{m} + \dot{m}_{přiv} \qquad m_{celk} = 1,134493 + 2,32255 = 3,457043 \text{ [kg/s]}$$

Rov. 4.2.26

Teplota dusíku:

$$T = \frac{T_{přiv} \cdot \dot{m} + T_{přiv} \cdot \dot{m}_{přiv}}{m_{celk}} \quad T = \frac{64,124 \cdot 1,134493 + 35 \cdot 2,32255}{3,457043} = 44,557 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Rov. 4.2.27

Nyní můžeme v tabulkách vyhledat vlastnosti dusíku:

- Vlastnosti dusíku $T_\infty = 44,557^\circ\text{C}$ $Pr = 0,71578$ - $\nu = 1,7698 \cdot 10^{-5}$
 $\lambda = 0,02726 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ $c_p = 1041,8 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$ $\rho = 1,0604 \text{ kg/m}^3$

Rychlost proudění:

$$u = \frac{m}{S \cdot \rho} \quad u = \frac{3,457043}{11,616 \cdot 1,0604} = 0,28066 \text{ [m/s]}$$

Rov. 4.2.28

Hydraulický průřez

$$dh = 1,7 \text{ [m]}$$

Reynoldsovo číslo

$$Re = 26934,17 \text{ [-]}$$

Nusseltovo číslo

Pro výpočet využijeme vztah[4.2.3]

$$Nu_{fd} = 65,468 \text{ [-]}$$

Délka vstupního úseku

V místě opěry se mění průtočný průřez a směřují se zde dva proudy, proudění se tedy bude znovu vyvíjet od tohoto bodu. Délka vstupního úseku je ½ výšky žebrované plochy.

$$x = 0,35 \text{ [m]}$$

Lokální Nusseltovo číslo

Dle vztahu [4.2.4]

$$Nu_{fd} = 253,233 \text{ [-]}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 4,06356 [W/m^2 \cdot K]$$

Výpočet žebrované plochy:

Ztráty konvekcí z válcové základny

$$S_{zákl} = (\pi \cdot d - n_z \cdot s) \cdot l_4$$

Rov. 4.2.29

$$S_{zákl} = (\pi \cdot 3,5 - 16 \cdot 0,443) \cdot 0,1 = 0,39076 [m^2]$$

$$Q_{k\ zákl} = 477,15 [W]$$

Ztráty konvekcí z povrchu žebra

Obvod žebra

$$P = 2 \cdot h + 2 \cdot t \qquad P = 2 \cdot 0,443 + 2 \cdot 0,1 = 1,086 [m]$$

Rov. 4.2.30

Průřez žebra

$$A = h \cdot t \qquad A = 0,443 \cdot 0,1 = 0,0443 [m^2]$$

Rov. 4.2.31

Parametr žebra

$$m = \sqrt{\frac{\alpha_k \cdot P}{\lambda \cdot A}} \qquad m = \sqrt{\frac{4,06356 \cdot 1,086}{50 \cdot 0,0443}} = 1,4115 [m^{-1}]$$

Rov. 4.2.32

Odpor žebra

$$R_z = \frac{1}{\lambda \cdot A \cdot m \cdot \tanh(m \cdot l)}$$

Rov. 4.2.33

$$R_z = \frac{1}{50 \cdot 0,0443 \cdot 1,4115 \cdot \tanh(1,4115 \cdot 1,175)} = 0,343918 [K/W]$$

Odpor n žeber

$$R_{n\dot{z}} = \frac{n_{\dot{z}}}{R_{\dot{z}}} \quad R_{n\dot{z}} = \frac{16}{0,343918} = 0,021495 [K/W]$$

Rov. 4.2.34

Ztráty konvekcí z žeber

$$Q_{k\ z\acute{a}k} = 13980,077 [W]$$

Celkové ztráty konvekcí

$$Q_{k\ z\acute{a}k} = 14457,23 [W]$$

Konvekce z povrchu chladících desek

$$Q_{k\ 2.4} = 4,06356 \cdot 32,6725 \cdot (47,015 - 44,55) = 326,375 [W]$$

Ztráty radiací

Pro stanovení úhlových součinitelů rozdělíme oporu opěrný kruh a kuželovou část. Jelikož neznáme empirické vztahy pro úhlový součinitel mezi válcem a kuželem v námi požadované konfiguraci spočteme součinitele za pomoci vztahů pro dva nekonečně dlouhé pláty rozdílných šířek svírajících úhel α . Pro stanovení úhlových součinitelů použijeme online kalkulátor [10].

Přenos tepla probíhá mezi šesti plochami, opora přijímá teplo z válce 1.2 a 1.3 a vyzařuje teplo na povrchy 1.6 a 2.4. Přenos tepla mezi plochami 1.2 a 1.3 jsme již řešili, zaměříme se tedy na zbývající plochy.

- Kuželová část opory 1.4

$$S = 9,9138 \text{ m}^2 \quad l_{1.5} = 6,75 \text{ m}$$

- Opěrný disk 1.5

$$S = 5,8501 \text{ m}^2 \quad l = 0,5 \text{ m}$$

- Chladící plocha 2.4

$$S = 32,6725 \text{ m}^2 \quad D = 5,2 \text{ m} \quad L = 2 \text{ m} \quad T_w = 47,015^\circ\text{C}$$

- Izolovaný válec 1.6

$$S = 38,1845 \text{ m}^2 \quad d = 3,7 \text{ m} \quad l = 3,285 \text{ m} \quad T_w = 187,12^\circ\text{C}$$

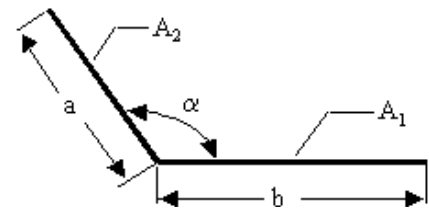
Stanovení úhlových součinitelů

$$A = a/b$$

a šířka plochy, na kterou vyzařujeme

b šířka plochy vyzařující

$$F_{1-2} = \frac{A + 1 - (A^2 + 1 - 2 \cdot A \cdot \cos \alpha)}{2}$$



obr 13 úhlový součinitel dvě nekonečně dlouhé desky [10]

Rov. 4.2.35

Nejprve spočteme úhlový faktor mezi plochami 1.4 a 1.5, tyto plochy svírají úhel 120°

$$F_{1.4-1.5} = 0,1138 [-]$$

$$F_{1.5-1.4} = 0,1536 [-]$$

Předpokládáme stejnou teplotu pro celou oporu, proto mezi povrchy nedochází k přenosu tepla.

Vyzařování z kuželové plochy 1.4 a izolovaný povrch 1.6

$$F_{1.4-1.6} = 0,19667 [-]$$

$$Q_{1.4-1.6} = 8860,67[W]$$

Vyzařování z kuželové plochy 1.4 a chladící povrch 2.4

$$F_{1.4-2.4} = 1 - 0,1138 - 0,19667 = 0,68953 [-]$$

$$Q_{1.4-2.4} = 24717,99 [W]$$

Vyzařování z kuželové plochy 1.5 a chladící povrch 2.4

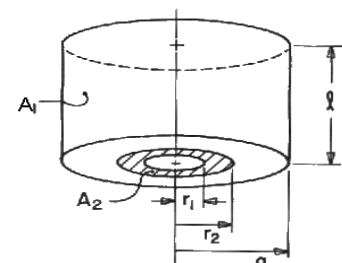
Známe vztah pro stanovení úhlového součinitel pro vyzařování z válcové plochy na disk v základně:

$$R = r/a \qquad L = l/a$$

$r_{1/2}$ vnitřní/vnější poloměr disku

a poloměr válcové stěny

l výška válce



obr 14 úhlový součinitel válec-disk [10]

$$F_{1-2} = \frac{1}{4 \cdot L} (X_2 - X_1 + R_2^2 - R_1^2)$$

Rov. 4.2.36

Výsledný součinitel přepočítáme na základě vztahu reciprocity

$$F_{1-2} \cdot S_1 = F_{2-1} \cdot S_2$$

Rov. 4.2.37

$$F_{1.5-2.4} = 0,55396 [-]$$

$$Q_{1.5-2.4} = 15661,5217 [W]$$

Vyzařování z kuželové plochy 1.5 a izolovaný povrch 1.6

$$F_{1.4-1.6} = 1 - 0,1536 - 0,55396 = 0,29244 [-]$$

$$Q_{1.4-1.6} = 5400,767 [W]$$

Vedení tepla stěnou nádoby

V tomto případě nám do bilance vstupují tepla přiváděná vedením z ploch 1.2 a 1.3. Teplotu povrchu T_{w3} měníme, aby platilo:

$$Q_{ved} = Q_k + Q_{1.6} + Q_{2.4} - Q_{1.3} - Q_{1.2}$$

Rov. 4.2.38

$$Q_{ved} = 14457,23 [W]$$

Výstupní teplota dusíku

Při stanovení výstupní teploty postupujeme jako u části 1 [4.2.21]

$$T_{out} = 48,66 [^{\circ}C]$$

4.2.1.4. Izolovaný válec 1.6

Postup výpočtu je podobný jako v předchozích případech. Ačkoliv je povrch izolovaný, jeho teplota je poměrně vysoká v důsledku tepla přiváděného radiací z povrchů 1.4 a 1.5.

Výchozí hodnoty

- Rozměry
Válec $S = 23,2478 \text{ m}^2$ $d = 3,5 \text{ m}$ $l_6 = 2 \text{ m}$
 $\delta = 0,1 \text{ m}$ $\delta_{iz} = 0,1 \text{ m}$ $\lambda = 50 \text{ W/m.K}$ $\lambda_{iz} = 0,04 \text{ W/m.K}$ $\epsilon = 0,09$
- Teploty $T_1 = 400^{\circ}C$ $T_w^* = 80^{\circ}C$ $T_w = 187,12^{\circ}C$
- Okolní povrchy
Chladicí plocha 2.4 $S = 32,6726 \text{ m}^2$ $D = 5,2 \text{ m}$ $L = 2 \text{ m}$
 $T_{2.2} = 61,82^{\circ}C$ $\epsilon = 0,18$
Betonová stěna 2.5 $S = 63,629 \text{ m}^2$ $d = 5,2 \text{ m}$ $l = 3,895 \text{ m}$ $\epsilon = 0,85$

-
- Vlastnosti dusíku $T_{2,2} = 94,53^\circ\text{C}$ $\varepsilon = 0,85$
 $T_\infty = 48,66^\circ\text{C}$ $Pr = 0,7158$ - $\nu = 1,1818 \cdot 10^{-5}$ $\lambda = 0,02759$
 $c_p = 1041,92 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ $\rho = 1,043 \text{ kg/m}^3$

Rychlost proudění:

$$u = 0,314 \text{ [m/s]}$$

Hydraulický průřez

$$dh = 1,7 \text{ [m]}$$

Reynoldsovo číslo

$$Re = 26082,35 \text{ [-]}$$

Nusseltovo číslo

Pro výpočet využijeme vztah [4.2.3]

$$Nu_{fd} = 68,66 \text{ [-]}$$

Délka vstupního úseku

Jako délku vstupního úseku uvažujeme polovinu počítané části + předchozí úseky se stejným průřezem.

$$x = 1,7 \text{ [m]}$$

Lokální Nusseltovo číslo

Podle vztahu [4.2.4]

$$Nu = 131,8 \text{ [-]}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 2,4209 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$$

Ztráty konvekcí

$$Q_k = 7805,399 \text{ [W]}$$

Konvekci z plochy 2.4 jsme řešili v předchozí části, konvekci z betonové plochy budeme řešit v části následující.

Ztráty radiací

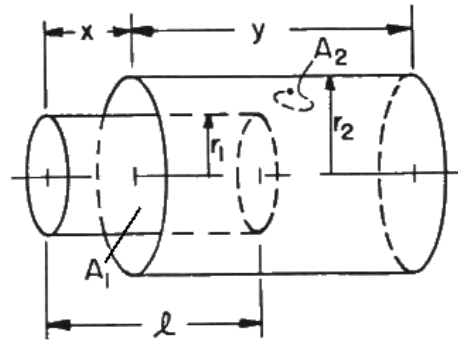
Vyzařování na plochu 2.4

Pro stanovení úhlového součinitele pro vyzařování na plochu 2.4 využijeme vztahy:

$$X = \frac{x}{r_2} \quad Z = \frac{z}{r_2} \quad L = \frac{l}{r_2} \quad R = \frac{r_1}{r_2}$$

$$A_\xi = \xi^2 + R^2 - 1 \quad B_\xi = \xi^2 - R^2 + 1$$

$$-\frac{\pi}{2} \leq \sin^{-1} \xi \leq \frac{\pi}{2} \quad 0 \leq \cos^{-1} \xi \leq \pi$$



obr 15 úhlový faktor přesahující válec zdroj [10]

$$F_\xi = \frac{B_\xi}{8 \cdot R \cdot \xi} + \frac{1}{2 \cdot \pi} \left\{ \cos^{-1} \frac{A_\xi}{B_\xi} - \frac{1}{2 \cdot \xi} \left[\frac{(A_\xi + 2)^2}{R^2} - 4 \right]^{1/2} \cos^{-1} \frac{A_\xi \cdot R}{B_\xi} - \frac{A_\xi}{2 \xi R} \sin^{-1} R \right\}$$

$$F_{1,2} = \frac{X}{L} \cdot F_x + \frac{L - X}{L} (1 - F_{L-X}) + \frac{Y + X - L}{L} F_{Y+L-X} - \frac{X - Y}{L} F_{X+Y}$$

Rov. 4.2.39

$$F_{1,6-2,4} = 0,62106 [-]$$

$$Q_{1,6-2,4} = 3028,32 [W]$$

Vyzařování na plochy 1.4 a 1.5

Součinitele pro vyzařování na plochy 1.4 a 1.5 získáme ze vztahu reciprocity.

$$F_{1,6-1,4} = \frac{F_{1,4-1,6} \cdot S_{1,4}}{S_{1,6}} \quad F_{1,6-1,4} = \frac{0,19667 \cdot 9,91387}{23,247} = 0,08387 [-]$$

Rov. 4.2.40

$$F_{1,6-1,5} = 0,07359$$

Tepelný tok jsem řešili v předchozí části

Vyzařování na betonový povrch 2.5

$$F_{1,6-2,5} = 1 - F_{1,6-2,4} - F_{1,6-1,4} - F_{1,6-1,5}$$

$$F_{1,6-2,5} = 0,22148 [-]$$

$$Q_{1,6-2,5} = 2387,21 [W]$$

Vedení tepla stěnou nádoby a izolace

V tomto případě nám do bilance vstupují tepla přiváděná vedením z ploch 1.2 a 1.3. Teplotu povrchu $T_{w1.6}$ měníme aby platilo:

$$Q_{ved} = Q_k + Q_{2.5} + Q_{2.4} - Q_{1.4} - Q_{1.5}$$

Rov. 4.2.41

$$Q_{ved} = 7805,399 + 2387,21 + 3028,32 - 5895,59 - 5400,76 = 1909,42 [W]$$

$$R_{ved} = \frac{\ln \frac{d}{d_i}}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \lambda} + \frac{\ln \frac{d_o}{d}}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \lambda} \quad R_{ved} = \frac{\ln \frac{3,5}{3,3}}{2 \cdot \pi \cdot 3,26 \cdot \lambda} + \frac{\ln \frac{3,7}{3,5}}{2 \cdot \pi \cdot 3,26 \cdot \lambda} = 11,0599 [K/W]$$

Rov. 4.2.42

$$Q_{ved} = \frac{T_1 - T_{w1.6}}{R_{ved}}$$

Rov. 4.2.43

$$Q_{ved} = 1935,15 [W]$$

Výstupní teplota dusíku

Při stanovení výstupní teploty postupujeme jako u části 1. Podle vztahu:[4.2.21]

$$T_{out} = 50,829 [^{\circ}C]$$

4.2.1.5. Izolovaný válec 1.7

Postup výpočtu je stejný jako u 1.6, na plochu 1.7 však nedopadá záření z neizolovaných ploch.

Výchozí hodnoty

- Rozměry
 Válec $S = 37,138 \text{ m}^2$ $d = 3,5 \text{ m}$ $l_6 = 3,195 \text{ m}$
 $\delta = 0,1 \text{ m}$ $\delta_{iz} = 0,1 \text{ m}$ $\lambda = 50 \text{ W/m.K}$ $\lambda_{iz} = 0,04 \text{ W/m.K}$ $\varepsilon = 0,09$
- Teploty $T_1 = 400^{\circ}C$ $T_w^* = 80^{\circ}C$ $T_w = 85,51^{\circ}C$
- Okolní povrchy
 Chladicí plocha 2.4 $S = 32,6726 \text{ m}^2$ $D = 5,2 \text{ m}$ $L = 2 \text{ m}$
 $T_{2.4} = 47,015^{\circ}C$ $\varepsilon = 0,18$
 Betonová stěna 2.5 $S = 94,53 \text{ m}^2$ $D = 5,2 \text{ m}$ $l_7 = 3,895 \text{ m}$
 $T_{2.5} = 94,11^{\circ}C$ $\varepsilon = 0,85$

Ventilace tlakové obálky reaktoru GFR

Chladicí plocha 2.6 $S = 24,5044 \text{ m}^2$ $D = 5,2 \text{ m}$ $L = 2 \text{ m}$

$T_{2,6} = 47,74^\circ\text{C}$ $\varepsilon = 0,18$

- Vlastnosti dusíku $T_\infty = 50,829^\circ\text{C}$ $Pr = 0,71580876$ - $\nu = 1,84 \cdot 10^{-5}$ $\lambda = 0,0273$
 $c_p = 1042 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ $\rho = 1,04996 \text{ kg/m}^3$

Ztráty konvekcí

$$Q_k = 2514,37 \text{ [W]}$$

Konvekce z povrchu betonu

$$Q_k = 5428,835 \text{ [W]}$$

Záření

Při výpočtu záření postupujeme jako u plochy 1.2 [4.2.12]

$$F_{1,7-2,4} = 0,0826 \text{ [-]}$$

$$Q_{1,7-2,4} = 464,3 \text{ [W]}$$

$$F_{1,7-2,5} = 0,8245 \text{ [-]}$$

$$Q_{1,7-2,5} = 1113,16 \text{ [W]}$$

$$F_{1,7-2,6} = 0,0826 \text{ [-]}$$

$$Q_{1,7-2,6} = 450,61 \text{ [W]}$$

Vedení tepla stěnou nádoby a izolace

$$Q_{ved} = Q_k + Q_{2,4} + Q_{2,5} + Q_{2,6}$$

Rov. 4.2.44

$$Q_{ved} = 4542,47 \text{ [W]}$$

Výstupní teplota dusíku

$$T_{out} = 53,03 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

4.2.1.6. Potrubí k hlavním výměníkům

Potrubí spojující nádobu reaktoru s hlavními výměníky procházejí, horizontálními šachtami o průměru 1,8 m, potrubí je taktéž zaizolováno. Pro ochlazování přivádíme část dusíku doprostřed šachty v betonu.

Při výpočtu ztrát si potrubí rozdělíme na tři úseky, první úsek se nachází uvnitř horizontální šachty, řešíme jej jako proudění v potrubí, druhá a třetí část se nachází v šachtě reaktoru a výměníku a řešíme ji jako příčně obtékaný válec.

K výpočtu ztrát v šachtě reaktoru, potřebujeme spočítat část 2 a 3.

Ztráty potrubí 1

Při výpočtu konvektivní ztrát postupujeme stejně jako v předchozích případech.

Výchozí hodnoty

- Rozměry
Potrubí 1 $S = 13,21 \text{ m}^2$ $d = 1,25 \text{ m}$ $l = 2,9 \text{ m}$
 $\delta = 0,05 \text{ m}$ $\delta_{iz} = 0,1 \text{ m}$ $\lambda = 50 \text{ W/m.K}$ $\lambda_{iz} = 0,04 \text{ W/m.K}$ $\varepsilon = 0,09$
- Teploty $T_{in} = 400^\circ\text{C}$ $T_{w1}^* = 80^\circ\text{C}$ $T_{w1} = 82,95^\circ\text{C}$
- Okolní povrchy
Beton $S = 16,399 \text{ m}^2$ $D = 5,2 \text{ m}$ $L = 2 \text{ m}$
 $T_{2,2} = 50,58^\circ\text{C}$ $\varepsilon = 0,18$
- Vlastnosti dusíku $T_\infty = 35^\circ\text{C}$ $Pr = 0,71574$ - $\nu = 1,673 \cdot 10^{-5}$ $\lambda = 0,0266$
 $cp = 1041,4 \text{ J/kg}\cdot\text{k}$ $\rho = 1,0952 \text{ kg/m}^3$

Hmotnostní průtok

$$\dot{m} = 0,1072 \text{ [kg/s]}$$

Rychlost proudění

$$u = 0,2724 \text{ [m/s]}$$

Ztráty konvekcí

$$Q_k = 1217,366 \text{ [W]}$$

Ztráty radiací

$$Q_{rad} = 338,74 \text{ [W]}$$

Vedení tepla

$$Q_{ved} = 1556,2 [W]$$

Konvekce z okolních ploch

$$Q = 338,74 [W]$$

Výstupní teplota dusíku

$$T_{out} = 48,93 [^{\circ}C]$$

Ztráty potrubí 2

Postup výpočtu je podobný jako v předcházejících částech, liší se vztahy pro stanovení Nusseltova čísla.

- Rozměry
Potrubí 1 $S = 3,4164 \text{ m}^2$ $d = 1,25 \text{ m}$ $l = 0,75 \text{ m}$
 $\delta = 0,05 \text{ m}$ $\delta_{iz} = 0,1 \text{ m}$ $\lambda = 50 \text{ W/m.K}$ $\lambda_{iz} = 0,04 \text{ W/m.K}$ $\varepsilon = 0,09$
- Teploty $T_{in} = 400^{\circ}C$ $T_{W2}^* = 80^{\circ}C$ $T_{W2} = 94,0063^{\circ}C$
- Vlastnosti dusíku $T_{\infty} = 53,03^{\circ}C$ $Pr = 0,715812$ - $Pr_w = 0,715812$ - $u = 0,3314 \text{ m/s}$
 $v = 1,8484 \cdot 10^{-5}$ $\lambda = 0,027782$ $c_p = 1042 \text{ J/kg}^{\circ}K$ $\rho = 0,9947 \text{ kg/m}^3$

Reynoldsovo číslo

Charakteristický rozměr je tu vnější průměr izolace potrubí.

$$Re_D = 25122,125 [-]$$

Nusseltovo číslo

Použijeme vztah pro příčně obtékaný válec

$$Nu = 0,26 \cdot Re_D^{0,6} \cdot Pr^{0,37} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)$$

Rov. 4.2.45

Ztráty konvekcí

$$Q_k = 268,98 [W]$$

Ztráty radiací

$$Q_{rad} = 119,45 [W]$$

Vedení tepla

$$Q_{ved} = 388,43 [W]$$

Celková konvekce

$$Q = 412,36 [W]$$

Výstupní teplota dusíku

$$T_{out} = 53,25[°C]$$

Dusík přivedený k chlazení potrubí 1 proudí do šachty reaktoru, spočteme tedy výsledný hmotnostní tok a výstupní teplotu. Do šachty reaktoru vedou 2 potrubí, dále uvažujeme, že polovina dusíku přivedeného k potrubí 1 proudí k výměníkům a polovina k reaktoru, výsledný hmotnostní tok je tedy.

$$\dot{m} = 0,1072 [kg/s]$$

Výsledný hmotnostní tok:

$$\dot{m} = \dot{m}_{potr} + \dot{m}_{reakt} \quad \dot{m} = 3,5642 [kg/s]$$

Rov. 4.2.46

Teplotu stanovíme podle vztahu [4.2.27]

$$T_{out} = 54,52[°C]$$

4.2.1.7. Izolovaný válec 1.8

Postup výpočtu je stejný jako u válce 1.6.

Výchozí hodnoty

- Rozměry

Válec	$S = 14,99 \text{ m}^2$	$d = 3,5 \text{ m}$	$l_g = 1,29 \text{ m}$
	$\delta = 0,1 \text{ m}$	$\delta_{iz} = 0,1 \text{ m}$	$\lambda = 50 \text{ W/m.K}$
	$\lambda_{iz} = 0,04 \text{ W/m.K}$	$\varepsilon = 0,09$	
- Teploty

	$T_1 = 400^\circ\text{C}$	$T_w^* = 80^\circ\text{C}$	$T_w = 207,06^\circ\text{C}$
--	---------------------------	----------------------------	------------------------------
- Okolní povrchy

Příruba 1.9	$S = 4,24 \text{ m}^2$	$d_1 = 3,5 \text{ m}$	$d_1 = 4,26 \text{ m}$
	$T_{1,9} = 394,74^\circ\text{C}$	$\varepsilon = 0,8$	
Chladicí plocha 2.6	$S = 24,5044 \text{ m}^2$	$D = 5,2 \text{ m}$	$L = 2 \text{ m}$
	$T_{2,6} = 47,74^\circ\text{C}$	$\varepsilon = 0,18$	
Betonová stěna 2.5	$S = 63,629 \text{ m}^2$	$D = 5,2 \text{ m}$	$l_7 = 3,895 \text{ m}$
	$T_{2,5} = 94,53^\circ\text{C}$	$\varepsilon = 0,85$	

Ztráty konvekcí

$$Q_k = 4661,45 [W]$$

Konvekce z okolních povrchů

Je řešeno v rámci válce 1.7 a příruby 1.10

Záření

Nejprve stanovíme úhlový součinitel pro plochy 2.5 a 2.6 pomocí vztahů [4.2.12]

$$F_{1.8-2.6} = 0,6769 [-]$$

$$Q_{1.8-2.6} = 3101,6 [W]$$

$$F_{1.8-2.5} = 0,19108 [-]$$

$$Q_{1.8-2.5} = 1928,46 [W]$$

Úhlový faktor k přírubě bude doplněk do 1, teplota povrchu 1.9 je vyšší než povrchu 1.8 proto je tepelný tok záporný.

$$F_{1.8-1.9} = 0,13202 [-]$$

$$Q_{1.8-1.9} = -6702,88 [W]$$

Vedení tepla stěnou nádoby a izolace

Tepelné toky dosazujeme v absolutních hodnotách, proto $-Q_{1.9}$

$$Q_{ved} = Q_k + Q_{2.5} + Q_{2.6} - Q_{1.9}$$

$$Q_{ved} = 1125,2 [W]$$

Výstupní teplota dusíku

$$T_{out} = 55,8 [^{\circ}C]$$

4.2.1.8. Potrubí k DHR výměníkům

Postup výpočtu je stejný jako u potrubí k hlavním výměníkům.

Výchozí hodnoty

Potrubí 1

- Rozměry
Potrubí 1 $S = 2,84 \text{ m}^2$ $d = 1,25 \text{ m}$ $l = 0,625 \text{ m}$
 $\delta = 0,05 \text{ m}$ $\delta_{iz} = 0,1 \text{ m}$ $\lambda = 50 \text{ W/m.K}$ $\lambda_{iz} = 0,04 \text{ W/m.K}$ $\varepsilon = 0,09$
- Teploty $T_{in} = 400^\circ\text{C}$ $T_{W1}^* = 80^\circ\text{C}$ $T_{W1} = 72,89^\circ\text{C}$
- Okolní povrchy
Beton $S = 3,53 \text{ m}^2$ $D = 5,2 \text{ m}$ $L = 2 \text{ m}$ $T_2 = 37,5^\circ\text{C}$ $\varepsilon = 0,18$
- Vlastnosti dusíku $T_\infty = 35^\circ\text{C}$ $Pr = 0,71574$ - $\nu = 1,673 \cdot 10^{-5}$ $\lambda = 0,0266$
 $c_p = 1041,4 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ $\rho = 1,0952 \text{ kg/m}^3$

Ztráty konvekci

$$Q_k = 274,03 [W]$$

Ztráty radiací

$$Q_{rad} = 71,98 [W]$$

Vedení tepla

$$Q_{ved} = 346,0316 [W]$$

Celková konvekce

$$Q = 346,0316 [W]$$

Výstupní teplota dusíku

$$T_{out} = 36,15 [^\circ\text{C}]$$

Potrubí 2

Postupujeme jako u potrubí k hlavním výměníkům 2.

- Rozměry
Potrubí 1 $S = 3,4164 \text{ m}^2$ $d = 1,25 \text{ m}$ $l = 0,75 \text{ m}$
 $\delta = 0,05 \text{ m}$ $\delta_{iz} = 0,1 \text{ m}$ $\lambda = 50 \text{ W/m.K}$ $\lambda_{iz} = 0,04 \text{ W/m.K}$ $\varepsilon = 0,09$
- Teploty $T_{in} = 400^\circ\text{C}$ $T_{w2}^* = 80^\circ\text{C}$ $T_{w2} = 94,89^\circ\text{C}$
- Vlastnosti dusíku $T_\infty = 54,37^\circ\text{C}$ $Pr = 0,715819$ - $Pr_w = 0,71598$ - $u = 0,3314 \text{ m/s}$
 $v = 1,8664 \cdot 10^{-5}$ $\lambda = 0,02789$ $c_p = 1042 \text{ J/kg}\cdot\text{k}$ $\rho = 1,02861 \text{ kg/m}^3$

Ztráty konvekcí

$$Q_k = 268,07 \text{ [W]}$$

Ztráty radiací

$$Q_{rad} = 119,24 \text{ [W]}$$

Vedení tepla

$$Q_{ved} = 387,32 \text{ [W]}$$

Celková konvekce

$$Q = 387,32 \text{ [W]}$$

Výstupní teplota dusíku

$$T_{out} = 54,688 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Teplotu stanovíme podle vztahu [4.2.27]

$$T_{out} = 53,16 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

4.2.1.9. Neizolovaný válec + příruba + vrchlík

Výchozí hodnoty

- Rozměry tlak nádoba
 Válec 1.9 $S = 2,309 \text{ m}^2$ $d = 3,5 \text{ m}$ $l = 0,21 \text{ m}$
 Příruba 1.10 $S = 4,631 \text{ m}^2$ $d_1 = 3,5 \text{ m}$ $d_2 = 4,26 \text{ m}$
 Příruba 1.11 $S = 11,777 \text{ m}^2$ $d_2 = 4,26 \text{ m}$ $l = 0,88 \text{ m}$
 Příruba 1.12 $S = 4,631 \text{ m}^2$ $d_1 = 3,5 \text{ m}$ $d_2 = 4,26 \text{ m}$
 Válec 1.13 $S = 6,7 \text{ m}^2$ $d = 3,5 \text{ m}$ $l = 0,21 \text{ m}$
 Vrchlík $S = 19,242 \text{ m}^2$ $d = 3,5 \text{ m}$
 Ekvivalentní válec $S = 49,3 \text{ m}^2$ $d = 3,5 \text{ m}$ $l_1 = 4,4836 \text{ m}$
 $\delta = 0,1 \text{ m}$ $\lambda = 50 \text{ W/m.K}$ $\varepsilon = 0,8$
 Teploty $T_1 = 400^\circ\text{C}$ $T_W^* = 380^\circ\text{C}$ $T_W = 394,74^\circ\text{C}$
- Vlastnosti dusíku $T_\infty = 53,16^\circ\text{C}$ $Pr = 0,7158$ - $\nu = 1,8394 \cdot 10^{-5}$ $\lambda = 0,02772$
 $c_p = 1042 \text{ J/kg}\cdot\text{k}$ $\rho = 1,0366 \text{ kg/m}^3$
- Okolní povrchy $\varepsilon = 0,18$
 Chladicí plocha 2.6 $S = 24,504 \text{ m}^2$ $D = 5,2 \text{ m}$ $L = 1,5 \text{ m}$ $T_{2.6} = 47,74^\circ\text{C}$
 Chladicí plocha 2.7 $S = 24,504 \text{ m}^2$ $D = 5,2 \text{ m}$ $L = 1,5 \text{ m}$ $T_{2.7} = 51,23^\circ\text{C}$
 Chladicí plocha 2.8 $S = 24,504 \text{ m}^2$ $D = 5,2 \text{ m}$ $L = 1,5 \text{ m}$ $T_{2.8} = 52,07^\circ\text{C}$
 Chladicí plocha 2.9 $S = 24,504 \text{ m}^2$ $D = 5,2 \text{ m}$ $L = 1,5 \text{ m}$ $T_{2.9} = 45,53^\circ\text{C}$
 Chladicí plocha vrch $S = 21,23 \text{ m}^2$ $D = 5,2 \text{ m}$ $T_{\text{vrch}} = 46,76^\circ\text{C}$

Ztráty konvekcí

Postup výpočtu je stejný jako v kapitole 4.2.1.1

$$Q_k = 29448,902 \text{ [W]}$$

Konvekce z povrchu chladících desek

Část tepla přivedeného radiací je z povrchu chladících desek odváděna proudem dusíku.

$$Q_{k\ 2.6} = -232,19 \text{ [W]}$$

$$Q_{k\ 2.7} = -82,22 \text{ [W]}$$

$$Q_{k\ 2.8} = -46,79 \text{ [W]}$$

$$Q_{k\ 2.9} = -327,004 \text{ [W]}$$

$$Q_{k\ \text{vrch}} = 237,712 \text{ [W]}$$

Ztráty radiací

Pro stanovení úhlových součinitelů použijeme online kalkulačtor [10]

Válcová část 1.9

Neizolovaný válec 1 vyzařuje na tři povrchy:

- Chladící povrch 2.6
- Příruba 1.10
- Chladící povrch 2.7

Vyzařování na chladící povrch 2.6

Při výpočtu záření postupujeme jako u plochy 1.2

$$F_{1,9-2,6} = 0,517 [-]$$

$$Q_{1,9-2,6} = 9437,18 [W]$$

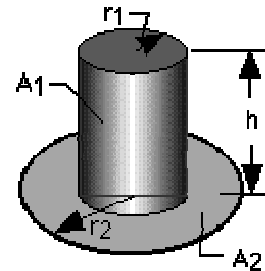
Vyzařování na přírubu 1.10

$$R = r_1/r_2$$

$$H = h/r_2$$

$$A = H^2 + R^2 - 1$$

$$B = H^2 - R^2 + 1$$



obr 16 úhlový součinitel válec disk zdroj [10]

$$F_{1-2} = \frac{B}{8R \cdot H} + \frac{1}{2 \cdot \pi} \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{A}{B} \right) - \frac{1}{2H} \left[\frac{(A+2)^2}{R^2} - 4 \right]^{1/2} \cdot \cos^{-1} \left(\frac{A \cdot R}{B} \right) - \frac{A}{2R \cdot H} \sin^{-1} R \right\}$$

Rov. 4.2.47

$$F_{1,9-1,10} = 0,3635 [-]$$

Předpokládáme stejnou teplotu příruby a válce, proto nedochází k přenosu tepla.

Vyzařování na chladící povrch 2.7

Chladící povrch 2.7 je stíněn přírubou, pro přenos tepla zářením uvažujeme redukovanou plochu 2.7*.

$$S_{2.7} = 4,2474 [m^2]$$

$$F_{1.9-2.7} = 1 - F_{1.9-1.10} - F_{1.9-2.6}$$

Rov. 4.2.48

$$F_{1.9-2.7} = 0,1195 [-]$$

$$Q_{1.9-2.7} = 2217,51 [W]$$

Příruba 1.10

Příruba 1.10 vyzařuje na tři povrchy

- Neizolovaný válec 1.9
- Chladící povrch 2.6
- Izolovaný válec 1.8

Vyzařování na válec 1.9

Použijeme vztah reciprocity

$$F_{1.10-1.9} = \frac{F_{1.9-1.10} \cdot S_{1.9}}{S_{1.10}}$$

Rov. 4.2.49

$$F_{1.10-1.9} = 0,1812 [-]$$

Vyzařování na chladící povrch 2.6

Použijeme vztahy [4.2.36] [4.2.37]

$$F_{1.10-2.6} = 0,3915 [-]$$

$$Q_{1.10-2.6} = 13498,134 [W]$$

Vyzařování na izolovaný povrch 1.8

Použijeme vztah reciprocity

$$F_{1.10-1.8} = 0,4273 [-]$$

Hodnotu tepelného toku jsme už spočetli v rámci plochy 1.8

$$Q_{1.9-1.8} = -Q_{1.8-1.9} = 6702,88 [W]$$

Příruba 1.11

Příruba 1.10 vyzařuje na tři povrchy

- Chladící povrch 2.6
- Chladící povrch 2.7
- Chladící povrch 2.8

Jedná se o vyzařování mezi dvěma válcovými stěnami, k řešení použijeme vztah [4.2.12]

Vyzařování na chladící povrch 2.6

$$F_{1.11-2.6} = 0,179 [-]$$

$$Q_{1.11-2.6} = 15673,61 [W]$$

Vyzařování na chladící povrch 2.7

$$F_{1.11-2.7} = 0,777998 [-]$$

$$Q_{1.11-2.7} = 33556,37 [W]$$

Vyzařování na chladící povrch 2.8

$$F_{1.11-2.8} = 0,043 [-]$$

$$Q_{1.11-2.8} = 4880,8 [W]$$

Příruba 1.12

Příruba 1.12 vyzařuje na čtyři povrchy

- Chladící povrch 2.7
- Chladící povrch 2.8
- Neizolovaný válec 1.13
- Chladící povrch vrch

Vyzařování na chladící povrch 2.7

Použijeme vztahy [4.2.36] [4.2.37]

$$F_{1.12-2.7} = 0,1909 [-]$$

$$Q_{1.12-2.7} = 6488,821 [W]$$

Vyzařování na chladící povrch 2.8

Použijeme vztahy [4.2.36] [4.2.37]

$$F_{1.12-2.8} = 0,3775 [-]$$

$$Q_{1.12-2.8} = 9832,09 [W]$$

Vyzařování na neizolovaný válec 1.13

Pomocí vztahu [4.2.47] zjistíme úhlový součinitel pro vyzařování z válce 1.13, poté přepočteme přes vztah reciprocity

$$F_{1.13-1.12} = 0,2088 [-]$$

$$F_{1.12-1.13} = \frac{F_{1.13-1.12} \cdot S_{1.13}}{S_{1.12}}$$

Rov. 4.2.50

$$F_{1.12-1.13} = 0,302352 [-]$$

Předpokládáme stejnou teplotu obou povrchů - nedochází k přenosu tepla.

Vyzařování na horní desku

$$F_{1.12-2.10} = 1 - F_{1.12-2.7} - F_{1.12-2.8} - F_{1.12-1.13}$$

Rov. 4.2.51

$$F_{1.12-2.10} = 0,129248 [-]$$

$$Q_{1.12-2.10} = 5512,945 [W]$$

Neizolovaný válec 1.13

Válec 1.13 vyzařuje na čtyři povrchy

- Příruba 1.12
- Chladící povrch 2.7
- Chladící povrch 2.8
- Chladící povrch 2.9

Vyzařování na horní desku je zanedbatelné.

Vyzařování na přírubu 1.12

Součinitel jsme již zjistily v rámci příruby 1.12

$$F_{1.13-1.12} = 0,2088 [-]$$

Vyzařování na plochy 2.7 2.8 2.9

Jedná se o vyzařování mezi dvěma válcovými stěnami, k řešení použijeme vztah [4.2.12]

$$F_{1.13-2.7} = 0,473104 [-]$$

$$Q_{1.13-2.7} = 19134,16 [W]$$

$$F_{1.13-2.8} = 0,295192 [-]$$

$$Q_{1.13-2.8} = 14621,9 [W]$$

$$F_{1.13-2.8} = 0,022904 [-]$$

$$Q_{1.13-2.8} = 1588,974 [W]$$

Vrchlák 1.14

Vrchlák 1.14 vyzařuje na tři povrchy

- Chladící povrch 2.8
- Chladící povrch 2.9
- Chladící povrch horní deska 2.10

Postupujeme stejně jako u dna

$$F_{1.14-2.8} = 0,569261 [-]$$

$$Q_{1.14-2.8} = 36694,16 [W]$$

$$F_{1.14-2.9} = 0,291585 [-]$$

$$Q_{1.14-2.9} = 28366,55 [W]$$

$$F_{1.14-2.10} = 0,139154 [-]$$

$$Q_{1.14-2.10} = 17785,99 [W]$$

Výstupní teplota dusíku

$$T_{out} = 60,14[{}^{\circ}C]$$

Výstupní hodnoty

$$\dot{m} = 3,9184 [kg/s]$$

$$T_{in} = 35 [{}^{\circ}C]$$

$$T_{out} = 60,14 [{}^{\circ}C]$$

$$Q_{k celk} = 102659,6 [W]$$

$$Q_{rad cek} = 407609,9 [W]$$

Shrnutí

Šachtou reaktoru proudí 3,9184 kg/s dusíku, dusík vstupuje o teplotě 35°C, z povrchu reaktoru a okolních ploch přijme 102661,1 W, čímž se ohřeje na 60,14°C. Z těchto hodnot budeme vycházet při návrhu výměníku.

Přenos tepla radiací je 407609,9 W toto teplo je absorbováno chladícími plochami, odkud je odváděno vodou.

4.2.2. Ztráty hlavní výměník

Postup při výpočtu hlavních výměníků je stejný jako u tlakové nádoby, proto uvedeme pouze výstupní hodnoty, zbývající hodnoty jsou v příloze 2

$$\dot{m} = 3,083 \text{ [kg/s]}$$

$$T_{in} = 35 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

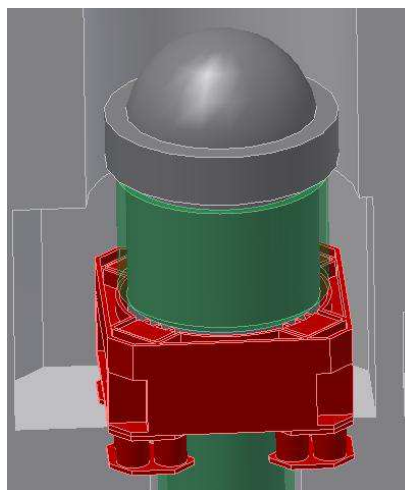
$$T_{out} = 46,119 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$Q_{k\ celk} = 35714,17 \text{ [W]}$$

$$Q_{rad\ cek} = 18212,8 \text{ [W]}$$

4.2.3. Ztráty větve DHR

Výpočet tepelných ztrát DHR se skládá ze ztrát v přívodním potrubí a ztrát tělesa DHR, chladivo je přiváděno do dutiny, ve které je uloženo koleno potrubí, část chladiva odchází skrze horizontální šachtu do šachty reaktoru zbývající chladivo stoupá mezitrubím k výměníku DHR. Těleso výměníku DHR je ukotveno speciálním držákem viz obr. Umístění držáku nám znemožňuje zaizolovat spodní část DHR, z hlediska tepelného výpočtu nám držák zmenšuje průtočný průřez, zároveň však snižuje odvod tepla radiací, neboť funguje jako radiační stínění.



obr 17 držák výměníku DHR

4.2.3.1. Výpočet tepelných ztrát potrubí

Nejprve stanovíme tepelné ztráty potrubí, potrubí jsme si rozdělili na dvě části koleno a vertikální válec.

Koleno

- Rozměry potrubí $S = 12,7 \text{ m}^2$ $d = 1,25 \text{ m}$ $l = 2,788 \text{ m}$
 $\delta = 0,05 \text{ m}$ $\delta_{iz} = 0,05 \text{ m}$ $\lambda = 50 \text{ W/m.K}$ $\lambda_{iz} = 0,04 \text{ W/m.K}$ $\varepsilon = 0,8$
- Teploty $T_1 = 400^\circ\text{C}$ $T_w^* = 80^\circ\text{C}$ $T_w = 80,76^\circ\text{C}$

- Vlastnosti dusíku $T_{\infty}=35^{\circ}\text{C}$ $Pr = 0,71574$ - $\nu = 1,673 \cdot 10^{-5}$ $\lambda = 0,0266$
 $c_p = 1041,4 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ $\rho = 1,0952 \text{ kg/m}^3$
- Okolní plochy $h = 3,1 \text{ m}$ $w = 2,6 \text{ m}$ $l = 3,4 \text{ m}$ $S = 52,29 \text{ m}^2$ $S_{\text{průt}} = 4,6 \text{ m}^2$

Ztráty konvekcí

Ztráty konvekcí spočteme pomocí vztahů pro příčně obtékané potrubí viz [1].

Volíme hmotnostní tok $1,5 \text{ kg/s}$ průtočný průřez je $4,6 \text{ m}^2$

$$u = 0,29774 \text{ [m/s]}$$

$$Q_k = 1077,407 \text{ [W]}$$

Ztráty radiací

$$Q_{rad} = 430,77 \text{ [W]}$$

Konvekce z okolních povrchů

Vyzařované teplo je odváděno konvekcí z okolních ploch.

$$Q = Q_{rad} = 430,77 \text{ [W]}$$

Výstupní teplota

$$T_{out} = 35,96 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

$$Q_{k\ celk} = 1506,449 \text{ [W]}$$

Hmotnostní bilance proudění

$$\dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$$

$$1,5 = 0,118 + 1,382 \text{ [kg/s]}$$

- \dot{m} přiváděný hmotnostní tok
- \dot{m}_1 proudění do šachty reaktoru
- \dot{m}_2 proudění do vertikálního potrubí

Vertikální potrubí

- Rozměry potrubí $S = 30,97 \text{ m}^2$ $d = 1,25 \text{ m}$ $l = 6,8 \text{ m}$
 $\delta = 0,05 \text{ m}$ $\delta_{iz} = 0,05 \text{ m}$ $\lambda = 50 \text{ W/m.K}$ $\lambda_{iz} = 0,04 \text{ W/m.K}$ $\varepsilon = 0,8$
- Teploty $T_1 = 400^\circ\text{C}$ $T_w^* = 80^\circ\text{C}$ $T_w = 60,855^\circ\text{C}$
- Vlastnosti dusíku $T_\infty = 35,96^\circ\text{C}$ $Pr = 0,71574$ - $\nu = 1,673 \cdot 10^{-5}$ $\lambda = 0,0266$
 $c_p = 1041,4 \text{ J/kg}\cdot\text{k}$ $\rho = 1,0952 \text{ kg/m}^3$
- Okolní plochy $S = 38,45 \text{ m}^2$ $D = 1,8 \text{ m}$ $L = 6,8 \text{ m}$

Ztráty konvekcí

Z hmotnostního toku a průtočného průřezu určíme rychlost proudění, vzhledem k tomu že je povrch plně zaizolovaný můžeme nechat vyšší rychlost.

$$\dot{m} = 1,382 \text{ [kg/s]}$$

$$u = 1,417 \text{ [m/s]}$$

$$Q_k = 5419,701 \text{ [W]}$$

Ztráty radiací

$$Q_{rad} = 517,4511 \text{ [W]}$$

Konvekce z okolních povrchů

Z okolních povrchů je odváděno teplo vyzářované z potrubí a v horní části taky teplo vyzářené z neizolovaných ploch DHR.

$$Q = Q_{rad} + Q_{radDHR} = 2204,486 \text{ [W]}$$

Výstupní teplota

$$T_{out} = 40,9 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$Q_{k celk} = 7106,736 \text{ [W]}$$

4.2.3.2. Výpočet tepelných ztrát DHR

Při výpočtu tepelných ztrát postupujeme stejným způsobem jako u tlakové nádoby reaktoru, proto uvedeme pouze výstupní hodnoty, všechny hodnoty jsou v příloze 2

$$\dot{m} = 1,382 \text{ [kg/s]}$$

$$T_{in} = 40,9[^\circ\text{C}]$$

$$T_{out} = 66,41 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$Q_{k\ celk} = 36725,33 \text{ [W]}$$

$$Q_{rad\ cek} = 100870,2 \text{ [W]}$$

5. Návrh způsobů odvodu tepla z tlakové obálky

V této části navážeme na objem tepelných ztrát spočtených v předchozí kapitole. Odvod tepla bude prováděn dvěma způsoby.

- Ochlazování dusíku v tepelném výměníku
- Odvodem radiačních ztrát skrze chladicí desky

Uvažujeme šest oddělených chladicích systémů, jeden pro každé těleso.

5.1. Tepelný výměník

Hlavním problémem, se kterým se setkáme u návrhu výměníků pracujících s plyny velký objemový průtok způsobený nízkou hustou plynů. V našem případě jsme navíc značně omezení vnitřním prostorem.

Při pohledu na vnitřní konfiguraci tlakové obálky je patrné, že v horizontálním směru jsme značně omezení vertikálními šachtami pro jednotlivá tělesa reaktoru, jako nejefektivnější využití volného prostoru se jeví umístit výměníky do vertikálních šachet paralelních s hlavními šachtami.

Pro tuto konfiguraci je nejvhodnější výměník typu trubka v trubce. Další výhodou trubkového výměníku je možnost zakomponovat jej do potrubního systému pro přenos dusíku z horní části chlazeného úseku do dolní, tím že část přepravního potrubí bude sloužit jako výměník ušetříme materiál, poslední výhodou trubkového výměníku je nízká tlaková ztráta.

Ventilace tlakové obálky reaktoru GFR

Základní rozměry výměníku (tj. průřezy, počet trubek a počet žeber), uvažujeme pro všechny chladicí okruhy stejné, pro jednotlivé chladicí okruhy pak stanovíme počet paralelních výměníků pro dosažení žádaného hmotnostního průtoku a délku výměníků pro dosažení požadované teplo-směnné plochy.

Dusík potřebujeme vychladit na 35°C za použití chladicí vody o vstupní teplotě 30°C, jak je patrné z teplotní diference nejvhodnější je protiproudé uspořádání.

5.1.1. Návrh výměníku pro šachtu reaktoru

Nejprve zvolíme základní rozměry z tabulek vyráběných trubek, rozměry v tabulkách jsou v imperiálních mírách, hodnoty přepočteme na metrický systém.

$$1 \text{ in} = 25,4 \text{ mm}$$

- d_i vnitřní průměr trubky 0,824 in = 0,020093 m
- δ tloušťka trubky 0,14 in = 0,003556 m
- d_o vnější průměr trubky $d_{in} + 2\delta = 0,028042$ m
- D_i vnitřní průměr vnější trubky 0,27 m
- D_o vnější průměr vnější trubky 0,28 m
- N_t počet trubek 19
- N_f počet žeber 12
- H_f výška žebra 0,01 m
- δ_f tloušťka žebra 0,0009
- λ tepelná vodivost 50 W/m²K

Postup výpočtu

Nejprve spočteme průtočný průřez na straně dusíku:

$$A_c = \frac{\pi}{4} \cdot (D_i^2 - d_o^2 \cdot N_t) - (\delta_f \cdot H_f \cdot N_f \cdot N_t)$$

Rov. 5.1.1

$$A_c = \frac{\pi}{4} \cdot (0,27^2 - 0,028042^2 \cdot 19) - (0,0009 \cdot 0,01 \cdot 12 \cdot 19) = 0,043469 \text{ [m}^2\text{]}$$

Smáčený obvod

$$P_w = \pi \cdot (D_i - d_o \cdot N_t) - (2 \cdot H_f \cdot N_f \cdot N_t)$$

Rov 5.1.2

$$P_w = \pi \cdot (0,27 - 0,028042 \cdot 19) - (2 \cdot 0,01 \cdot 12 \cdot 19) = 7,08204 \text{ [m]}$$

Hydraulický průřez

$$dh = \frac{4 \cdot A_c}{P_w} \qquad dh = \frac{4 \cdot 0,043469}{7,08204} = 0,024552 \text{ [m]}$$

Rov. 5.1.3

Smáčený obvod pro přenos tepla

$$P_h = \pi \cdot d_o \cdot N_t - (2 \cdot H_f \cdot N_f \cdot N_t)$$

Rov. 5.1.4

$$P_h = \pi \cdot 0,028042 \cdot 19 - (2 \cdot 0,01 \cdot 12 \cdot 19) = 6,23381 \text{ [m]}$$

Ekvivalentní průřez

$$de = \frac{4 \cdot A_c}{P_h} \qquad de = \frac{4 \cdot 0,043469}{6,23381} = 0,027893 \text{ [m]}$$

Rov. 5.1.5

V následující části spočteme součinitel přestupu tepla, nejprve musíme určit rychlost proudění. Pro případ chlazení šachty reaktoru máme hmotnostní průtok 3,9184 kg/s

Tento hmotnostní tok není možné prohnat jedním výměníkem, proto volíme 6 paralelních větví.

$$\dot{m}_{1/6} = 0,653083 \text{ [kg/s]}$$

Pro stanovení rychlosti proudění ještě potřebujeme znát hustotu, tu určíme z tabulek pro střední teplotu dusíku.

$$T_{stř} = \frac{T_{in} - T_{out}}{2} \qquad T_{stř} = \frac{62,28 - 35}{2} = 48,64 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Rov. 5.1.5

Vlastnosti dusíku pro střední teplotu

- hustota ρ 1,04773 kg/m³
- kinematická viskozita ν 18,0488*10⁻⁶ m²/s
- Prandtlovo číslo Pr 0,71579
- Tepelná vodivost λ 0,0275 W/m*K

Rychlost proudění:

$$u = \frac{\dot{m}_{1/6}}{A_c \cdot \rho} \qquad u = \frac{0,653083}{0,043469 \cdot 1,04773} = 14,405 \text{ [m/s]}$$

Rov. 5.1.6

Nyní stanovíme Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{dh \cdot u}{\nu} \qquad Re = \frac{0,024552 \cdot 14,405}{18,0488 \cdot 10^{-6}} = 19518,856 \text{ [-]}$$

Rov. 5.1.7

Nusseltovo číslo

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,3}$$

$$Nu = 0,023 \cdot 19518,856^{0,8} \cdot 0,71579^{0,3} = 55,3026$$

Součinitel přestupu tepla

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{de} \qquad \alpha_1 = \frac{55,3026 \cdot 0,0275}{0,027893} = 55,51 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{k]}$$

Rov. 5.1.8

Nyní provedeme výpočet na straně vody

Vlastnosti vody zdroj XSteam:

- Hustota ρ_{H_2O} 995,65 kg/m³
- Dynamická viskozita μ 0,0007973 N*s*m⁻²
- Prandtlovo číslo Pr 5,68
- Tepelná kapacita cp 4178,556 J/kg*K
- Tepelná vodivost λ 0,6125 W/m*K

Průtočný průřez

$$S_i = N_t \cdot d_i^2 \cdot \frac{\pi}{4}$$

Rov. 5.1.9

$$S_i = 19 \cdot 0,02093^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 0,0065368 \text{ [m}^2\text{]}$$

Zvolíme hmotnostní průtok vody.

$$\dot{m}_{H_2O} = 1,952513 \text{ [Kg/s]}$$

Z průtočného průřezu, hmotnostního toku a hustoty stanovíme rychlost proudění.

$$u_{H_2O} = 0,3 \text{ [m/s]}$$

Nyní spočteme Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{\rho \cdot d_i \cdot u}{\mu} \qquad Re = \frac{995,65 \cdot 0,2093 \cdot 0,3}{0,0007973} = 7840,487 \text{ [-]}$$

Rov. 5.1.10

Nusseltovo číslo zjistíme ze vztahů:

Součinitel tření

$$f = (1,58 \cdot \ln Re - 3,28)^{-2}$$

Rov. 5.1.11

$$f = (1,58 \cdot \ln 7840,487 - 3,28)^{-2} = 0,008435 \text{ [-]}$$

$$Nu = \frac{f/2 \cdot Re \cdot Pr}{1,07 \cdot 12,7 \cdot (f/2)^{1/2} \cdot (Pr^{2/3} - 1)}$$

Rov. 5.1.12

$$Nu = \frac{0,008435/2 \cdot 7840,487 \cdot 5,68}{1,07 \cdot 12,7 \cdot (0,008435/2)^{1/2} \cdot (5,68^{2/3} - 1)} = 65,42 \text{ [-]}$$

Součinitel přestupu tepla na straně vody:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_i} \qquad \alpha_2 = \frac{65,42 \cdot 0,6125}{0,02093} = 1914,687 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{k]}$$

Rov. 5.1.13

V dalším kroku spočteme součinitel prostupu tepla, k tomu potřebujeme znát teplosměnné povrchy

Pro stanovení povrchů potřebujeme znát délku potrubí, tuto hodnotu zjistíme iteračním přepočtem později.

Povrch žeber

$$A_f = N_f \cdot N_t \cdot L \cdot (2 \cdot H_f + \delta_f)$$

Rov. 5.1.14

$$A_f = 12 \cdot 19 \cdot 5,65115 \cdot (2 \cdot 0,01 + 0,0009) = 26,9288 [m^2]$$

Povrch trubek bez žeber

$$A_u = N_t \cdot L \cdot (\pi \cdot d_o - N_f \cdot \delta_f)$$

Rov. 5.1.15

$$A_u = 19 \cdot 5,65115 \cdot (\pi \cdot 0,028042 - 12 \cdot 0,0009) = 8,2993 [m^2]$$

Celkový povrch žebrovaných trubek

$$A_t = A_f + A_u \qquad A_t = 26,9288 + 8,2993 = 35,2282 [m^2]$$

Rov. 5.1.16

Vnitřní povrch trubek

$$A_i = L \cdot S_i \qquad A_i = 5,65115 \cdot 0,0065368 = 7,059 [m^2]$$

Rov. 5.1.17

Dále potřebujeme znát účinnost žebrované plochy

Parametr žebra

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_k}{\delta_f \cdot \lambda_{ocel}}} \qquad m = \sqrt{\frac{2 \cdot 55,51}{0,0009 \cdot 50}} = 49,67 [-]$$

Rov. 5.1.18

Účinnost žebra

$$\eta_f = \frac{\tanh(m \cdot H_f)}{m \cdot H_f} \qquad \eta_f = \frac{\tanh(49,67 \cdot 0,01)}{49,67 \cdot 0,01} = 0,92514 [-]$$

Rov. 5.1.19

Celková účinnost žebrované trubky

$$\eta_o = 1 - (1 - \eta_f) \frac{A_f}{A_t} \qquad \eta_o = 1 - (1 - 0,92514) \frac{27,0835}{35,7176} = 0,94278 [-]$$

Rov. 5.1.20

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\eta_o \cdot \alpha_1} + \frac{A_t \cdot \ln \frac{d_o}{d_i}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L} + \frac{A_t}{A_i \cdot \alpha_2}}$$

Rov. 5.1.21

$$k = \frac{1}{\frac{1}{0,94278 \cdot 55,51} + \frac{35,7176 \cdot \ln \frac{0,028042}{0,02093}}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5,65115} + \frac{35,2282}{7,059 \cdot 1914,687}} = 36,338 [W/m \cdot K]$$

Bilance pracovních médií.

Vstupní teplotu dusíku a teplo, které je třeba odvést, dosadíme z výpočtu ztrát.

$$T_{in} = 60,14 \text{ } ^\circ\text{C} \qquad T_{out} = 35 \text{ } ^\circ\text{C} \qquad Q = 102659,63 \text{ W}$$

U vody známe vstupní teplotu tepelnou kapacitu a hmotnostní průtok, spočteme výstupní teplotu vody. Hmotnostní průtok vody jsme volili pro jednu větev, pro 1/6 přenášeného tepla.

$$T_{out} = T_{in} + \frac{Q}{6 \cdot \dot{m}_{H_2O} \cdot cp}$$

Rov. 5.1.22

$$T_{out} = 30 + \frac{102659,63}{6 \cdot 1,952513 \cdot 4178,556} = 32,097 [^\circ\text{C}]$$

Nyní stanovíme logaritmický teplotní spád

$$\Delta T_1 = T_{N_2 in} - T_{H_2O out} \qquad \Delta T_1 = 62,28 - 32,097 = 28,051 [^\circ\text{C}]$$

$$\Delta T_2 = T_{N_2 out} - T_{H_2O in} \qquad \Delta T_2 = 35 - 30 = 5 [^\circ\text{C}]$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \qquad \Delta T_{ln} = \frac{28,051 - 5}{\ln \frac{30,44}{5}} = 13,366 [^\circ\text{C}]$$

Rov. 5.1.23

Nyní spočteme plochu potřebnou pro přenos tepla

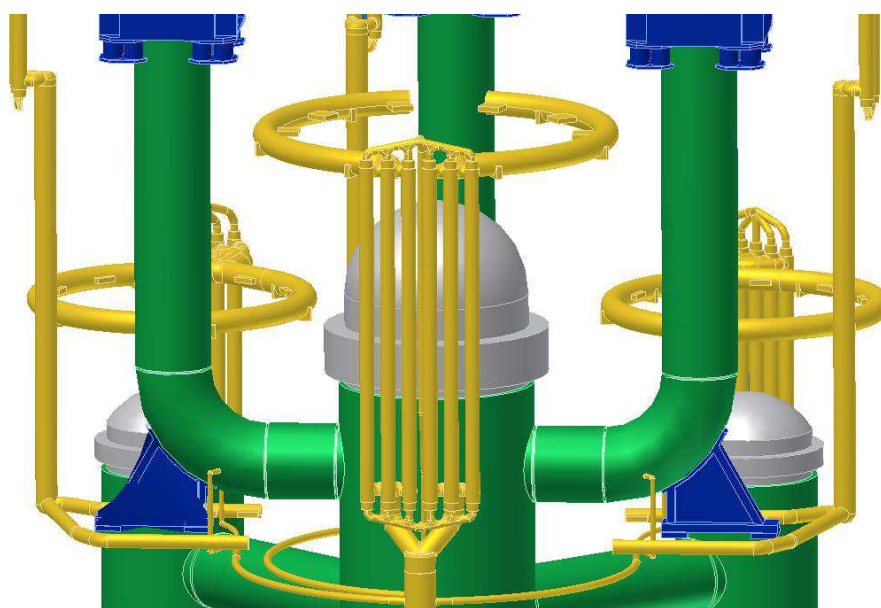
$$A_{celk} = \frac{Q}{k \cdot \Delta T_{ln}} \qquad A_{celk} = \frac{102659,63}{36,338 \cdot 13,366} = 211,36 [m^2]$$

Rov. 5.1.24

Spočteme potřebný počet výměníků

$$N_{vým} = \frac{A_{celk}}{A_t} \qquad N_{vým} = \frac{211,36}{35,2282} = 6 [-]$$

Rov. 5.1.25



obr 18 výměník tlaková nádoba

Počet výměníků jsme si zvolili již při výpočtu průtoku, délku trubek proto zvolíme tak aby platilo $N_{vým}=6$.

Pro ochlazení dusíku z šachty reaktoru zpět na 35°C potřebujeme 6 paralelních výměníků o délce 5,65115 m. Celkový hmotnostní průtok vody je 6x 1,952513 kg/s

Při návrhu výměníků pro odvod tepla od hlavních výměníků a větví DHR použijeme výše popsaný postup.

Výsledné hodnoty.

Hlavní výměníky

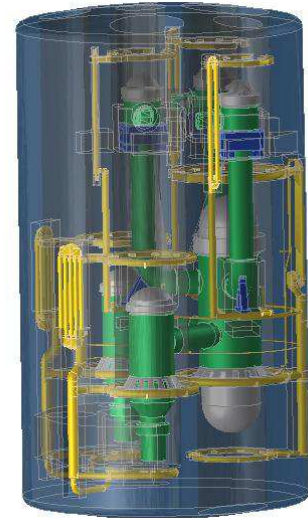
Platí pro jeden okruh celkem jsou 2.

$L = 3,54 \text{ m}$ $N_{\text{vým}} = 5$

Výměníky DHR

Platí pro jeden okruh celkem jsou 3.

$L = 6,435 \text{ m}$ $N_{\text{vým}} = 2$



obr 19 rozmístění výměníků

5.2. Chladicí desky

Jak je patrné z výpočtu tepelných ztrát přibližně 2/3 ztrát jsou ve formě radiace, teplo vyzařované radiací ohřívá okolní stěny odvést toto teplo skrze konvekci proudícím dusíkem je nereálné. Vyzařované teplo proto budeme odvádět skrze ochlazované okolní povrchy.

Povrchy obklopující nezaizolované části reaktoru pokryjeme hliníkovými chladicími deskami, V hliníkových plátech jsou vyfrézovány drážky, kterými vedeme měděné potrubí pro chladicí vodu.

Povrchová teplota chladicí desky je určena rovnováhou mezi teplem přiváděným radiací, teplem odváděným konvekci z povrchu dusíkem a teplem odváděným vodou, výsledné teploty chladicích ploch jsou uvedeny v kapitole 4.



obr 20 chladicí deska

Výpočet odvodu tepla skrze chladicí desku

Pro výpočet prostupu tepla použijeme odporovou metodu, nejprve určíme tepelný odpor pro vedení tepla hliníkovou deskou, následně stanovíme tepelný odpor potrubí a na závěr tepelný odpor konvekce uvnitř trubek. Z odporů jednotlivých desek určíme tepelný odpor celé chladicí plochy.

Množství odváděného tepla spočteme z celkového tepelného odporu a logaritmičeského teplotního spádu mezi povrchem a vodou. Následně měníme povrchovou teplotu, dokud nedosáhneme rovnováhy mezi teplem přivázeným a odvedeným.

Postup výpočtu si ukážeme na chladící ploše 2.4

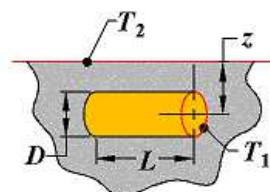
Chladící plocha 2.4 se skládá z 20 desek.

Rozměry

- L 2 m W 0,805 m H 0,07 m λ_{Al} 206 W/m*K
- l 15,168 m z 0,04 m d_1 0,0238 m d_2 0,0318 λ_{Cu} 386 W/m*K
- T_w 47,015°C

Odpor hliníkové desky

Nejprve spočteme tvarový faktor pro vedení tepla mezi povrchem a válcem.



obr 21 tvarový faktor zdroj [11]

$$Sk = \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\cosh^{-1}\left(\frac{2 \cdot z}{d_2}\right)}$$

Rov. 5.2.1

$$Sk = \frac{2 \cdot \pi \cdot 15,168}{\cosh^{-1}\left(\frac{2 \cdot 0,04}{0,0318}\right)} = 94,242461 [-]$$

Odpor hliníkové desky

$$R_{Al} = \frac{1}{Sk \cdot \lambda_{Al}} \qquad R_{Al} = \frac{1}{60,5631 \cdot 206} = 8,015 \cdot 10^{-5} [K/W]$$

Rov. 5.2.2

Odpor měděného potrubí

$$R_{Cu} = \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \lambda_{Cu}} \qquad R_{Cu} = \frac{\ln \frac{0,0318}{0,0238}}{2 \cdot \pi \cdot 15,168 \cdot 386} = 7,87716 \cdot 10^{-6} [K/W]$$

Rov. 5.2.3

Konvektivní odpor

Průtok vody, v případě chlazení tlakové nádoby je hmotnostní tok vody rozdělen na dvě části první vstupuje do plochy 2.6 a je tlačena vzhůru, druhý proud vstupuje do plochy 2.4 a postupuje dolů.

Vlastnosti vody

- Teplota vstup T_{in} 40°C
- Hustota ρ_{H_2O} 992,22 kg/m³
- Dynamická viskozita μ 0,000652979 N*s*m⁻²
- Prandtlovo číslo Pr 4,34
- Tepelná kapacita c_p 4179,545 J/kg*K
- Tepelná vodivost λ 0,6337 W/m*K

Volíme rychlost proudění:

$$u = 0,1 [m/s]$$

Reynoldsovo číslo:

$$Re = 3616,491 [-]$$

Součinitel tření

$$f = (0,79 \cdot \ln Re_D - 1,64)^{-2}$$

Rov. 5.2.4

$$f = (0,79 \cdot \ln 3616,491 - 1,64)^{-2} = 0,0428178 [-]$$

Nusseltovo číslo

$$Nu_{fd} = \frac{\frac{f}{8} \cdot (Re_d - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} \cdot (Pr^{2/3} - 1)}$$

Rov. 5.2.5

$$Nu_{fd} = \frac{\frac{0,0428178}{8} \cdot (3616,491 - 1000) \cdot 4,34}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{0,0428178}{8}\right)^{1/2} \cdot (4,34^{2/3} - 1)} = 29,28886 [-]$$

Součinitel přestupu tepla

$$\alpha = 636,3873 [W/m^2K]$$

Vnitřní povrch trubek

$$S = \pi \cdot d_1 \cdot l$$

$$S = \pi \cdot 0,0238 \cdot 15,168 = 1,13412 \text{ [m}^2\text{]}$$

Rov. 5.2.6

Konvektivní odpor

$$R_k = \frac{1}{\alpha \cdot S}$$

$$R_k = \frac{1}{636,3873 \cdot 1,13412} = 0,00138554 \text{ [K/W]}$$

Rov. 5.2.7

Celkový odpor

$$R = R_{Al} + R_{Cu} + R_k$$

Rov. 5.2.8

$$R = 8,015 \cdot 10^{-5} + 7,87716 \cdot 10^{-6} + 0,00138554 = 0,001473571 \text{ [K/W]}$$

Známe tepelný tok dopadající na povrch desky

$$Q_{2.4 \text{ celk}} = \frac{Q_{1.4-2.4} + Q_{1.5-2.4} + Q_{1.6-2.4} + Q_{1.7-2.4} - Q_{k2.4}}{20}$$

Rov. 5.2.9

$$Q_{2.4 \text{ celk}} = \frac{24717,9 + 15661,46 + 3027,68 + 464,3 - 326,375}{20} = 2177,24 \text{ [W]}$$

Z přivedeného tepla a hmotnostního průtoku spočteme výstupní teplotu vody, deskou vedou dvě paralelní trubky proto počítáme dvojnásobný průřez.

$$\dot{m}_{H_2O} = 2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_1^2 \cdot \rho \cdot u$$

Rov. 5.2.10

$$\dot{m}_{H_2O} = 2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0,0238^2 \cdot 992,22 \cdot 0,1 = 0,08828428 \text{ [kg/s]}$$

Spočteme výstupní teplotu vody

$$T_{out} = T_{in} + \frac{Q}{\dot{m}_{H_2O} \cdot cp}$$

$$T_{out} = 40 + \frac{2177,24}{0,08828 \cdot 4179,5458} = 45,9 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Rov. 5.2.11

Nyní stanovíme logaritmický teplotní spád

$$\Delta T_1 = T_w - T_{H_2O \text{ in}} \quad \Delta T_1 = 47,015 - 40 = 7,015 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta T_2 = T_w - T_{H_2O \text{ out}} \quad \Delta T_2 = 47,015 - 45,9 = 1,115 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad \Delta T_{ln} = \frac{37,015 - 1,115}{\ln \frac{7,015}{1,115}} = 3,2084 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Rov. 5.2.12

Spočteme teplo odváděné vodou

$$Q_{odv} = \frac{\Delta T_{ln}}{R} \quad Q_{odv} = \frac{3,2084}{0,001473571} = 2177,24 \text{ [W]}$$

Rov. 5.2.13

Rovnováhy mezi teplem přivedeným a odvedeným docílíme změnami teploty povrchu.

U ostatních chladících ploch použijeme analogický postup.

6. Závěr

Cílem práce bylo stanovit tepelné ztráty reaktoru GFR a navrhnout způsob odvodu tepla. Z analýzy tepelných ztrát je patrné, že hlavním zdrojem tepelných ztrát je radiace, to je způsobeno vysokou povrchovou teplotou ve spojení s vysokou emisivitou materiálu.

Při výpočtu tepelných ztrát byly tělesa reaktoru rozděleny na několik úseků, toto dělení nám umožnilo dosáhnout přesnějších hodnot, neboť na závěr každého úseku jsme získali aktualizovanou teplotu chladícího média, z níž jsme určili termodynamické vlastnosti pro další úsek. Při určování tepelných ztrát jsme se zaměřili hlavně na stanovení tepelných toků radiací na jednotlivé povrchy obklopující reaktor.

V poslední části jsme se zabývali způsoby odvodu tepla, ty jsme si rozdělili na odvod tepla konvekcí a radiací. Odvod tepla konvekcí byl řešen klasickým trubkovým výměníkem, který byl zvolen z důvodů nejefektivnějšího využití volného prostoru.

Odvod tepla radiací je řešen pomocí vodou chlazených hliníkových desek, množství tepla dopadající na tyto povrchy jsme určili v rámci analýzy ztrát, iteračními postupy jsme stanovily teploty povrchů desek.

Teplota uvnitř tlakové obálky dosahuje maximálně 66,41°C.

Seznam použité literatury

- [1] Gas cooled fast reactor research in Europe
Richard Stainsby, Karen Peers, Colin Mitchell, Christian Poette, Konstantin Mikityuk, Joe Somers
- [2] Gas-cooled fast reactor (GFR): overview and perspectives
P. Anzieu, R. Stainsby and K. Mikityuk
- [3] The ALLEGRO project – European project of fast breeder reactor
1st International Nuclear Energy Congress
- [4] Influence of moderately elevated temperatures on engineering properties of concrete used for nuclear reactor vaults
S. Divya Rani, Manu Santhanam
- [5] Vliv vysokých teplot na strukturu betonu použitého při výstavbě kontejmentu jaderného reaktoru.
Pavla Razímová
- [6] High performance concrete under elevated temperatures
Abdullah Huzeyfe Akca, Nilüfer Özyurt Zihnioğlu
- [7] Fundamentals of Heat and Mass Transfer Incopera, 6th-edition
Incopera, DeWitt, Bergman, Lavine
- [8] Heat Exchangers Selection, Rating and Thermal Design, 2th edition
Sadık Kakaç, Hongtan Liu
- [9] http://www.peacesoftware.de/einigewerte/stickstoff_e.html
Online kalkulátor vlastností dusíku
- [10] <http://www.thermalradiation.net/>
Online katalog a kalkulátor úhlových faktorů
- [11] http://www.engineeringarchives.com/ref_heatxfer_conductionshapefactors.html

Seznam zkratek

S	[m ²]	Povrch, Průřez
D, d	[m]	Průměr
L, l	[m]	Délka
δ	[m]	Tloušťka
T	[°C, K]	Teplota (w povrchu, 1 vnitřní stěny, ∞ prostředí)
β	[K ⁻¹]	Součinitel teplotní roztažnosti
μ	[kg.m.s]	Dynamická viskozita
ν	[m ² s]	kinematická viskozita
λ	[W/m.K]	tepelná vodivost
Pr	[-]	Prandtlovo číslo
Gr	[-]	Grashofovo číslo
Ra	[-]	Rayleighovo číslo
Nu	[-]	Nusseltovo číslo
α	[W/m ² .K]	Součinitel přestupu tepla (konvekcí/radiací)
k	[W/m.k]	Součinitel prostupu tepla
Q	[W]	Teplo
dh	[m]	Hydraulický průřez
u	[m/s]	Rychlost proudění
\dot{m}	[kg/s]	Hmotnostní tok
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
x	[m]	Délka vstupního úseku
a	[m]	Poloměr, vzdálenost
r	[m]	Poloměr
ξ	[rad]	Úhel
F _{x-y}	[-]	Radiační úhlový faktor mezi povrchy x y
f	[-]	Součinitel tření
N _{x,n_x}	[-]	Počet x (žebek, trubek, výměníků)
P	[m]	Obvod
A	[m]	Povrch
h	[m]	Výška
m	[-]	Parametr žebra
R _x	[K/W]	Tepelný odpor
σ	[W/m ² .K ⁴]	Stefan-Boltzmanova konstanta
ε	[-]	Emisivita

Seznam obrázků

obr 1 schéma GFR	17
obr 2 GFR 2400	17
obr 4 MOX zóna s testovaným keramickým palivem	18
obr 3 Demostrátor GFR	18
obr 5 Budova reaktoru ALLEGRO	19
obr 6 částečná izolace	33
obr 7 částečná izolace uložení	33
obr 9 rozdělení tlakové nádoby na části	34
obr 8 částečná izolace uložení 2	34
obr 10 úhlový součinitel koule-válec	38
obr 11 úhlový součinitel koule-deska	39
obr 12 úhlový součinitel válec-válec	40
obr 13 úhlový součinitel dvě nekonečně dlouhé desky	51
obr 14 úhlový součinitel válec-disk	51
obr 15 úhlový faktor přesahující válec	54
obr 16 úhlový součinitel válec disk.....	64
obr 17 držák výměníku DHR.....	70
obr 18 výměník tlaková nádoba	80
obr 19 rozmístění výměníků	81
obr 20 chladicí deska	81
obr 21 tvarový faktor.....	82

Seznam příloh

Příloha 1	Prostorové řešení chladicího systému
Příloha 2	Výpočet v MS Excel