

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra jaderných reaktorů
Studijní program: Jaderné inženýrství
Specializace: Jaderné reaktory



Využití efektivního součinitele
tepelné vodivosti vyhořelého
palivového souboru pro výpočet
teplotního pole v obalovém souboru

Use of spent fuel assembly effective thermal
conductivity coefficient for cask
temperature field calculations

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracoval: Bc. Štefan Račák
Vedoucí práce: Ing. Dušan Kobyłka, Ph.D.
Rok: 2022



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student:	Bc. Štefan Račák
Studijní program:	Jaderné inženýrství
Specializace:	Jaderné reaktory
Název práce česky:	Využití efektivního součinitele tepelné vodivosti vyhořelého palivového souboru pro výpočet teplotního pole v obalovém souboru
Název práce anglicky:	Use of spent fuel assembly effective thermal conductivity coefficient for cask temperature field calculations

Pokyny pro vypracování:

1. Na modelech vytvořených v kódu ANSYS v rámci výzkumného úkolu proveďte podrobnou analýzu vlivu nastavení radiačního sdílení tepla ve vyhořelých palivových souborech VVER-440 a VVER-1000 na výsledky výpočtů. Analýzu provádějte na modelech s vakuem.
2. Na základě analýz s vytvořenými modely upřesněte efektivní součinitele tepelné vodivosti získané ve výzkumném úkolu pro vyhořelé palivové soubory vyplněné heliem. Proveďte analýzu vlivu volby referenční teploty (střední teplota v souboru a teplota na hranici souboru) na efektivní součinitel tepelné vodivosti vyhořelých palivových souborů.
3. Vytvořte v kódu ANSYS podrobný 2D model hypotetického obalového souboru pro VJP typu VVER-440 nebo VVER-1000 a proveďte na něm výpočty teplotního pole.
4. Vytvořte v kódu ANSYS zjednodušený model hypotetického obalového souboru pro VJP typu VVER-440 nebo VVER-1000 s použitím efektivního součinitele tepelné vodivosti a proveďte na něm výpočty maximální teploty. Analyzujte a srovnajte výsledky provedené na modelech z bodů 3 a 4 a vyvoďte z nich závěry z hlediska správné interpretace výsledků dosahovaných na jednoduchém modelu s efektivním součinitelem tepelné vodivosti.

Doporučená literatura:

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Storage of Spent Nuclear Fuel, IAEA Safety Standards Series No. SSG-15 (Rev. 1)*. Vienna: IAEA, 2020. ISBN: 978-92-0-119320-9.
- [2] ANSYS, Inc. *ANSYS Fluent Theory Guide, 2021R1*. Dokumentace a materiály k systému.
- [3] LI, J. a Y. Y. LIU. Thermal modeling of a vertical dry storage cask for used nuclear fuel. *Nuclear Engineering and Design*. 2016, **301**. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2016.01.008. ISSN: 0029-5493.
- [4] HALL, K., G. ZIGH a K. SOLIS. *CFD Validation of Vertical Dry Cask Storage System*. NUREG/CR-7260, Holden, MA: Alden Research Laboratory, Inc. 2019
- [5] SHUKLA, P. K. et al. *Thermal modeling of a storage cask system: capability development*. San Antonio, TX: Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses. 2007.

Jméno a pracoviště vedoucího práce:

Ing. Dušan Kobyłka, Ph.D.

KJR FJFI ČVUT v Praze

Datum zadání diplomové práce:

18. 10. 2021

Datum odevzdání diplomové práce:

2. 5. 2022

Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.

V Praze dne 18. 10. 2021

doc. Ing. Tomáš Trojek, Ph.D.



Garant studijního programu

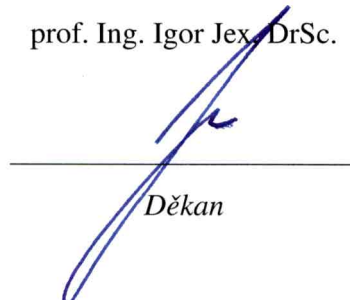
Ing. Jan Rataj, Ph.D.



Vedoucí katedry



prof. Ing. Igor Jex, DrSc.



Děkan

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som svoju diplomovú prácu vypracoval samostatne a použil som len podklady (literatúru, projekty, software atď.) uvedené v priloženom zozname.

V Prahe dňa

.....
Bc. Štefan Račák

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu práce Ing. Dušanovi Kobylkovi, Ph.D. za odbornú pomoc a cenné rady pri tvorbe tejto diplomovej práce.

Bc. Štefan Račák

Název práce:

Využití efektivního součinitele tepelné vodivosti vyhořelého palivového souboru pro výpočet teplotního pole v obalovém souboru

Autor: Bc. Štefan Račák

Studijní program: Jaderné inženýrství

Specializace: Jaderné reaktory

Druh práce: Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Dušan Kobyłka, Ph.D.

Katedra jaderných reaktorů, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, České vysoké učení technické v Praze

Abstrakt: Diplomová práce sa zaoberá zjednodušením výpočtov teplotných polí vo vyhorených palivových súboroch a obalových súboroch počas suchého skladovania. K výpočtom bol použitý CFD výpočtový kód ANSYS Fluent. V práci je uvažované zdieľanie tepla aj pomocou tepelnej radiácie a jej modelovanie môže viesť k nepresným výsledkom. Z toho dôvodu je potrebné realizovať overenie nastavenia použitého modelu Discrete ordinates. Z výpočtov teplotných polí v palivových súboroch typu VVER 440 a VVER 1000 boli stanovené ich efektívne súčinitele tepelnej vodivosti. Pomocou týchto súčiniteľov je možné nahradiť palivové súbory homogénnym pevným materiálom, v ktorom sa rovnomerne generuje teplo a odvod tepla je len pomocou kondukcie. Homogénne palivové súbory boli použité pri výpočtoch teplotných polí v hypotetickom obalovom súbore a bola sledovaná maximálna teplota palivového pokrytia. Ďalej bolo overené, či je možné takto nahradiť aj celý nosný kôš obalového souboru spolu s palivovými súbormi a za akých podmienok.

Klíčová slova: vyhorené jadrové palivo, efektívny súčiniteľ tepelnej vodivosti, maximálna teplota pokrytia, obalový súbor, CFD

Title:

Use of spent fuel assembly effective thermal conductivity coefficient for cask temperature field calculations

Author: Bc. Štefan Račák

Abstract: The master thesis focuses on the simplification of temperature field calculations in spent nuclear fuel assemblies and storage casks during dry storage. The CFD calculation code ANSYS Fluent was used for the calculations. In this thesis, heat transfer by thermal radiation is also considered and its modelling can lead to inaccurate results. For this reason, it is necessary to verify the settings of the Discrete ordinates model, that is used. From the calculations of temperature fields of VVER 440 and VVER 1000 type fuel assemblies, their effective thermal conductivities were determined. With the help of these coefficients, it is possible to replace fuel assemblies with a homogeneous solid material, in which heat is uniformly generated and transferred only by conduction. Homogeneous fuel assemblies were used to calculate the temperature fields in the hypothetical storage cask and the peak cladding temperature was calculated. It was verified whether it is possible to replace the entire fuel basket together with the fuel assemblies with homogenous material and under what conditions.

Key words: spent nuclear fuel, effective thermal conductivity, peak cladding temperature, storage cask, CFD

Obsah

Úvod	16
1 Modelovanie tepelnej radiácie	18
1.1 Surface to Surface model tepelnej radiácie	18
1.2 Overenie modelu numerickým výpočtom	20
1.3 Overenie modelu analytickým výpočtom	23
1.4 Vplyv výpočtovej siete na DO model	25
2 Úprava stanovených ESTV	27
2.1 Súčiniteľ tepelnej vodivosti plynov	27
2.2 Súčiniteľ tepelnej vodivosti hélia	28
2.3 Výpočet s presnou geometriou PS	30
2.3.1 Geometria a výpočtová sieť	30
2.3.2 Materiály	33
2.3.3 Hraničné podmienky a nastavenia	34
2.3.4 Výsledky výpočtov PS s presnou geometriou	35
2.4 Stanovenie ESTV	38
2.4.1 Efektívny súčiniteľ tepelnej vodivosti	39
2.4.2 Overenie stanovenia ESTV	43
3 Tepelné výpočty v obalovom súbore	46
3.1 Obalový súbor	46
3.2 Tvorba geometrie a výpočtovej siete	48
3.3 Materiály	51
3.4 Hraničné podmienky a nastavenia	52
3.4.1 Užívateľom definované funkcie	53
3.5 Výsledky výpočtov v OS	56
3.6 Výpočet s heterogénnou vsádzkou	60
4 ESTV nosného koša	63
4.1 Geometria a výpočtová sieť	63
4.2 Hraničné podmienky a nastavenia	65
4.3 Stanovenie ESTV	66
Záver	71
Literatúra	75

Prílohy	76
A Výpočty v PS	77
A.1 Materiály	77
A.2 Výsledky výpočtov v PS	79
B Užívateľom definovaná funkcia	82
B.1 UDF pre výpočet v obalovom súbore	82

Zoznam skratiek

Skratka	Význam
2D	Dvojrozmerný
3D	Trojrozmerný
AZ	Aktívna zóna
DO	Discrete ordinates
ESTV	Efektívny súčiniteľ tepelnej vodivosti
HG	Homogénna geometria
KO	Kvalita ortogonalita (Orthogonal quality)
NK	Nosný kôš
OS	Obalový súbor
PCT	Maximálna teplota palivového pokrytia (Peak cladding temperature)
PG	Presná geometria
PP	Palivový prútik
PS	Palivový súbor
PST	Pomer strán (Aspect ratio)
RHTR	Radiation heat transfer rate
S2S	Surface to Surface
SIR	Surface incident radiation
SK	Šikmosť (Skewness)
UDF	Užívateľom definovaná funkcia
VJP	Vyhorené jadrové palivo
ZTV	Zvyškový tepelný výkon

Zoznam veličín

Veličina	Význam	Jednotka
c_p	Izobarická merná tepelná kapacita	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
c_V	Izochorická merná tepelná kapacita	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
d	Priemer	m
F	Koeficient osálenia	-
l	Stredná voľná dráha	m
L_a	Aktívna dĺžka	m
M	Molová hmotnosť	$\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$
N	Počet	-
q	Hustota tepelného toku	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
q_V	Merný tepelný výkon	$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$
\dot{Q}	Tepelný výkon	W
r	Polomer	m
R_m	Molová plynová konštanta	$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$
S	Obsah	m^2
T	Termodynamická teplota	K
V	Objem	m^3
\bar{w}	Stredná rýchlosť	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
α	Absorptancia	-
ε	Emisivita	-
λ	Súčiniteľ tepelnej vodivosti	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
ρ	Hustota	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ϱ	Odrazivosť	-
Φ	Tepelný radiačný tok	W

Zoznam indexov

Index	Význam
eff	Efektívny
H	Vzťahujúci sa k hranici
in	Dopadajúci
mean	Priemerný
NK	Vzťahujúci sa k nosnému košu
out	Odchádzajúci
w	Hraničný

Zoznam tabuliek

1.1	Parametre kvality sietí	22
1.2	Hraničné podmienky pre porovnanie modelov tepelnej radiácie	22
1.3	Porovnanie S2S a DO modelu pre sústredné valce	22
1.4	Porovnanie S2S a DO modelu pre valce vedľa seba	23
1.5	Porovnanie S2S a DO modelu s analytickým výpočtom pre sústredné valce	25
1.6	Vplyv hustoty výpočtovej siete na výpočet so sústrednými valcami	25
2.1	Porovnanie súčiniteľa tepelnej vodivosti hélia pri rôznych tlakoch	29
2.2	Vlastnosti palivového súboru a prútku pre oba PS	31
2.3	Parametre kvality výpočtovej siete pre PS Gd-2M+	31
2.4	Parametre kvality výpočtovej siete pre PS TVSA-T	33
2.5	Emisivity jednotlivých materiálov	35
2.6	Použitie ZTV palivového súboru a prepočítané objemové výkony	35
2.7	Parametre kvality výpočtovej siete pre homogénny PS Gd-2M+	38
2.8	Parametre kvality výpočtovej siete pre homogénny PS TVSA-T	38
2.9	Prepočítané merné objemové výkony homogénneho PS	39
2.10	Koeficienty a_i pre ESTV v závislosti na hraničnej teplote	40
2.11	Porovnanie pôvodného a opraveného ESTV pre PS Gd-2M+ stanoveného v závislosti na hraničnej teplote	40
2.12	Porovnanie pôvodného a opraveného ESTV pre PS TVSA-T stanoveného v závislosti na hraničnej teplote	40
2.13	Koeficienty a_i pre ESTV v závislosti na priemernej teplote	42
2.14	Porovnanie vypočítaných PCT s presnou a homogénnou geometriou PS pri ZTV 250 W (Gd-2M+) a 700 W (TVSA-T)	45

3.1	Siete vytvorené pre citlivostnú analýzu vplyvu výpočtovej siete k výpočtu s NK	50
3.2	Výpočet súčiniteľa tepelnej vodivosti hypotetického nosného koša . . .	52
3.3	Celkové výkony v OS, výkony v jednom PS a prepočítané merné objemové výkony v jednom homogénnom PS	52
3.4	Porovnanie výpočtov pre verifikáciu UDF	56
3.5	Výsledky výpočtov teplotných polí v nosnom koši pre tri ZTV	58
3.6	Rozloženie výkonov v jednotlivých PS pri heterogénnej vsádzke	61
3.7	Vypočítané maximálne teploty v Kelvinoch v jednotlivých PS	62
4.1	Siete vytvorené pre citlivostnú analýzu k výpočtu s homogénnym NK . . .	64
4.2	Prepočítaný výkon OS na merný objemový výkon	66
4.3	Vypočítané efektívne súčinitele tepelnej vodivosti pre nosný kôš v závislosti na hraničnej teplote a ZTV	68
A.1	Parametre kvality siete a ich možné a odporúčané hodnoty	77
A.2	Koeficienty súčiniteľa tepelnej vodivosti, hustoty a izobarickej mernej tepelnej vodivosti pre UO_2 pri vyhorení 45 MWd/kgU v závislosti na teplote.	77
A.3	Koeficienty súčiniteľa tepelnej vodivosti, hustoty a izobarickej mernej tepelnej vodivosti zliatinu E110 pri vyhorení 45 MWd/kgU a pre nevyhorené zliatiny E110 a E125 v závislosti na teplote.	78
A.4	Koeficienty súčiniteľa tepelnej vodivosti, hustoty a izobarickej mernej tepelnej vodivosti pre hélium v závislosti na teplote.	78
A.5	Porovnanie vypočítaných PCT z pôvodných výpočtov a z opravených pre PS Gd-2M+ v závislosti na hraničnej teplote	79
A.6	Porovnanie vypočítaných PCT z pôvodných výpočtov a z opravených pre PS TVSA-T v závislosti na hraničnej teplote	80
A.7	Vypočítané hodnoty ESTV vo $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ pre Gd-2M+ s porovnaním s pôvodnými výpočtami a priemerná teplota v homogénnom PS (T_{mean})	80
A.8	Vypočítané hodnoty ESTV vo $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ pre TVSA-T s porovnaním s pôvodnými výpočtami a priemerná teplota v homogénnom PS (T_{mean})	81

Zoznam obrázkov

1.1	Príklad geometrie a výpočtovej siete pre sústredné valce.	21
1.2	Príklad geometrie a výpočtovej siete pre valce vedľa seba.	21
2.1	Porovnanie súčiniteľa tepelnej vodivosti hélia pre dva rôzne tlaky . . .	29
2.2	Porovnanie pôvodného súčiniteľa tepelnej vodivosti s novým	30
2.3	Model PS Gd-2M+ s presnou geometriou	32
2.4	Model PS TVSA-T s presnou geometriou	32
2.5	Súčiniteľ tepelnej vodivosti UO ₂ pri vyhorení 45 MWd/kgU	34
2.6	Súčinitele tepelnej vodivosti vyhorenej E110 pri 45 MWd/kgU a ne- vyhorených zliatin E110 a E125	34
2.7	Vypočítaný teplotný profil PS Gd-2M+ pre výkon 250 W a hraničnú teplotu 473,15 K	36
2.8	Vypočítaný teplotný profil PS TVSA-T pre výkon 700 W a hraničnú teplotu 473,15 K	37
2.9	Rozdiel medzi PCT a T_w pre PS Gd-2M+ a jeho dva výkony	37
2.10	Rozdiel medzi PCT a T_w pre PS TVSA-T a jeho dva výkony	37
2.11	Porovnanie pôvodného a opraveného ESTV pre PS Gd-2M+ stano- veného v závislosti na hraničnej teplote	41
2.12	Porovnanie pôvodného a opraveného ESTV pre PS TVSA-T stano- veného v závislosti na hraničnej teplote	41
2.13	ESTV stanovený v závislosti na priemernej teplote v homogénnom palivovom súbore Gd-2M+	42
2.14	ESTV stanovený v závislosti na priemernej teplote v homogénnom palivovom súbore TVSA-T	43
2.15	Porovnanie poklesu teploty v PS pri ZTV 250 W a T_w 473,15 K s presnou a homogénnou geometriou pre Gd-2M+	44
2.16	Porovnanie poklesu teploty v PS pri ZTV 700 W a T_w 473,15 K s presnou a homogénnou geometriou pre TVSA-T	44

3.1	Radiálny rez nosným košom obalového súboru ŠKODA 1000/19	47
3.2	Nosný kôš obalového súboru CASTOR 1000/19	48
3.3	Radiálny rez košom OS s použitou 1/6 symetriou	49
3.4	Citlivostná analýza výpočtovej siete	51
3.5	Geometria a výpočtová sieť pre verifikáciu UDF	55
3.6	Pokles teploty v obdĺžniku	55
3.7	ESTV palivových súboroch pri výpočte so ZTV 700 W a hraničnej teploty 423,15 K	57
3.8	Teplotný profil nosného koša s PS pri troch výkonoch PS a hraničnej teploty 423,15 K	58
3.9	Vypočítané teplotné pole nosného koša s PS pri troch výkonoch PS a hraničnej teploty 423,15 K	59
3.10	Rozdiel medzi maximálnou a hraničnou teplotou vo výpočtovej oblasti v závislosti na hraničnej teploty pre tri výkony	60
3.11	Radiálny rez košom OS s použitou 1/6 symetriou a s označenými pozíciami palivových súborov	61
3.12	Teplotný profil nosného koša s PS pri dvoch rozloženiach výkonu v PS a hraničnej teploty 423,15 K	62
4.1	Citlivostná analýza výpočtovej siete pre homogénny NK	65
4.2	Vypočítané ESTV pre nosný kôš s PS v závislosti na výkone a hraničnej teploty	66
4.3	Teplotný profil homogénneho nosného koša s PS pri troch výkonoch OS (prepočítaných na 1 PS) a hraničnej teploty 423,15 K	67
4.4	Porovnanie teplotných profilov nosného koša s PS pred a po nahradení homogénnym materiálom pri výkone 700 W (1 PS) a hraničnej teploty 423,15 K	68
4.5	Vypočítané teplotné pole homogénneho nosného koša s PS pri troch výkonoch PS a hraničnej teploty 423,15 K	69

Úvod

V Českej republike a na Slovensku je aktuálne v prevádzke 10 reaktorov a v každom z nich vzniká vyhorené jadrové palivo. To je skladované v medziskladoch, pričom v ČR sa používa suché skladovanie a na Slovensku mokré. Počas celej doby musí byť s palivovými súbormi bezpečne zaobchádzané, aby nedošlo k ich poškodeniu a úniku rádioaktívnych izotopov do prostredia. K tomu slúži niekoľko bezpečnostných limit, medzi ktoré patrí aj maximálna teplota palivového pokrytia. Tú je možné overiť pomocou tepelných analýz.

Táto diplomová práca sa zaoberá problematikou výpočtov teplotných polí vo vyhorených palivových súboroch počas suchého skladovania v obalových súboroch. Výpočty teplotných polí sú dôležité nielen z hľadiska bezpečnej prevádzky medziskladov, ale slúžia aj napríklad k samotnému návrhu konštrukcie obalových súborov, medziskladov alebo aj pre výber použitých materiálov. Dnešné výpočtové kódy dokážu už pracovať so zložitou konštrukciou palivových, resp. obalových, súborov, ale takéto výpočty sú náročné na výpočtový výkon a čas. Z tohto dôvodu je potrebné použiť zjednodušenia. Je nutné ale dať pozor na to, aby nedošlo k nepresným výsledkom a k modelovacím chybám.

Medzi jeden z najpoužívanejších prístupov pre tepelné analýzy patrí CFD. Pre výpočty v tejto práci bude použitá skupina programov ANSYS a výpočtový kód ANSYS Fluent, ktorý patrí medzi najrozšírenejšie v oblasti modelovania prúdenia a zdieľania tepla. Ako už bolo vyššie spomenuté, často je potrebné pristupovať pri výpočtoch k zjednodušeniam. Jedným z nich je model efektívneho súčiniteľa tepelnej vodivosti, ktorý nahradí počítanú geometriu homogénnym pevným materiálom, v ktorom je možné nastaviť aj generovanie tepelného výkonu. Šírenie tepla v takomto materiáli je len pomocou kondukcie a kondukcia rôznymi konštrukčnými materiálmi, tepelná radiácia a poprípade konvekcia sú zahrnuté v efektívnom súčiniteľovi. Tento model značne zjednoduší modelovanie geometrie a samozrejme aj nároky na výpočtový výkon.

K stanoveniu efektívneho súčiniteľa tepelnej vodivosti je potrebné realizovať niekoľko výpočtov teplotných polí s tzv. presnou geometriou. To znamená, že autor si vyberie, ktorá časť modelovanej geometrie bude nahradená (napríklad pri výpočtoch v obalovom súbore sa často nahradzujú jednotlivé palivové súbory) a vykoná výpočty s danou časťou pre niekoľko hraničných podmienok (napríklad hraničná teplota, tepelný výkon). Rovnako tak môže byť zahrnuté napr. zdieľanie tepla tepelnou radiáciou. Pri tvorbe modelu s presnou geometriou je potrebné dbať na to, aby boli správne zadané hraničné podmienky a nastavenia, aby nedošlo k modelova-

cím chybám. Z tohto dôvodu sa realizujú citlivostné analýzy a porovnania výpočtov s experimentami, analytickými alebo numerickými výpočtami pomocou rozdielnych kódov.

Cieľom tejto diplomovej práce je spresnenie stanovených efektívnych súčiniteľov tepelnej vodivosti pre palivové súbory typu VVER 440 a VVER 1000, ktoré boli vyvíjané v autorovej výskumnej úlohe. Homogénny palivový súbor typu VVER 1000 bude následne použitý pri modelovaní teplotného poľa hypotetického nosného koša obalového súboru. Na základe týchto výpočtov je potrebné stanoviť limity použitia efektívneho súčiniteľa tepelnej vodivosti. Hlavne, či je možné ho použiť aj pri nahradení celého nosného koša spolu s palivovými súbormi bez toho, aby nedošlo k nepresnostiam výsledkov a modelovacím chybám.

Kapitola 1

Modelovanie tepelnej radiácie

Vo výskumnej úlohe [21] boli zostavené efektívne súčinitele tepelnej vodivosti (ESTV) pre palivové súbory (PS) Gd-2M+ a TVSA-T počas doby skladovania, resp. ukladania, vyhoreného jadrového paliva (VJP). Boli realizované výpočty pre výplňové plyny hélium, dusík a vákuum, pre tri vyhorenia (30, 45 a 55 MWd/kgU) a štyri výkony PS. Z výsledkov vyplynulo, že vyhorenie má zanedbateľný vplyv na zostavenie ESTV. Vplyv výkonu bol najvýraznejší pri vákuu, ale pre účely práce bol tento vplyv pre všetky výplňové plyny zanedbaný. Bola ukázaná najväčšia závislosť na teplote.

Nahradenie vyhoreného PS homogénnym materiálom s ESTV bolo najmenej presné vo vákuu, kedy sa vypočítané maximálne teploty palivového pokrytia (PCT) medzi homogénnou geometriou (HG) a presnou geometriou (PG) líšili najviac (pri najnižších uvažovaných hraničných teplotách aj o viac ako 100 K). Tepelná radiácia bola modelovaná pomocou Discrete ordinates (DO) modelu, v ktorom je možné nastaviť pixeláciu a diskretizáciu. Z toho dôvodu bude realizované overenie správnosti nastavenia výpočtov. K tomu je možné použiť porovnanie vypočítaných hodnôt s analytickým výpočtom, s experimentom alebo s iným numerickým výpočtom. Experimentálne overenie nebolo v práci predpokladané, a preto sa použilo porovnanie s analytickým (v špecifickom prípade) a numerickým výpočtom. V rámci tejto práce boli pre modelovanie tepelnej radiácie použité dva numerické modely, a to DO (overovaný model) a Surface to Surface (S2S). DO model bol popísaný v [21], a preto bude realizovaný popis len modelu S2S. Hlavným zdrojom informácií v tejto kapitole je manuál k skupine programov ANSYS [2].

1.1 Surface to Surface model tepelnej radiácie

S2S model je vhodný k modelovaniu tepelnej radiácie medzi dvomi telesami, pričom médium, ktoré sa nachádza medzi týmito telesami neovplyvňuje radiáciu. Výpočet pomocou tohto modelu je možné rozdeliť na dve časti, a to na výpočet koeficientov osálenia a na samotný výpočet spolu s rovnicou zákona zachovania energie. Koeficienty osálenia sú geometrické funkcie, v ktorých sú započítané závislosti zdieľania tepla medzi dvomi povrchmi na ich rozmeroch, vzájomnej vzdialenosti

a orientácii.

Základné obmedzenia pre S2S model sú:

- všetky plochy sú difúzne,
- predpokladá sa, že všetky povrchy sú šedé,
- nie je možné modelovať transmitanciu,
- neberie sa v úvahu absorpcia, emisia a rozptyl radiácie (tie sú obsiahnuté vo výpočtoch koeficientov osálenia),
- nie je možné ho použiť pri riešení problémov, ktoré obsahujú periodickú alebo symetrickú hraničnú podmienku,
- emisivita a absorptancia sa rovnajú a sú nezávislé na vlnovej dĺžke,
- reflektancia je nezávislá na smere dopadajúceho, resp. odrazeného lúča.

Energia, ktorá je vyžiarená z daného povrchu, sa skladá z emitovanej energie (podľa Stefan-Boltzmannovho zákona) a odrazenej energie. Číže je závislá aj na dopadajúcej energii na povrch. Vyžiarenú hustotu toku energie je možné vyjadriť ako

$$q_{\text{out},k} = \varepsilon_k \cdot \sigma \cdot T_k^4 + \varrho_k \cdot q_{\text{in},k}, \quad (1.1)$$

kde ε_k je emisivita, σ je Stefan-Boltzmannová konštanta, ϱ_k je odrazivosť, $q_{\text{in},k}$ je hustota energie, ktorá dopadá na teleso. Tá sa dá pomocou koeficientov osálenia zapísať vzťahom

$$q_{\text{in},k} = \sum_{j=1}^N F_{kj} \cdot q_{\text{out},j}. \quad (1.2)$$

$q_{\text{out},j}$ je potom hustota energie vyžiarená z povrchu j a F_{kj} je koeficient osálenia medzi povrchmi k a j .

K výpočtu koeficientov osálenia je pre dvojrozmerný problém na výber len metóda sledovania lúčov (angl. ray tracing method). K výpočtu koeficientov osálenia ju je možné použiť pomocou implementácie v simulácii Monte Carlo. Zjednodušene sa jedná o vyžiarovanie veľkého počtu lúčov z náhodného bodu na povrchu rôznymi smermi (buď v 3D alebo v 2D) do prostredia. Sleduje sa dopad lúčov na ostatné povrchy. Koeficient osálenia z povrchu A na povrch B je teda pomerom dopadajúcich lúčov na povrch B k lúčom vyžiarených z povrchu A. Najväčšou výhodou tejto metódy k numerickému určeniu koeficientov je jej nezávislosť na zložitosti geometrie. Najväčšie dva vplyvy na presnosť výpočtu, na ktoré je nutné dbať, je rozdelenie náhodných bodov, z ktorých sú lúče vyžarované a rozdelenie náhodných smerov do prostredia.[29] V prípade dvojrozmerného výpočtu tepelnej radiácie pomocou S2S modelu vo výpočtovom kóde Fluent je táto metóda jedinou možnou a je implementovaná v nastavení modelu. Pri riešení tepelnej radiácie v trojrozmerných problémoch je pre výpočet koeficientov osálenia ešte na výber metóda hemicube.

V porovnaní s DO modelom, je S2S model menej náročný na výpočtový výkon, čiže jednotlivé iterácie zaberú kratší čas. Na druhú stranu, výpočet koeficientov

osálenia môže byť náročný na výkon, čo závisí od nastavenia ich výpočtu. Rovnako aj typ siete má vplyv na náročnosť výpočtu týchto faktorov, pričom najväčší vplyv majú mnohostenné bunky (3D), resp. mnohouholníky (2D). Čím viac strán má jedna bunka, tým je potrebné sledovať vyžiarené lúče do viacerých smerov. Rovnako tak aj lúče dopadajú z viacerých smerov na viac strán bunky. Sledovaním vyššieho počtu lúčov sa zvyšuje náročnosť výpočtu. Z rovníc a z popisu výpočtu pomocou modelu S2S a výpočtu koeficientov osálenia je možné vidieť, že autor musí dôsledne vybrať model tepelnej radiácie tak, aby bol vhodný pre počítanú geometriu a hraničné podmienky a aby nedošlo k veľkým modelovacím chybám. Aj z tohto dôvodu je potrebné overovať správnosť nastavenia výpočtu, či už porovnaním s analytickým výpočtom alebo s iným numerickým výpočtovým kódom.

1.2 Overenie modelu numerickým výpočtom

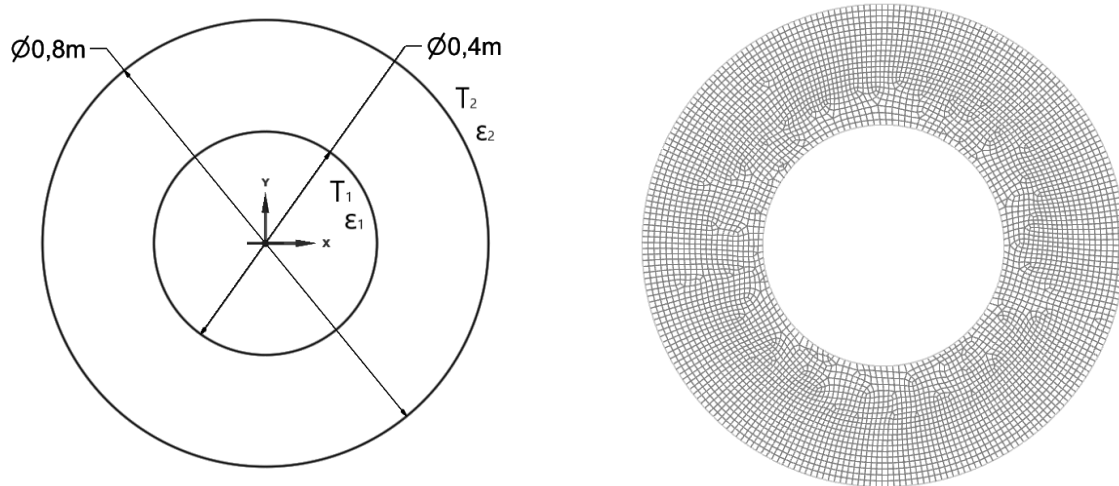
V rámci overenia správnosti nastavenia DO modelu tepelnej radiácie bolo realizované porovnanie s S2S modelom. K tomuto porovnaniu boli vykonané výpočty s dvomi jednoduchými geometriami. V prvom prípade sa sledovala tepelná radiácia medzi valcovými povrchmi, ktoré vznikli z dvoch sústredných valcov (Obr. 1.1) a v druhom prípade medzi dvomi povrchmi valcov s rovnakým polomerom (Obr. 1.2). Problém bol počítaný v dvoch rozmeroch a ako hraničné podmienky boli nastavené konštantné teploty na povrchoch. V programe ANSYS SpaceClaim boli vytvorené geometrie a v ANSYS Meshing výpočtové siete, pričom výpočet bol realizovaný pomocou výpočtového kódu ANSYS Fluent.

Riešené geometrie spolu s vytvorenými výpočtovými sieťami sa nachádzajú na Obr. 1.1 pre sústredné valce, resp. na Obr. 1.2 pre valce vedľa seba. Parametre kvality sietí pre oba problémy sú v Tab. 1.1. V tejto tabuľke sú najčastejšie sledované parametre kvality, a to šikmosť (SK), pomer strán (PST) a kvalita ortogonalita (KO), ktorých význam je popísaný v [21] a hodnoty, ktoré môžu nadobúdať, sú spolu s doporučenými v prílohe v Tab. A.1. Aj jedna bunka s nevyhovujúcimi parametrami kvality siete môže spôsobiť nepresnosti vo výpočte alebo jeho divergenciu a má vplyv aj na rýchlosť konvergenzie.

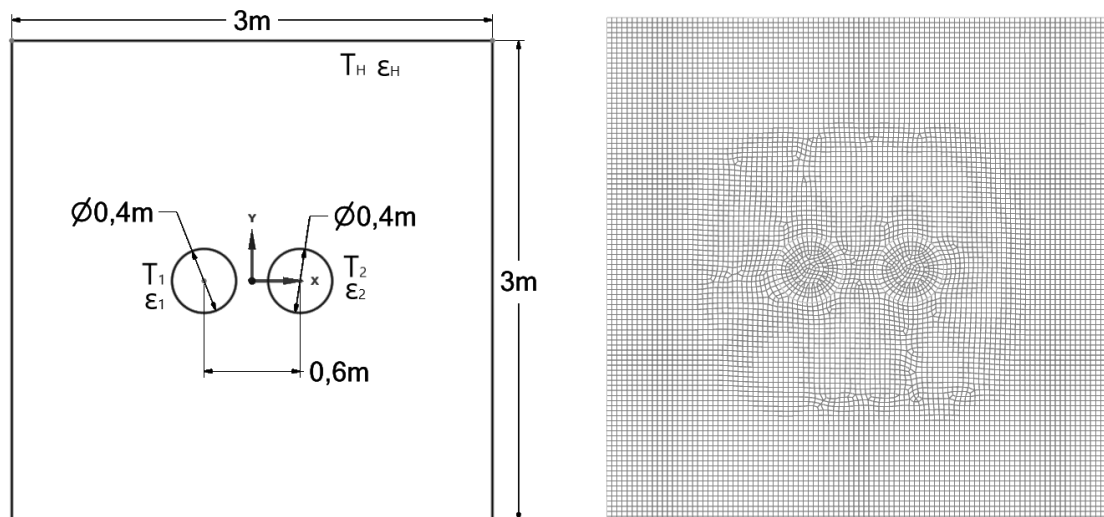
Nastavenie hraničných podmienok bolo podľa Tab. 1.2, pričom indexovanie veličín je zhodné s tými na grafickom znázornení geometrie. Ako prostredie medzi valcami bolo uvažované vákuum. Bolo realizovaných niekoľko výpočtov s rôznym nastavením DO modelu - rôzne jemné diskretizácie a pixelácie. Výsledky sa následne porovnávali s výsledkami získanými z modelu S2S. Pre časovú nenáročnosť výpočtov bolo použité jemné nastavenie výpočtu koeficientov osálenia (rozlíšenie bolo nastavené na hodnotu $1 \cdot 10^5$ a maximálny počet iterácií tepelnej radiácie na 1000). Koeficienty osálenia boli počítané pomocou Ray Tracing metódy. Pre porovnanie týchto dvoch modelov sa sledovali hodnoty Radiation Heat Transfer Rate (RHTR) a Surface Incident Radiation (SIR), ktoré sú použité pre znázornenie výsledkov výpočtov tepelnej radiácie v prostredí kódu Fluent. SIR je celková hodnota radiačnej energie, ktorá dopadne na povrch a môže sa ďalej absorbovať, odraziť alebo transmittovať. RHTR je rozdiel medzi emitovanou a absorbovanou energiou tepelnou radiáciou

na povrchu. [2]

Pre oba výpočty bol realizovaný jeden výpočet pomocou modelu S2S a 8 výpočtov s DO modelom, pričom boli použité rôzne jemnosti diskretizácie a pixelácie. V Tab. 1.3 sa nachádzajú výsledky výpočtov pre sústredné valce a v Tab. 1.4 pre valce vedľa seba. V prípade DO modelu sú použité v tabuľke 4 čísla oddelené bodkočiarkou. Prvé dve čísla symbolizujú nastavenie diskretizácie a druhé dve nastavenie pixelácie. Overované nastavenie DO modelu z výskumnej úlohy [21] bolo 5;5;9;9. Pre porovnanie, pri modelovaní obalového súboru TN-32B v 3D v štúdiu [8] bolo použité nastavenie DO modelu 4;4;4;4.



Obr. 1.1: Príklad geometrie a výpočtovej siete pre sústredné valce.



Obr. 1.2: Príklad geometrie a výpočtovej siete pre valce vedľa seba.

V oboch prípadoch je vidieť, že vplyv nastavenia na vypočítané hodnoty je malý. Pri výpočte so sústrednými valcami sú rozdiely medzi modelmi menšie, čo by mohlo byť spôsobené danou geometriou, kedy tepelnej radiácie sa už nezúčastňuje žiaden ďalší povrch okrem sledovaných valcov. V prípade valcov vedľa seba

sú hodnoty RHTR približne o 2 W menšie v DO modeli, ale v rámci nastavenia diskretizácie a pixelácie sa potom menia len málo. Z výsledkov je možné vyvodiť, že nastavenie DO modelu má malý vplyv na výpočet tepelnej radiácie, samozrejme pri uvažovaní nie najhrubších nastavení. Odchýlky medzi modelmi boli v oboch prípadoch malé a mohli byť spôsobené rozdielnym výpočtom tepelnej radiácie. DO model nepočíta koeficienty osálenia, ale počas riešenia problému rieši rovnicu radiačného prenosu pre konečný počet diskrétnych uhlov. Je počítané s emisiou energie, jej absorpciou a odrazom (zrkadlovo a rozptýlene).

Tab. 1.1: Parametre kvality sietí

Parameter	Sústredné valce			Valce vedľa seba		
	min.	max.	priem.	min.	max.	priem.
PST	1,00	2,49	1,12	1,00	1,95	1,03
SK	0	0,57	0,08	0	0,49	0,03
KO	0,64	1,00	0,99	0,74	1,00	0,99
P. elementov		4815			10240	

Tab. 1.2: Hraničné podmienky pre porovnanie modelov tepelnej radiácie

T_1 (K)	350
ε_1 (-)	0,4
T_2 (K)	450
ε_2 (-)	0,7
T_H (K)	290
ε_H (-)	1

Tab. 1.3: Porovnanie S2S a DO modelu pre sústredné valce

Model	RHTR (W)		SIR ($W \cdot m^{-2}$)		
	Vnútorňý	Vonkajší	Vnútorňý	Vonkajší	
S2S	-682,4872	682,5374	2208,8163	1937,2362	
DO	5;5;3;3	-682,4102	682,4102	2208,6632	1937,3085
	5;5;7;7	-682,3924	682,3924	2208,6278	1937,3185
	5;5;9;9	-682,3909	682,3909	2208,6248	1937,3194
	5;5;10;10	-682,3895	682,3895	2208,6220	1937,3202
	7;7;10;10	-682,4595	682,4595	2208,7613	1937,2804
	7;7;7;7	-682,4606	682,4606	2208,7634	1937,2798
	7;7;3;3	-682,4917	682,4917	2208,8254	1937,2621
	10;10;10;10	-682,4814	682,4814	2208,8049	1937,2680

Tab. 1.4: Porovnanie S2S a DO modelu pre valce vedľa seba

Model	RHTR (W)		SIR (W·m ⁻²)		
	Ľavý	Pravý	Ľavý	Pravý	
S2S	148,1880	1644,4750	555,6813	454,1540	
DO	5;5;3;3	146,4184	1641,6787	559,2022	457,3795
	5;5;7;7	146,3111	1641,4857	559,4159	457,5991
	5;5;9;9	146,3036	1641,4707	559,4309	457,6162
	5;5;10;10	146,3007	1641,4661	559,4366	457,6214
	7;7;10;10	146,1936	1641,6605	559,6497	457,4009
	7;7;7;7	146,1994	1641,6703	559,6382	457,3897
	7;7;3;3	146,1888	1641,6534	559,6592	457,4089
	10;10;10;10	146,2198	1641,7648	559,5975	457,2823

1.3 Overenie modelu analytickým výpočtom

Výpis vypočítaných veličín v prostredí programu Fluent nedovoľuje porovnanie s analytickým výpočtom tepelného toku prenášaného pomocou tepelnej radiácie pre všetky geometrie. Preto je porovnanie možné len v špecifickom prípade, a to pri modelovaní tepelnej radiácie medzi dvomi povrchmi, kedy jeden povrch je úplne obklopený druhým. Analyticky je možné vypočítať výsledný žiarivý tok Φ_{1-2} predávaný tepelnou radiáciou z telesa 1 na teleso 2. Pre porovnanie s analytickým výpočtom je možné použiť už vyššie spomenutý RHTR, ktorý je pri riešení geometrie, kedy je jedno teleso obklopené druhým, zhodný s výsledným žiarivým tokom Φ_{1-2} .

Bolo modelované šírenie tepla medzi dvomi sústrednými valcami. Pre tepelný radiačný tok medzi dvomi telesami platí vzťah

$$\Phi_{1-2} = F_{1-2} \cdot S_1 \cdot \sigma \frac{\frac{\varepsilon_1}{\alpha_1} \cdot T_1^4 - \frac{\varepsilon_2}{\alpha_2} \cdot T_2^4}{1 + F_{1-2} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} - 1\right) + F_{2-1} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_2} - 1\right)}, \quad (1.3)$$

kde F_{1-2} , resp. F_{2-1} , sú koeficienty osálenia, ε_1 a ε_2 sú emisivity povrchov, α_1 a α_2 sú absorptancie, S_1 je plocha telesa, z ktorej je počítané vyžarovanie, T_1 a T_2 sú termodynamické teploty a σ je Stefanova-Boltzmannová konštanta. V prípade, kedy sa emisivita a absorptancia rovnajú, vzťah prejde na tvar

$$\Phi_{1-2} = F_{1-2} \cdot S_1 \cdot \sigma \frac{T_1^4 - T_2^4}{1 + F_{1-2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right) + F_{2-1} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}. \quad (1.4)$$

Vzťah (1.3) bol odvodený v [10] za týchto zjednodušujúcich predpokladov:

- zdieľanie tepla medzi telesami je len pomocou tepelnej radiácie,
- všetko pohltené žiarenie sa mení v teplo,
- prostredie, v ktorom sa telesá nachádzajú, je dokonalo priepustné,

- vlastné aj odrazené žiarenie je pre každý element plochy rovnomerne vyžarované do okolia,
- dej je stacionárny a teplota je po celom povrchu telesa konštantná,
- telesá sa nepohybujú,
- absorptancia a emisivita telies je nezávislá na vlnovej dĺžke a
- predpokladá sa, že telesá sú šedé.

Počítaná geometria je na (Obr. 1.1), čiže bolo počítané zdieľanie tepla medzi dvomi sústrednými valcovými povrchmi a boli použité aj rovnaké hraničné podmienky z Tab. 1.2. Analytický výpočet koeficientov osálenia je odvodený v odbornej literatúre [11] a je nasledovný:

$$\begin{aligned}
 F_{1-2} &= 1, \\
 F_{2-1} &= \frac{r_1}{r_2}, \\
 F_{2-2} &= 1 - \frac{r_1}{r_2},
 \end{aligned}
 \tag{1.5}$$

kde r_i sú polomery valcov. Koeficienty osálenia určené analyticky boli po zaokrúhlení zhodné s tými, ktoré boli určené numericky pomocou modelu S2S:

$$\begin{aligned}
 F_{1-2} &= 1, \\
 F_{2-1} &= 0,5, \\
 F_{2-2} &= 0,5.
 \end{aligned}
 \tag{1.6}$$

Výsledky porovnania výpočtu RHTR sa nachádzajú v Tab. 1.5. Z výsledkov je vidieť, že oba modely sa líšia od analytického výpočtu v desatinách Wattu. Z teórie a aj z výsledkov analytického výpočtu vychádza, že RHTR by malo byť číselne rovnaké na oboch povrchoch valcov, pretože sa v geometrii nenachádza žiaden ďalší povrch, ktorý by sa zúčastňoval tepelnej radiácie. Z výsledkov je vidieť, že všetky nastavenia DO modelu to splňujú na viac desatinných miest ako v prípade modelu S2S. Z toho vyplýva, že pri tejto geometrii a nastaveniach dosahuje DO model vyššiu presnosť.

Z výsledkov porovnania s iným numerickým modelom a s analytickým výpočtom je možné usúdiť, že vo výskumnej úlohe [21] bolo nastavenie DO modelu tepelnej radiácie vhodne zvolené.

Tab. 1.5: Porovnanie S2S a DO modelu s analytickým výpočtom pre sústredné valce

Model	RHTR (W)		
	Vnútorňý	Vonkajší	
Analytický	-682,5577	682,5577	
S2S	-682,4872	682,5374	
DO	5;5;3;3	-682,4102	682,4102
	5;5;7;7	-682,3924	682,3924
	5;5;9;9	-682,3909	682,3909
	5;5;10;10	-682,3895	682,3895
	7;7;10;10	-682,4595	682,4595
	7;7;7;7	-682,4606	682,4606
	7;7;3;3	-682,4917	682,4917
	10;10;10;10	-682,4814	682,4814

1.4 Vplyv výpočtovej siete na DO model

Z predošlých výpočtov (Kap. 1.2 a 1.3) vyplynulo, že použité nastavenia DO modelu mali malý vplyv na výsledné hodnoty. Z toho dôvodu bol ešte realizovaný vplyv hustoty siete na výpočet pre DO model tepelnej radiácie. Boli použité 3 hustoty siete, pričom hustota siete, použitá pri predošlých výpočtoch, bola stredná hodnota. Nastavenie DO modelu bolo použité rovnaké ako v autorovej výskumnej úlohe, čiže diskretizácia 5x5 a pixelácia 9x9.

Vypočítané hodnoty RHTR sa nachádzajú v Tab. 1.6. Z tabuľky je vidieť, že hustota siete použitá pri predošlých výpočtoch bola dostatočne jemná, keďže pri dvojnásobnom počte elementov už nedošlo k výraznej zmene veľkosti RHTR. Pri použití výpočtovej siete s polovičným počtom elementov už bol rozdiel v hodnotách väčší, približne v desatinách Wattu.

Z týchto výsledkov a z toho, že pri výpočtoch v práci [21] s presnou geometriou PS bola realizovaná aj citlivostná analýza výpočtovej siete, je možné usúdiť, že hustota siete bola vhodne nastavená.

Tab. 1.6: Vplyv hustoty výpočtovej siete na výpočet so sústrednými valcami

P. elementov	RHTR (W)
1270	682,2098
4815	682,3924
11016	682,3956

Na základe vyššie realizovaných overení vyplynulo, že nastavenie DO modelu tepelnej radiácie bolo vo výskumnej úlohe vhodne zvolené. Vzniknuté nepresnosti pri výpočte teplotných polí PS v prostredí s vákuom mohli byť spôsobené vyššou závislosťou ESTV na výkone, ktorú je potrebné uvažovať. Rovnako tak modelovanie zdieľania tepla len pomocou radiácie v takej zložitej geometrii, akou je PS, mohlo

viest k väčším chybám. Najväčšie odchýlky boli pri kombinácii najnižších hraničných teplôt a najvyšších výkonov, ktoré v prípade skladovania VJP nie sú reálne. Pri týchto hraničných podmienkach boli rozdiely medzi maximálnou teplotou a hraničnou aj 300 K.

Kapitola 2

Úprava stanovených ESTV

Vo výskumnej úlohe boli stanovené ESTV pre palivové súbory TVSA-T a Gd-2M+ v prostredí s héliom, dusíkom a vákuom. Keďže v Českej republike sa ako výplňový plyn OS používa hélium, bude sa ďalej v práci používať ako jediný uvažovaný plyn v OS. V tejto kapitole bude realizované spresnenie stanovených ESTV pre oba PS v héliu. Keďže v predošlej kapitole (Kap. 1) bolo ukázané, že model pre výpočet tepelnej radiácie bol vhodne nastavený, bude ESTV spresnený použitím nasledovného:

- použitie nového súčiniteľa tepelnej vodivosti pre hélium pri výpočtoch s presnou geometriou,
- realizovanie výpočtov len s dvomi strednými výkonmi (nebranie v úvahu výkon na začiatku a na konci skladovania VJP).

2.1 Súčiniteľ tepelnej vodivosti plynov

Vedenie tepla v plynoch je za bežných tlakov a teplôt spôsobené prenosom kinetickej energie pohybu molekúl pri ich vzájomných zrážkach. V [10] je z kinetickej energie odvodený vzťah platný pre ideálny plyn

$$\lambda = \frac{1}{3} \cdot \bar{w} \cdot l_m \cdot c_V \cdot \rho, \quad (2.1)$$

kde \bar{w} je stredná rýchlosť molekúl plynu, l_m je stredná voľná dráha molekúl medzi jednotlivými zrážkami, c_V je izochorická merná tepelná kapacita plynu a ρ je hustota plynu.

Z rovnice (2.1) je možné sledovať závislosti na jednotlivých stavoch. Pri zmene tlaku sa zmení hustota plynu a stredná voľná dráha. Pri zvýšení tlaku plynu sa zväčší jeho hustota a zmenší sa stredná voľná dráha. Pre ideálne plyny je súčin $l_m \cdot \rho$ približne konštantný. To neplatí pre vodné pary a pre reálne plyny, ktoré sa značne líšia od ideálnych. Ďalej súčin nie je konštantný pri tlakoch menších ako približne 3 kPa a vyšších ako 2000 MPa. [10]

Závislosť na teplote sa vo vzťahu (2.1) nachádza v strednej rýchlosti molekúl plynu \bar{w} , kde platí vzťah

$$\bar{w} = \sqrt{\frac{3 \cdot R_m \cdot T}{M}}, \quad (2.2)$$

kde R_m je molová plynová konštanta a M je molová hmotnosť. Z toho vyplýva, že súčiniteľ tepelnej vodivosti plynov rastie so zvyšujúcou sa teplotou. V plynch nadobúda hodnoty od tisícín až po desatiny $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Tieto vlastnosti súčiniteľa tepelnej vodivosti je možné pozorovať aj u hélia.

2.2 Súčiniteľ tepelnej vodivosti hélia

Hélium patrí medzi vzácne plyny a v ČR sa používa ako výplňový plyn v OS pri skladovaní VJP. Patrí medzi plynné prvky, ktoré sú veľmi málo reaktívne. Platí, že jeho súčiniteľ tepelnej vodivosti sa s tlakom mení len veľmi málo, čo je zobrazené v Tab. 2.1, v ktorej sa nachádzajú hodnoty λ v závislosti na teplote pre tlak 0,6, 1 a 3 MPa. Je vidieť, že i pri niekoľkonásobnom zväčšení tlaku je zmena v jednotkách $\frac{\text{mW}}{\text{m}\cdot\text{K}}$. Na Obr. 2.1 je toto porovnanie vykreslené pre tlak 0,6 a 3 MPa.

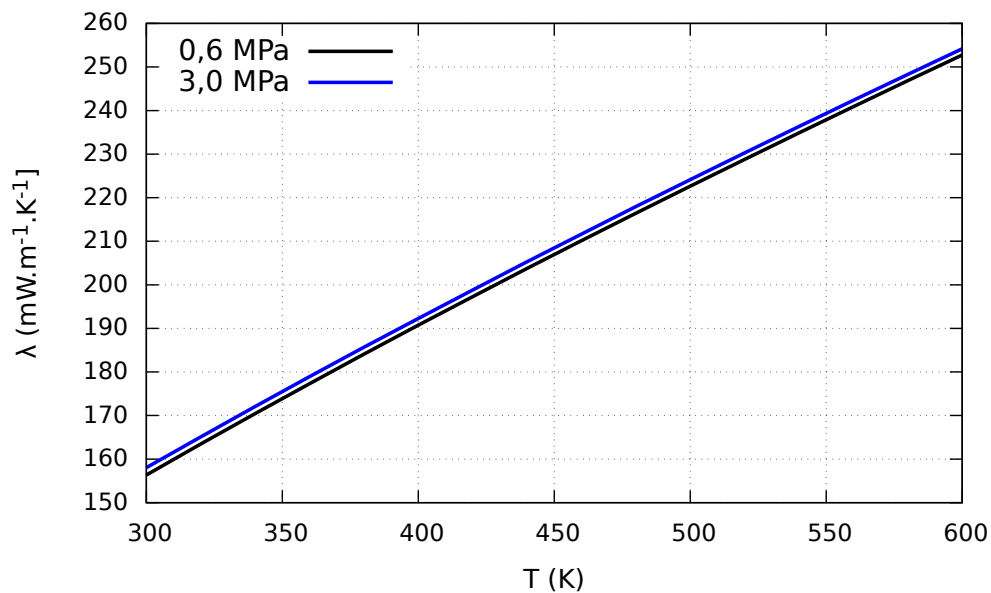
Termofyzikálne vlastnosti hélia boli vo výpočtoch vo výskumnej úlohe [21] dodané vedúcim práce, pričom súčiniteľ tepelnej vodivosti bol získaný pomocou Petersenovej rovnice z [26]. Merná tepelná kapacita a hustota boli prevzaté z [4]. V tejto práci boli termofyzikálne vlastnosti hélia získané pomocou programu mini-REFPROP vo verzii 10.0, ktorý vychádza z programu REFPROP. [15] Vyvíja ich National Institute of Standards and Technology, ktorý patrí pod U.S. Department of Commerce. Mini-REFPROP je jeho verejne dostupná verzia, ktorá má menšiu databázu s tekutinami a zmesami. Jeho názov je akronym pre REference fluid PRO-Perties a je možné pomocou neho počítať termodynamické a transportné vlastnosti priemyselne dôležitých tekutín a ich zlúčenín.

V programe sú pre stavovú rovnicu hélia na výber tri typy modelov: stavová rovnica explicitná v Helmholtzovej energii, modifikovaná Benedict-Webb-Rubinová stavová rovnica a ECS¹ model. [18] Na výber je doporučený zdroj [19] a ďalších 5 alternatívnych zdrojov. Hodnoty súčiniteľa tepelnej vodivosti hélia sú v programe mini-REFPROP prevzaté z literatúry [9]. Neurčitosti v určení hodnôt sú približne 5 %. Porovnanie súčiniteľa tepelnej vodivosti hélia použitého vo výskumnej úlohe a získaného pomocou programu mini-REFPROP je na Obr. 2.2. Je vidieť, že rozdiely medzi hodnotami nie sú veľké a pôvodný súčiniteľ sa nachádza aj vo vyznačenej oblasti neurčitosti 5 %. Väčšie rozdiely sú v časti nižších teplôt a so zvyšujúcou sa teplotou sa zmenšujú. Súčiniteľ tepelnej vodivosti, ktorý bude použitý v tejto práci, má v oblasti nižších teplôt vyššie hodnoty.

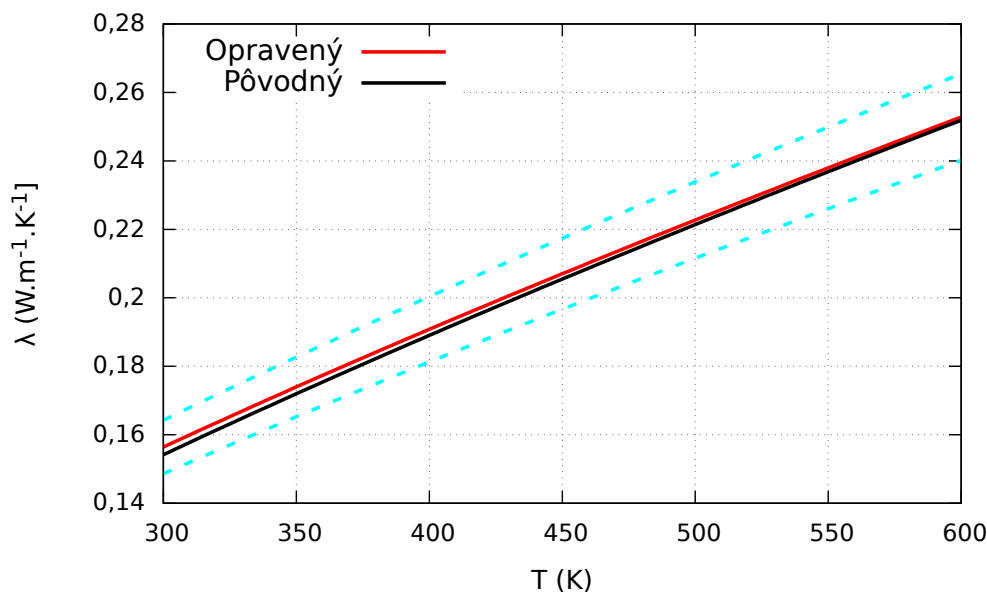
¹extended corresponding states

Tab. 2.1: Porovnanie súčiniteľa tepelnej vodivosti hélia pri rôznych tlakoch [15]

T (K)	λ (mW·m ⁻¹ ·K ⁻¹)		
	0,6 MPa	1 MPa	3 MPa
300	156,35	156,64	158,03
320	163,47	163,76	165,11
340	170,45	170,74	172,08
360	177,32	177,60	178,92
380	184,08	184,36	185,66
400	190,73	191,01	192,29
420	197,29	197,56	198,83
440	203,75	204,02	205,28
460	210,13	210,40	211,65
480	216,43	216,70	217,94
500	222,65	222,92	224,15
520	228,80	229,07	230,28
540	234,88	235,15	236,35
560	240,90	241,16	242,36
580	246,85	247,11	248,30
600	252,74	253,00	254,18



Obr. 2.1: Porovnanie súčiniteľa tepelnej vodivosti hélia pre dva rôzne tlaky [15]



Obr. 2.2: Porovnanie pôvodného súčiniteľa tepelnej vodivosti s novým s vyznačenou 5% neurčitostou

2.3 Výpočet s presnou geometriou PS

K stanoveniu opravených ESTV bol použitý rovnaký postup ako vo výskumnej úlohe [21], čiže najskôr boli realizované výpočty teplotných polí pre PS (TVSA-T a Gd-2M+) s presnou geometriou v dvoch rozmeroch, pričom bola sledovaná hodnota PCT a jej závislosť na hraničnej teplote PS. Vo výskumnej úlohe bolo ukázané, že ESTV závisí len málo na vyhorení (rozdiely boli menšie ako 1 %), pričom pre výpočty boli použité 3 vyhorenia: 55, 45 a 30 MWd/kgU. Pre túto prácu bolo použité stredné vyhorenie 45 MWd/kgU.

2.3.1 Geometria a výpočtová sieť

Geometrie a výpočtové siete pre oba PS boli prevzaté z výskumnej úlohy [21], kde boli geometrie vytvorené pomocou programu ANSYS SpaceClaim a výpočtové siete v ANSYS Meshing. Pre zjednodušenie výpočtov boli použité i rovnaké predpoklady, a to:

- boli uvažované len palivové prútky typu tvel, čiže PP, ktorých palivové tablety neobsahovali vyhoriavajúci absorbátor - gadolínium;
- medzera medzi palivovou tabletou a pokrytím nebola explicitne modelovaná, ale vplyv na šírenie tepla bol započítaný do súčiniteľa tepelnej vodivosti palivového pokrytia;
- nebola explicitne modelovaná vrstva oxidu ZrO_2 , ale jej vplyv na šírenie tepla bol započítaný do súčiniteľa tepelnej vodivosti pokrytia;

- (len pre PS TVSA-T) centrálna trubica mala zhodné rozmery s vodiacimi trubicami;
- (len pre PS TVSA-T) neboli uvažované uholníky na hranách PS;
- (len pre PS TVSA-T) palivové tablety nemali centrálny otvor.

Na Obr. 2.3 sa nachádza vytvorená geometria pre PS Gd-2M+, pričom bola použitá 1/12 symetria. Výpočtová oblasť je ohraničená vonkajším povrchom obálky PS. Na Obr. 2.4 je následne vykreslená geometria pre PS TVSA-T, kde bola použitá 1/6 symetria. Koniec výpočtovej oblasti je tvorený vnútorným povrchom koša OS. Ďalšie parametre pre oba palivové súbory a ich vlastnosti sa nachádzajú v Tab. 2.2.

Citlivostná analýza pre výpočtové siete bola realizovaná vo výskumnej úlohe [21], preto budú v tejto práci použité rovnaké. Parametre kvality sú v Tab. 2.3 pre palivový súbor Gd-2M+, resp. v Tab. 2.4 pre TVSA-T.

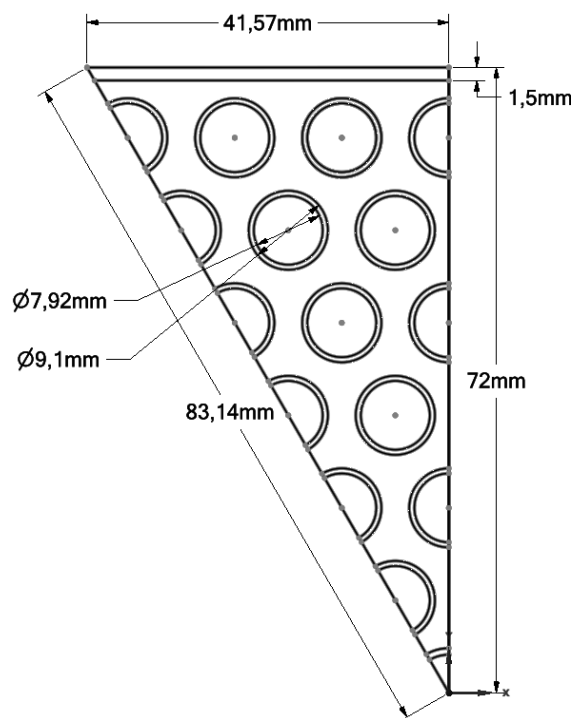
Tab. 2.2: Vlastnosti palivového súboru a prútiku pre oba PS [20]

	Gd-2M+	TVSA-T
Počet PP v PS	162	312
Rozostup PP	12,30 mm	12,75 mm
Aktívna dĺžka PP	2480 mm	3680 mm
Vonkajší priemer pokrytia	9,10 mm	9,10 mm
Vnútorný priemer pokrytia	7,92 mm	7,73 mm
Hrúbka obálky PS	1,50 mm	-
Šírka výpočtovej oblasti ²	144 mm	242 mm
Materiál pokrytia	E110	E110
Materiál centrálnej trubice	E110	E110
Materiál vodiacich trubíc	-	E110
Materiál obálky PS	E125	-

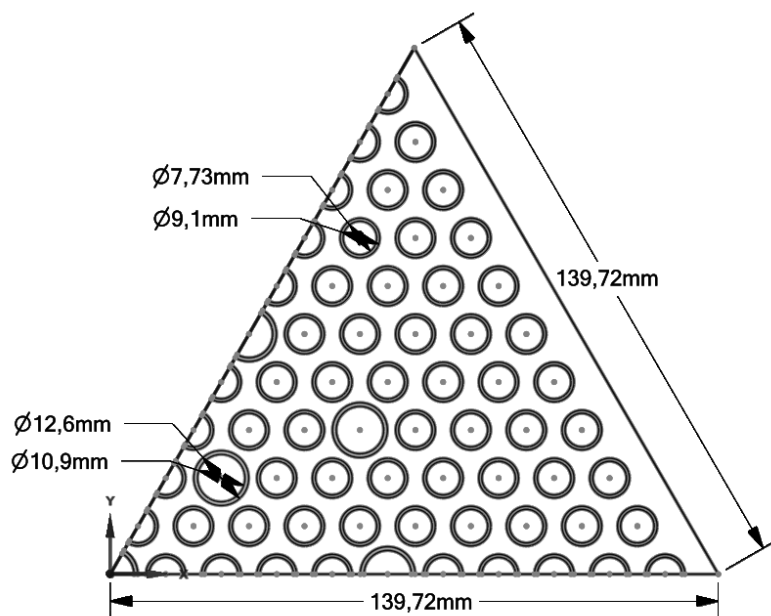
Tab. 2.3: Parametre kvality výpočtovej siete pre PS Gd-2M+

P. nódov: 78361		P. elementov: 26018	
Parameter	min	max	str.
KO	0,592	1,000	0,975
SK	0,002	0,706	0,142
PST	1,000	2,899	1,202

²V prípade Gd-2M+ to je šírka PS, v prípade TVSA-T to je šírka otvoru v koši OS.



Obr. 2.3: Model PS Gd-2M+ s presnou geometriou



Obr. 2.4: Model PS TVSA-T s presnou geometriou

Tab. 2.4: Parametre kvality výpočtovej siete pre PS TVSA-T

P. nódov: 427283		P. elementov: 142672	
Parameter	min	max	str.
KO	0,521	1,000	0,974
SK	$2,48 \cdot 10^{-5}$	0,701	0,140
PST	1,000	2,979	1,183

2.3.2 Materiály

Všetky vlastnosti použitých materiálov pre výpočty teplotných polí PS (okrem už popísaného hélia - Kap. 2.2) boli dodané vedúcim práce v rámci konzultácií. [13] Vlastnosti pre UO_2 a zirkóniovú zliatinu E110 boli prepočítané podľa použitých zjednodušení pri tvorbe geometrie. Pre centrálnu a vodiace trubice bola použitá rovnako zliatina E110, ktorej vlastnosti ale neboli prepočítané na vyhorenie (bez oxidovanej vrstvy a bez započítania medzery medzi palivovou tabletou a pokrytím). Dodané vlastnosti boli z nasledujúcich zdrojov:

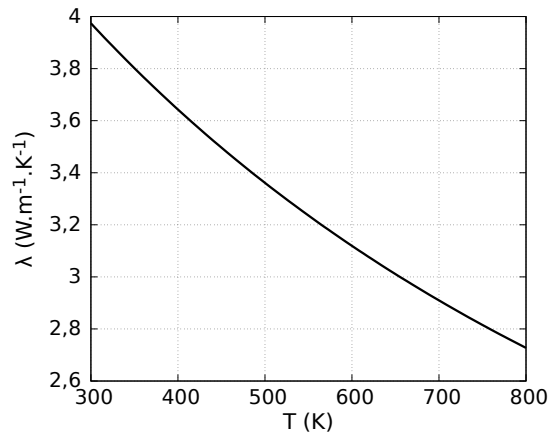
- Súčiniteľ tepelnej vodivosti pre ožiarené UO_2 bol prevzatý ako doporučovaný vzťah (Haldenský model) korigovaný na porozitu. Merná tepelná kapacita bola získaná z polynomickeho fitu experimentálnych dát. Hustota bola prepočítaná z lineárnej tepelnej expanzie podľa Martina. Vlastnosti sa nachádzajú v [12].
- Pre vyhorenú zliatinu E110 bol súčiniteľ tepelnej vodivosti prepočítaný osobitne pre oba PS a vyhorenie 45 MWd/kgU pomocou výpočtového programu FRAPCON 3.4 a základom výpočtov boli vlastnosti zliatiny M5. Merná tepelná kapacita bola prevzatá zo zdroja [12] a hustota ako doporučovaná hodnota z [27].
- Pre nevyhorenú zliatinu E110 boli súčiniteľ tepelnej vodivosti a merná tepelná kapacita prevzaté z [12]. Hustota bola rovnako prevzatá z [27].
- Súčiniteľ tepelnej vodivosti pre zliatinu E125 bol prevzatý z Padeho aproximácie spolu s mernou tepelnou kapacitou zo zdroja [12]. Hustota bola prevzatá ako doporučovaný vzťah v [27].
- Vlastnosti hélia boli získané pomocou programu mini-REFPROP, dostupného z [15].

V prostredí výpočtového kódu ANSYS Fluent boli tieto vlastnosti materiálov zadané polynomicou funkciou

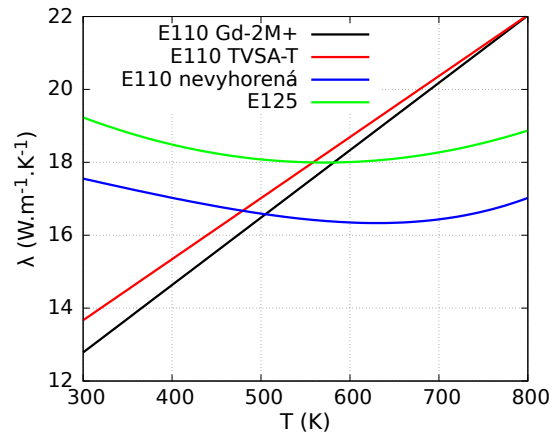
$$f(T) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot T^i, \quad (2.3)$$

kde konštanty a_i sa pre jednotlivé materiály nachádzajú v prílohe v Tab. A.2 a A.3. Keďže tieto konštanty boli získané pomocou preloženia bodov polynomicou

funkciou, tak sa v tabuľkách nachádzajú aj asymptotické štandardné chyby. Konštanty pre vlastnosti hélia sú rovnako v prílohe v Tab. A.4. Na Obr. 2.5 a 2.6 sú vyobrazené závislosti súčiniteľov tepelnej vodivosti na teplote pre UO_2 a zirkóniové zliatiny. Pri zirkóniových zliatinách je možné vidieť rozličný priebeh s teplotou medzi ožiarenou a neožiarenou zliatinou, kedy λ ožiarených sú monotónne rastúce funkcie a pre neožiarenú súčiniteľ tepelnej vodivosti najskôr klesá a následne začne rásť. Tento rozdiel je spôsobený započítaním vplyvu medzery medzi palivovou tabletou a pokrytím, ktorá sa s vyhorením znižuje a tým sa zlepšuje odvod tepla z tablety, do tohto súčiniteľa.



Obr. 2.5: Súčiniteľ tepelnej vodivosti UO_2 pri vyhorení 45 MWd/kgU



Obr. 2.6: Súčinitele tepelnej vodivosti vyhorenej E110 pri 45 MWd/kgU a nevyhorených zliatin E110 a E125

2.3.3 Hraničné podmienky a nastavenia

K výpočtom bol použitý výpočtový kód ANSYS Fluent a problém bol riešený v stacionárnom stave. V prostredí programu boli zadefinované materiály a bol zapnutý model riešenia rovnice zákona zachovania energie a model tepelnej radiácie - DO model. Zdieľanie tepla pomocou konvekcie nebolo uvažované. Pre model tepelnej radiácie bola uhlová diskretizácia nastavená na 5x5 a pixelácia 9x9. Všetky steny boli modelované ako šedé a nepriehľadné a odraz lúčov bol uvažovaný len rozptýlene. Každá stena na rozhraní dvoch prostredí je zložená z dvoch (wall a shadow) a každej je možné zadefinovať emisivitu. Časti steny, ktorá nie je pridrúžená k tekutine, bola zadaná nulová emisivita a ostatným stenám boli zadané emisivity podľa materiálu a Tab. 2.5. Emisivita zliatiny E110 bola uvažovaná rovnaká pre vyhorený a nevyhorený stav, pretože oba materiály majú na povrchu zoxidovanú vrstvu a počas doby v AZ boli vystavené podobným podmienkam. Hliník bol uvažovaný ako materiál vnútornej steny koša OS pre palivový súbor TVSA-T.

Generovanie tepla bolo zadané v palivových tabletách, pričom sa v nich generovalo rovnomerne. Z celkového výkonu PS bol získaný merný objemový výkon prepočtom

$$q_V = \frac{\dot{Q}}{N \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L_a}, \quad (2.4)$$

kde \dot{Q} je celkový výkon PS, čiže zvyškový tepelný výkon, N je počet PP v palivovom súbore, d je vnútorný priemer pokrytia (v rámci zjednodušenia je zhodný s priemerom palivovej tablety) a L_a je aktívna dĺžka PP. Celkový ZTV bol prevzatý z výskumnej úlohy [21], kde boli uvažované 4 výkony (pre TVSA-T 950, 700, 400 a 190 W a pre Gd-2M+ 385, 250, 150 a 50 W). Najvyššia hodnota odpovedá ZTV palivového súboru s vyhorením 55 MWd/kgU po približne 5 rokoch od vyňatia z AZ [14]. Najnižšia hodnota odpovedá výkonu PS s vyhorením 30 MWd/kgU po približne 65 rokoch od vyňatia z AZ [13]. Zvyšné dva ZTV boli použité ako stredné hodnoty medzi najvyšším a najnižším výkonom. Práve tieto dve veľkosti ZTV boli použité pre ďalšie výpočty (Tab. 2.6). V tabuľke sa ďalej nachádzajú merné objemové výkony, ktoré boli získané pomocou vzťahu (2.4).

Tab. 2.5: Emisivity jednotlivých materiálov [13]

Materiál	ε
E110	0,80
E125	0,80
Hliník	0,04

Tab. 2.6: Použité ZTV palivového súboru a prepočítané objemové výkony

Gd-2M+		TVSA-T	
\dot{Q} (W)	q_V (W·m ⁻³)	\dot{Q} (W)	q_V (W·m ⁻³)
150	9743,81	400	7423,50
250	16239,68	700	12991,12

Na stenách, ktoré sa nachádzajú na rozhraní dvoch prostredí bola zadaná tepelná hraničná podmienka ako združená, čiže nie je na nej zadaný tepelný tok a teplota a tie budú počítané. Okraj výpočtovej oblasti je tvorený dvomi stenami, na ktorých je zadaná symetrická hraničná podmienka a stenou, na ktorej je zadefinovaná konštantná hraničná teplota T_w . Pre palivový súbor Gd-2M+ je to vonkajší povrch obálky PS a pre TVSA-T to je vnútorný povrch koša OS.

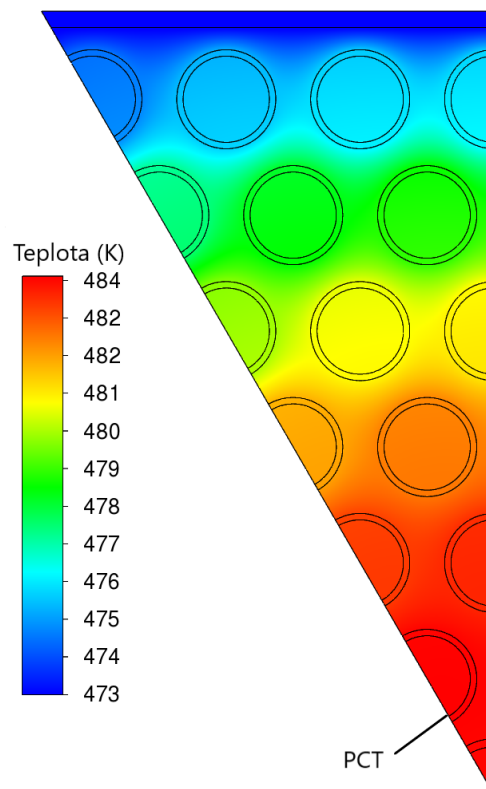
2.3.4 Výsledky výpočtov PS s presnou geometriou

Ako bolo už spomenuté, vo výpočtoch sa sledovala hodnota maximálnej teploty palivového pokrytia. Bolo realizovaných 14 výpočtov pre každý PS, čiže pre každý dve hodnoty ZTV a 7 hraničných teplôt T_w . V prostredí ANSYS Fluent boli nastavené tieto hodnoty ako vstupné parametre a PCT ako výstupný parameter. Okrem reziduí bola pre kontrolu konvergenzie výpočtu sledovaná aj veľkosť PCT. Následne v prostredí ANSYS Workbench boli menené vstupné parametre.

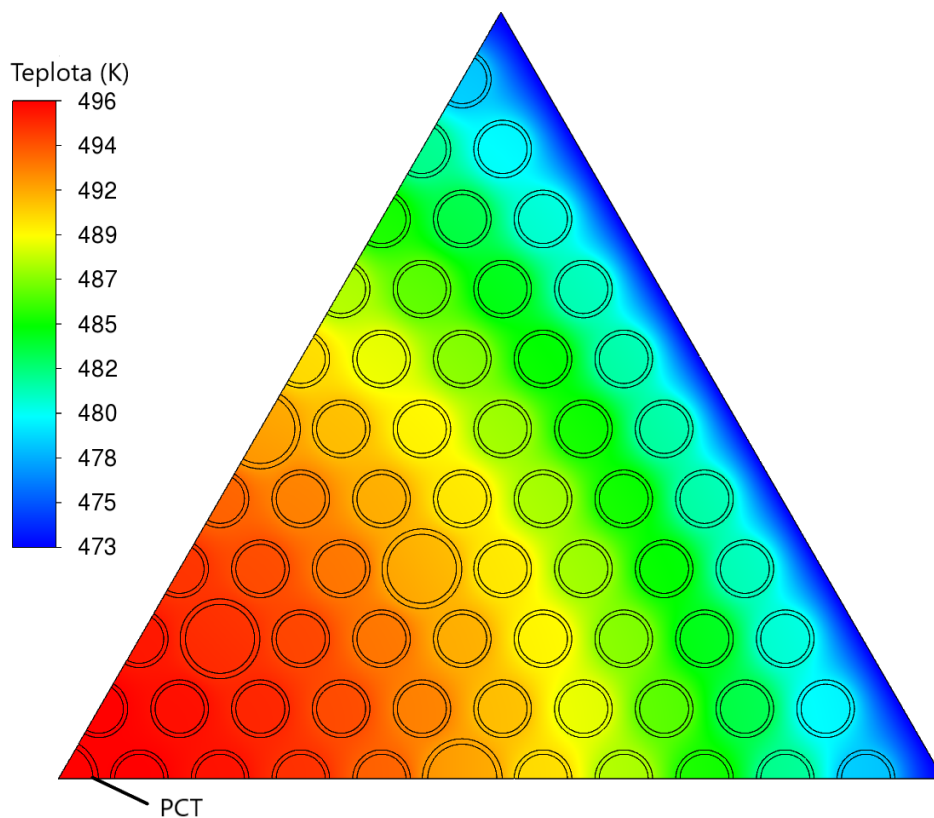
Z výsledkov pre oba PS bolo určené, že miesto, kde sa nachádzala PCT, bolo rovnaké ako v prípade výskumnej úlohy [21]. Toto miesto je zobrazené na Obr. 2.7, kde je vypočítaný teplotný profil súboru Gd-2M+ pri výkone 250 W a hraničnej teplote 473,15 K. Na Obr. 2.8 je teplotný profil pre súbor TVSA-T, ktorého výkon bol 700 W a hraničná teplota 473,15 K. V prípade Gd-2M+ je vidieť, že maximálna

teplota PS sa nenachádza v jeho strede, ale v palivovej tablete, ktorá je najbližšie k stredu. U TVSA-T je maximálna teplota v palivovej tablete najbližšie k stredu, ale v mieste, kde je väčšia vzdialenosť od vodiacej trubice.

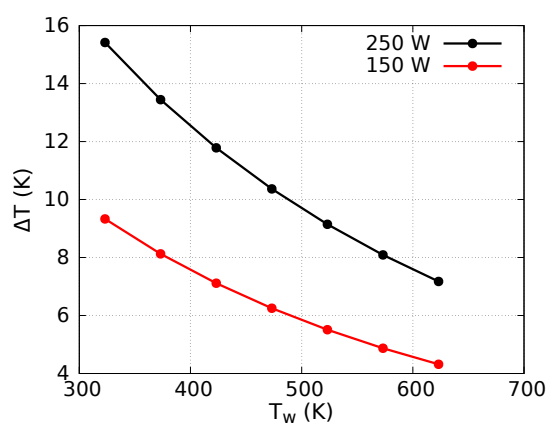
Vypočítané hodnoty PCT v závislosti na výkone a hraničnej teplote sa nachádzajú v prílohe v Tab. A.5 pre Gd-2M+ a v Tab. A.6 pre TVSA-T. V týchto tabuľkách sú porovnané PCT s predošlými výpočtami, ktoré boli realizované vo výskumnej úlohe. Rozdiely medzi hodnotami sú v oboch prípadoch v stotinách až desatinách K. Je možné pozorovať, že pri najnižších uvažovaných hraničných teplotách sú hodnoty PCT menšie oproti pôvodným a so zvyšujúcou sa hraničnou teplotou prejdú rozdiely zo záporných do kladných hodnôt. To je spôsobené novým súčiniteľom tepelnej vodivosti hélia, ktorý je v nižších hodnotách vyšší ako pôvodný (Kap. 2.2). Na Obr. 2.9 a 2.10 sú zobrazené vypočítané rozdiely ΔT medzi PCT a T_w pre oba PS. Je vidieť, že so zvyšujúcou sa hraničnou teplotou a nižším výkonom sú tieto rozdiely menšie, čo je spôsobené vlastnosťami materiálov a zvyšujúcim sa vplyvom tepelnej radiácie pri vyšších teplotách.



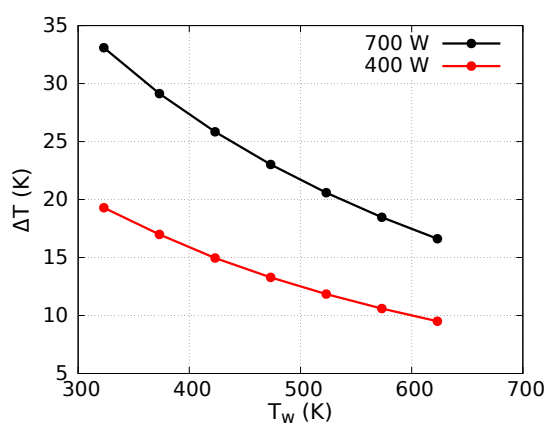
Obr. 2.7: Vypočítaný teplotný profil PS Gd-2M+ pre výkon 250 W a hraničnú teplotu 473,15 K



Obr. 2.8: Vypočítaný teplotný profil PS TVSA-T pre výkon 700 W a hraničnú teplotu 473,15 K



Obr. 2.9: Rozdiel medzi PCT a T_w pre PS Gd-2M+ a jeho dva výkony



Obr. 2.10: Rozdiel medzi PCT a T_w pre PS TVSA-T a jeho dva výkony

2.4 Stanovenie ESTV

ESTV boli stanovené pomocou numerických výpočtov výpočtovým kódom ANSYS Fluent, za pomoci subprogramu Direct optimization, ktorý je súčasťou skupiny programov ANSYS. Geometrie PS boli nahradené jedným homogénnym materiálom s rovnakými rozmermi. Výpočtové siete boli vytvorené v ANSYS Meshing a oproti výpočtom vo výskumnej úlohe boli siete zjemnené. Dôvodom zjemnenia sietí bol lepší popis v rohoch, kde hlavne u GD-2M+ je v strede veľmi ostrý uhol. Keďže šírenie tepla v tomto homogénnom materiáli je len pomocou kondukcie, výpočet nie je náročný na výkon ani pri väčšom počte elementov siete. Parametre kvality sietí sú v Tab 2.7 a 2.8.

Tab. 2.7: Parametre kvality výpočtovej siete pre homogénny PS Gd-2M+

P. nódov: 3977		P. elementov: 1912	
Parameter	min	max	str.
KO	0,629	1,000	0,981
SK	0,000	0,518	0,032
PST	1,000	2,460	1,404

Tab. 2.8: Parametre kvality výpočtovej siete pre homogénny PS TVSA-T

P. nódov: 801		P. elementov: 1480	
Parameter	min	max	str.
KO	0,899	1,000	0,983
SK	0,000	0,151	0,027
PST	1,000	1,468	1,128

Pri použití subprogramu Direct optimization je potrebné optimalizovanie prepojiť s hlavným výpočtom (v tomto prípade s výpočtom vytvoreným v ANSYS Fluent). V prostredí programu Fluent bol pre homogénnu geometriu nastavený výpočet (riešenie rovnice zákona zachovania energie, sledovanie konvergencie) a boli zadané vstupné a výstupné parametre, s ktorými následne pracoval Direct optimization:

- vstupné parametre: súčiniteľ tepelnej vodivosti materiálu, hraničná teplota, objemový výkon
- výstupný parameter: maximálna teplota homogénneho materiálu.

Objemový výkon bolo potrebné prepočítať tak, aby celkový výkon sedel s PS s presnou geometriou. K tomu sa použil vzťah

$$q_V = \frac{\dot{Q}}{S \cdot L_a}, \quad (2.5)$$

kde \dot{Q} je ZTV, S je obsah prierezu PS z homogénneho materiálu a L_a je aktívna dĺžka PS. Prepočítané objemové výkony sa nachádzajú v Tab. 2.9. Maximálna teplota sa nachádza v strede homogénneho PS, a preto bola zadaná ako maximálna teplota pokrytia.

Tab. 2.9: Prepočítané merné objemové výkony homogénneho PS

Gd-2M+		TVSA-T	
\dot{Q} (W)	q_V (W·m ⁻³)	\dot{Q} (W)	q_V (W·m ⁻³)
150	3368,03	400	2143,10
250	5613,38	700	3750,43
S (m ²)	0,01796	S (m ²)	0,05072

V programe Direct optimization bola maximálna teplota homogénneho PS nastavená na hodnotu PCT z predošlých výpočtov. Ďalej bol zadaný výkon a hraničná teplota. Súčiniteľ tepelnej vodivosti materiálu bol nastavený ako parameter, ktorý bude počítaný a bol definovaný interval, v ktorom by sa jeho hodnoty mali pohybovať. Index doby chodu bol nastavený na strednú hodnotu a to 5 (1 najrýchlejší a 9 najpomalší). Toto nastavenie mení počet počiatočných odhadov súčiniteľa tepelnej vodivosti a celkový predpokladaný počet iterácií, kým nebude dosiahnutá konvergencia. Tá sa nastavuje pre „optimalizovanú“ veličinu (v tomto prípade PCT) a presnosť bola zadaná na $1 \cdot 10^{-3}$.

2.4.1 Efektívny súčiniteľ tepelnej vodivosti

Ako už bolo vyššie spomenuté, ESTV bol stanovený v závislosti na hraničnej teplote T_w (rovnako ako vo výskumnej úlohe [21]) a na priemernej teplote v homogénnom palivovom súbore T_{mean} . Stanovenie v závislosti na T_w bolo z dôvodu porovnania s pôvodnými výpočtami a v závislosti na T_{mean} , pretože v ďalších výpočtoch v koši OS je použitie priemernej teploty PS fyzikálne správnejšie ako použitie konštantnej hraničnej teploty.

Výsledky z výpočtov ESTV sa nachádzajú v prílohe v Tab. A.7 pre Gd-2M+, resp. v Tab. A.8 pre TVSA-T. V týchto tabuľkách je aj vypočítaná priemerná teplota v homogénnom PS a pre porovnanie vypočítané hodnoty pôvodných ESTV. Rovnako ako pri výpočtoch teplotných polí s presnou geometriou, aj tu sú rozdiely malé. Pohybujú sa do jednotiek %. Je vidieť, že závislosť na výkone je malá, a preto nebude ďalej uvažovaná. Výsledný ESTV v závislosti len na T_w bol stanovený ako priemer hodnôt z dvoch výkonov, ktoré boli následne preložené polynomickou funkciou. Výsledné hodnoty sú v Tab. 2.11 a 2.12, kde sú znovu porovnané výsledné a pôvodné ESTV. Toto porovnanie je zobrazené aj na Obr. 2.11 pre Gd-2M+ a na Obr. 2.12 pre TVSA-T. Na obrázkoch je už výsledný ESTV, ktorý vznikol preložením bodov polynomickou funkciou. Je vidieť, že pri nižších hraničných teplotách je ESTV vyšší oproti pôvodnému a so zvyšujúcou sa teplotou rastie pomalšie ako pôvodný. Tento výsledok bol podľa očakávania, keďže toto bolo pozorované už pri výpočtoch teplotných polí s presnou geometriou v Kap. 2.3.4, kde boli hodnoty PCT v nižších teplotách menšie a so zvyšujúcou sa hraničnou teplotou sa zase zvyšovali rýchlejšie ako pri pôvodných výpočtoch.

Všeobecné vyjadrenie závislosti ESTV (W·m⁻¹·K⁻¹) na hraničnej teplote ho-

mogénneho PS v héliu je

$$\lambda_{\text{eff}}(T_w) = a_0 + a_1 \cdot T_w + a_2 \cdot T_w^2, \quad (2.6)$$

kde koeficienty a_i sa pre oba PS nachádzajú v Tab 2.10 spolu s asymptotickými štandardnými chybami z preloženia hodnôt polynómom.

Tab. 2.10: Koeficienty a_i pre ESTV v závislosti na hraničnej teplote zo vzťahu (2.6)

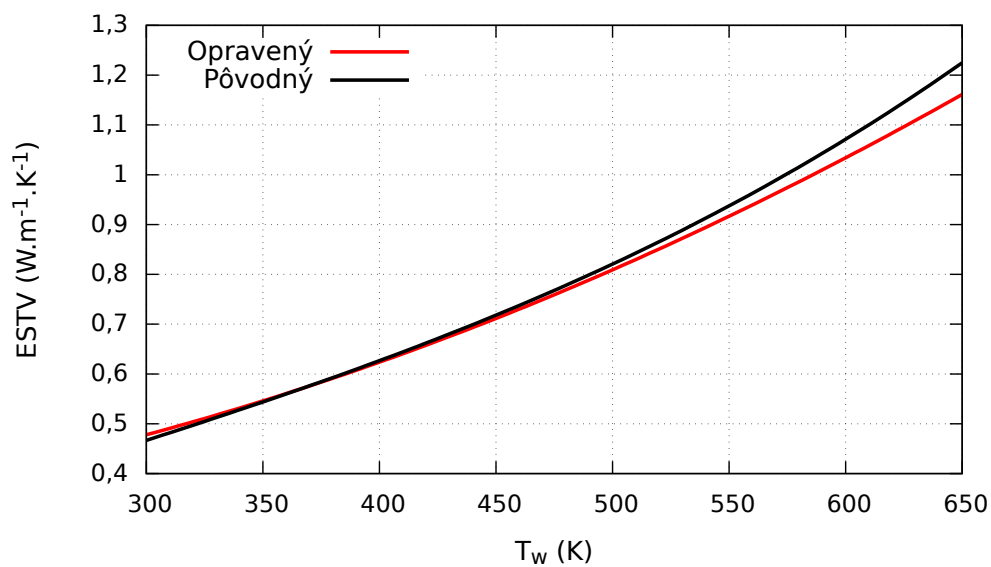
	Gd2-M+	TVSA-T
a_0	$0,280 \pm 0,010$	$0,202 \pm 0,007$
a_1	$7,57 \cdot 10^{-5} \pm 5 \cdot 10^{-5}$	$3,64 \cdot 10^{-4} \pm 3 \cdot 10^{-5}$
a_2	$1,98 \cdot 10^{-6} \pm 6 \cdot 10^{-8}$	$1,19 \cdot 10^{-6} \pm 3 \cdot 10^{-8}$

Tab. 2.11: Porovnanie pôvodného a opraveného ESTV pre PS Gd-2M+ stanoveného v závislosti na hraničnej teplote

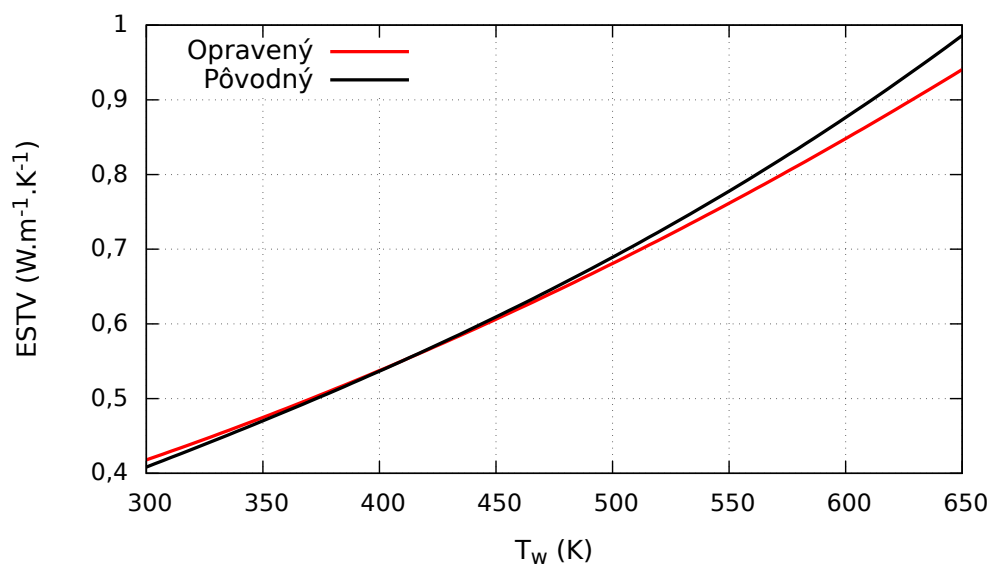
T_w (K)	ESTV pôvodný ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	ESTV opravený ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Rozdiel(%)
323,15	0,5018	0,5070	1,04
373,15	0,5815	0,5819	0,06
423,15	0,6675	0,6643	-0,49
473,15	0,7639	0,7554	-1,11
523,15	0,8730	0,8566	-1,88
573,15	0,9971	0,9687	-2,84
623,15	1,1398	1,0928	-4,12

Tab. 2.12: Porovnanie pôvodného a opraveného ESTV pre PS TVSA-T stanoveného v závislosti na hraničnej teplote

T_w (K)	ESTV pôvodný ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	ESTV opravený ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Rozdiel(%)
323,15	0,4374	0,4431	1,32
373,15	0,4979	0,5032	1,07
423,15	0,5713	0,5696	-0,31
473,15	0,6459	0,6402	-0,90
523,15	0,7286	0,7169	-1,61
573,15	0,8214	0,8002	-2,58
623,15	0,9261	0,8908	-3,81



Obr. 2.11: Porovnanie pôvodného a opraveného ESTV pre PS Gd-2M+ stanoveného v závislosti na hraničnej teplote



Obr. 2.12: Porovnanie pôvodného a opraveného ESTV pre PS TVSA-T stanoveného v závislosti na hraničnej teplote

Pre ďalšiu časť práce je výhodnejšie stanoviť ESTV v závislosti na priemernej teplote v homogénnom PS. V tomto prípade nebol použitý priemer hodnôt z dvoch výkonov, ale všetky vypočítané ESTV boli preložené polynómom. Na Obr. 2.13 a 2.14 sú vykreslené tieto hodnoty spolu s výslednou polynomicou funkciou.

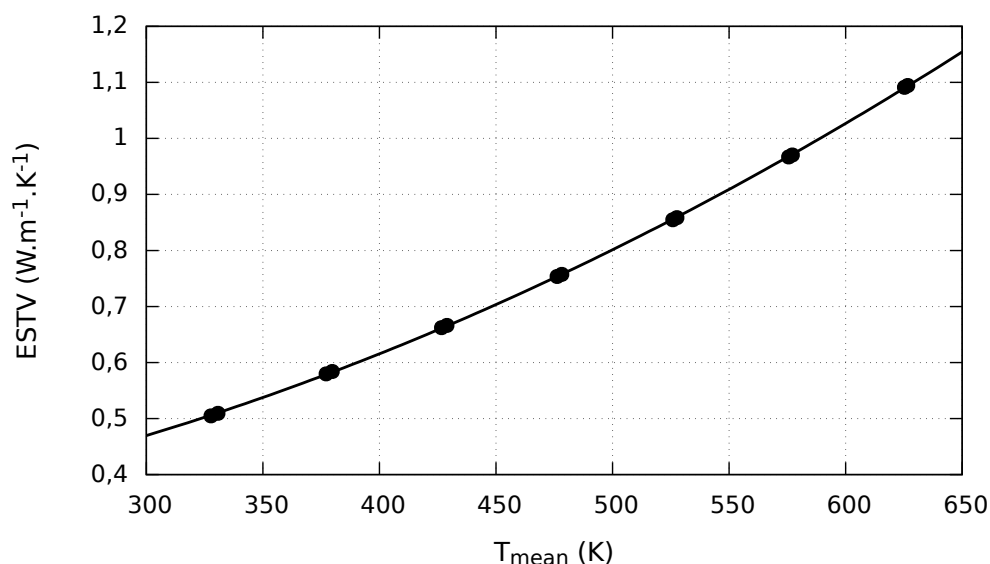
Všeobecné vyjadrenie závislosti ESTV ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) na priemernej teplote homogénneho PS v hélíu je

$$\lambda_{\text{eff}}(T_{\text{mean}}) = a_0 + a_1 \cdot T_{\text{mean}} + a_2 \cdot T_{\text{mean}}^2, \quad (2.7)$$

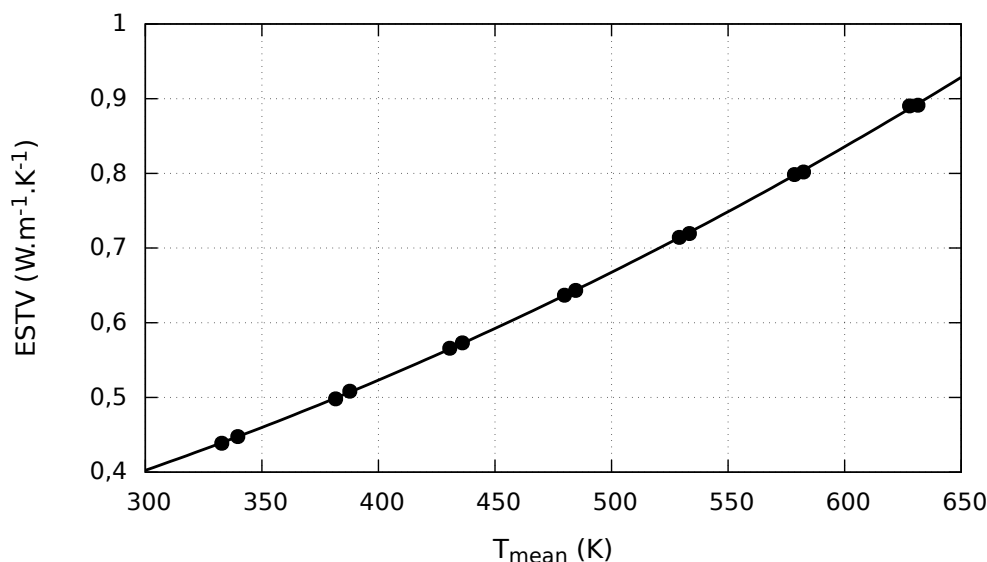
kde koeficienty a_i sa pre oba PS nachádzajú v Tab 2.13 spolu s asymptotickými štandardnými chybami z preloženia hodnôt polynómom.

Tab. 2.13: Koeficienty a_i pre ESTV v závislosti na priemernej teplote zo vzťahu (2.7)

	Gd2-M+	TVSA-T
a_0	$0,270 \pm 0,008$	$0,180 \pm 0,010$
a_1	$6,93 \cdot 10^{-5} \pm 3 \cdot 10^{-5}$	$3,78 \cdot 10^{-4} \pm 5 \cdot 10^{-5}$
a_2	$1,99 \cdot 10^{-6} \pm 4 \cdot 10^{-8}$	$1,18 \cdot 10^{-6} \pm 5 \cdot 10^{-8}$



Obr. 2.13: ESTV stanovený v závislosti na priemernej teplote v homogénnom palivovom súbore Gd-2M+

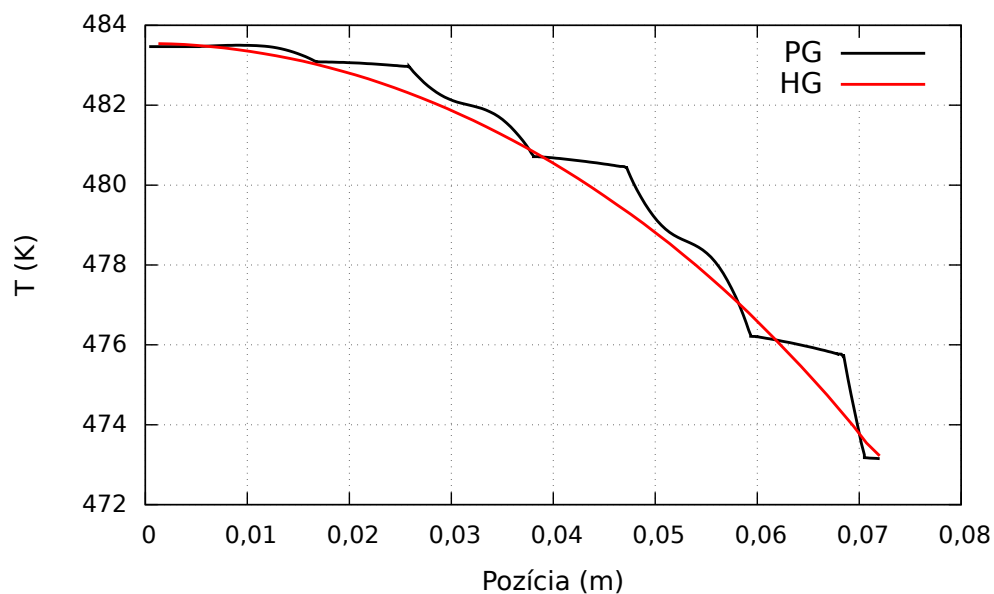


Obr. 2.14: ESTV stanovený v závislosti na priemernej teplote v homogénnom palivovom súbore TVSA-T

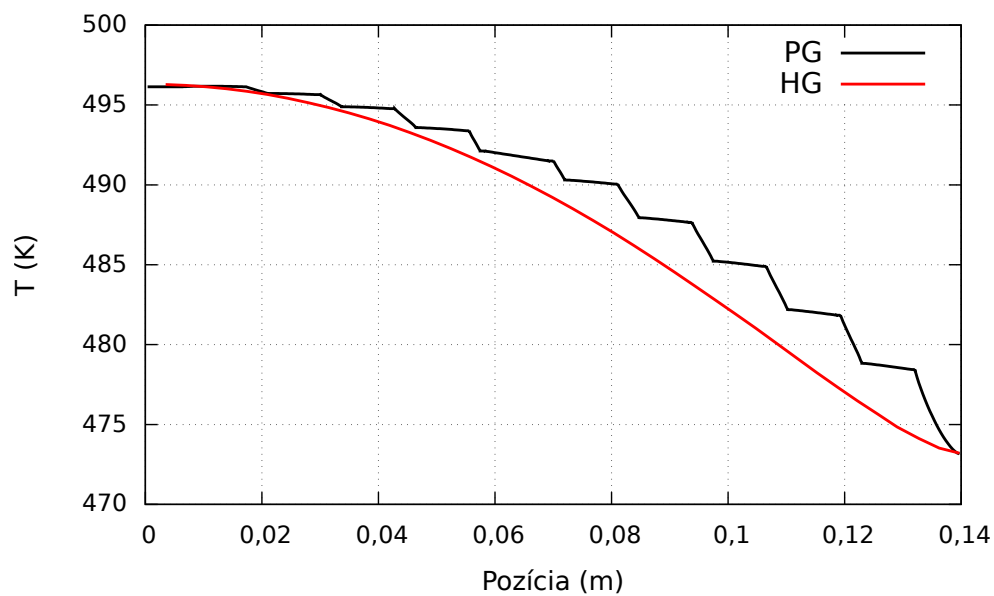
2.4.2 Overenie stanovenia ESTV

Pre oba palivové súbory bolo realizované overenie stanovenia ESTV. K tomu boli využité výpočty teplotných polí s presnou geometriou PS. Presnejšie bola porovnávaná vypočítaná PCT pri použití presnej geometrie a homogénneho materiálu. Toto porovnanie bolo pri ZTV 250 W pre palivový súbor Gd-2M+, resp. 700 W pre TVSA-T. Pre homogenizované PS boli použité stanovené ESTV v závislosti na hraničnej teplote.

V Tab. 2.14 sa nachádzajú vypočítané PCT a ich rozdiel pre oba PS. Je vidieť, že pri palivovom súbore Gd-2M+ sú rozdiely v desatinách K. Homogenizácia PS je pri tomto výkone presnejšia ako pri TVSA-T. Najväčší rozdiel je 0,33 K a so zvyšujúcou sa hraničnou teplotou sa znižuje aj rozdiel medzi PCT. Tento jav je možné pozorovať aj pri Gd-2M+, pričom pre oba PS je sledovaný rozdiel pri najvyššej uvažovanej T_w približne 0,01 K. Vyššie hraničné teploty sú fyzikálne reálnejšie počas suchého skladovania, a teda zvyšujúca sa nepresnosť pri ich nižších hodnotách nie je tak významná. Vypočítané PCT pomocou nahradenia PS navyše nadhodnocujú výsledky s PG. To je možné vidieť aj na Obr. 2.15 a 2.16, kde sa nachádzajú porovnané poklesy teplôt s presnou a homogénnou geometriou pre oba PS.



Obr. 2.15: Porovnanie poklesu teploty v PS pri ZTV 250 W a T_w 473,15 K s presnou a homogénnou geometriou pre Gd-2M+



Obr. 2.16: Porovnanie poklesu teploty v PS pri ZTV 700 W a T_w 473,15 K s presnou a homogénnou geometriou pre TVSA-T

Tab. 2.14: Porovnanie vypočítaných PCT s presnou a homogénnou geometriou PS pri ZTV 250 W (Gd-2M+) a 700 W (TVSA-T)

Gd-2M+				TVSA-T			
T_w (K)	PCT PG (K)	PCT HG (K)	Rozdiel (K)	T_w (K)	PCT PG (K)	PCT HG (K)	Rozdiel (K)
323,15	338,57	338,63	0,07	323,15	356,24	356,57	0,33
373,15	386,59	386,64	0,05	373,15	402,28	402,58	0,30
423,15	434,93	434,97	0,04	423,15	448,99	449,15	0,16
473,15	483,52	483,54	0,03	473,15	496,17	496,29	0,11
523,15	532,29	532,31	0,02	523,15	543,74	543,81	0,07
573,15	581,24	581,25	0,02	573,15	591,62	591,66	0,04
623,15	630,32	630,33	0,01	623,15	639,77	639,78	0,01

Kapitola 3

Tepelné výpočty v obalovom súbore

Pre výpočty teplotných polí bolo zvolené vyhorené palivo typu VVER 1000. Ďalej v tejto kapitole budú realizované tieto výpočty pre hypotetický nosný kôš OS a PS budú nahradené homogénnym materiálom s ESTV. Tieto výpočty budú slúžiť aj k ďalším výpočtom, v ktorých sa bude nachádzať pokus o stanovenie ESTV pre celý nosný kôš spolu s palivovými súbormi.

Tepelné pole bude riešené len pre nosný kôš, na ktorého okraji bude zadaná konštantná teplota. V tejto práci nebude počítaná geometria celého obalového súboru, pretože v takom prípade by už bolo potrebné započítať aj vplyv tepelnej radiácie v NK, a keďže sa v Českej republike PS skladujú v OS vo vertikálnej polohe, má vplyv na odvod tepla aj prirodzená cirkulácia hélia vo vnútri OS. K modelovaniu takéhoto problému by sa muselo pristupovať už v troch rozmeroch. Z toho istého dôvodu by nebolo možné ani modelovanie vonkajšieho povrchu OS, kde dochádza k odvodu tepla aj pomocou prirodzenej konvekcie a tepelnej radiácie.

3.1 Obalový súbor

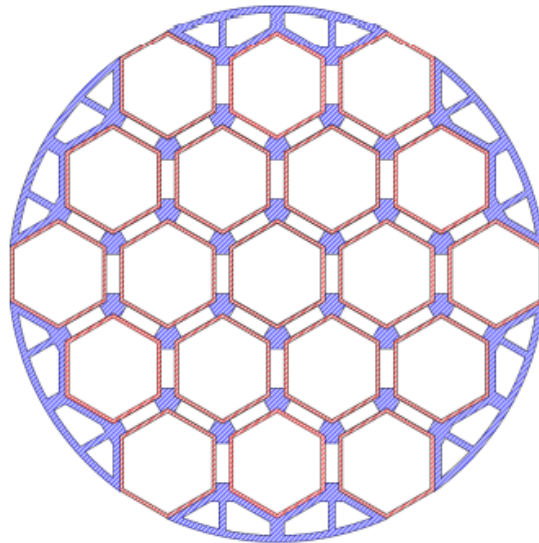
V Českej republike sa k skladovaniu vyhoreného jadrového paliva používa suché skladovanie v obalových súboroch, ktoré sa nachádzajú v medziskladoch VJP vo vertikálnej polohe. Príkladom OS môže byť CASTOR 440/84M pre palivové súbory typu VVER 440 a a pre typ VVER 1000 môže byť príkladom ŠKODA 1000/19 a CASTOR 1000/19. Keďže tepelné výpočty v OS budú v tejto kapitole zamerané na palivo typu VVER 1000, budú ďalej popísané konštrukcie len OS ŠKODA 1000/19 a CASTOR 1000/19.

Obalový súbor ŠKODA 1000/19 je tvorený valcovým telesom s dvojvekovým uzatváracím systémom, na ktorý je ešte namontovaná ochranná doska. Na vonkajšom povrchu sa nachádza pre zlepšenie odvodu tepla 185 radiálnych rebier. Vo valcovej stene sa ďalej nachádza 42 polyetylénových tyčí o priemere 97 mm, ktoré slúžia k spomaľovaniu neutrónov. Polyetylén je ešte použitý v doskách pod sekundárnym vekom a pod ochrannou doskou. PS drží na svojom mieste nosný kôš. Ten ďalej slúži aj k spevneniu OS a k zlepšeniu odvodu tepla z PS. [24] Obalový súbor CAS-

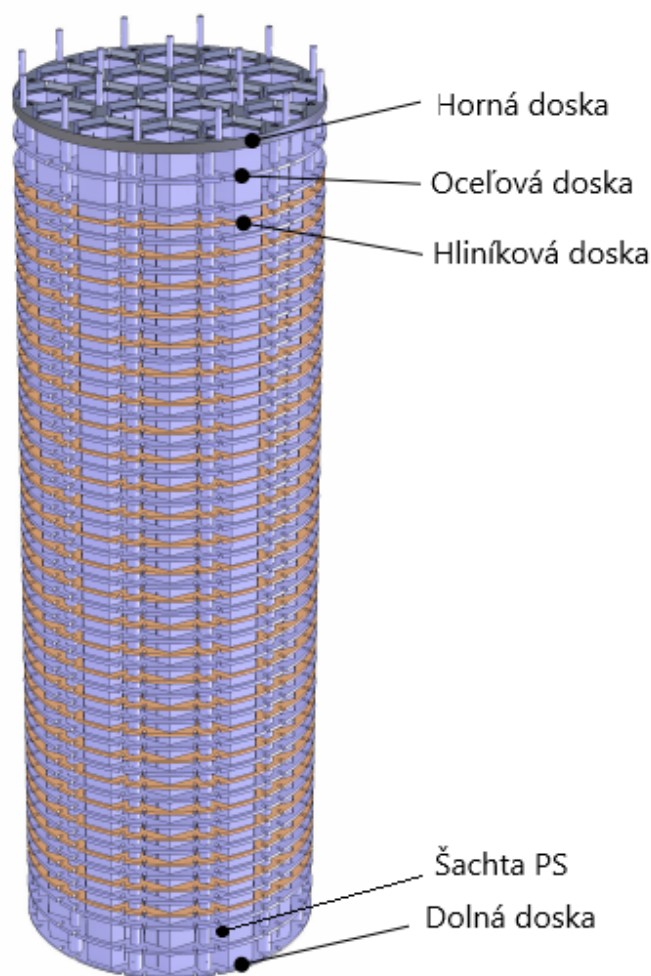
TOR 1000/19 tvorí valcové teleso, ktoré má rovnako dvojvekový uzatvárací systém. K spomaľovaniu neutrónov sú použité polyetylénové tyče a dosky. Rozdielny je počet rebier - CASTOR 1000/19 má 180 radiálnych rebier na vonkajšom povrchu telesa. [28]

Hlavným rozdielom v konštrukcii medzi ŠKODA 1000/19 a CASTOR 1000/19 je nosný kôš. Na Obr. 3.1 je radiálny rez košom OS ŠKODA 1000/19, kde modrá značí nebóvanú zliatinu a červená bórovanú. PS sa vkladajú do šesťuholníkových šacht (červená farba). Medzi šachtami sa nachádzajú dištančné tyče, ktoré majú tvar trojčepvej hviezdy. Nosný kôš držia na mieste duté hliníkové výplne. Priestor vo výplni ale nie je spojený s dolnou héliovou dutinou, aby prirodzená cirkulácia smerovala vo vertikálnom smere cez PS. Obdĺžnikové časti medzi šachtami sú vyplnené dištančnými členmi, ktoré nie sú na obrázku zobrazené. [28]

Kôš OS CASTOR (Obr. 3.2) sa skladá z 19 plechových šacht, do ktorých sa vkladajú PS. Medzi nimi sa po výške striedajú hliníkové a oceľové dosky. Oceľ je použitá k spevneniu celého OS a hliník z dôvodu vysokého súčiniteľa tepelnej vodivosti. Medzi doskami sa nachádzajú dištančné trubice, ktoré udržujú vzdialenosť medzi nimi. Celú konštrukciu nosného koša spevňuje 12 závitových tyčí po obvode. Voľný priestor je vyplnený héliom. [5]



Obr. 3.1: Radiálny rez nosným košom obalového súboru ŠKODA 1000/19 [28]



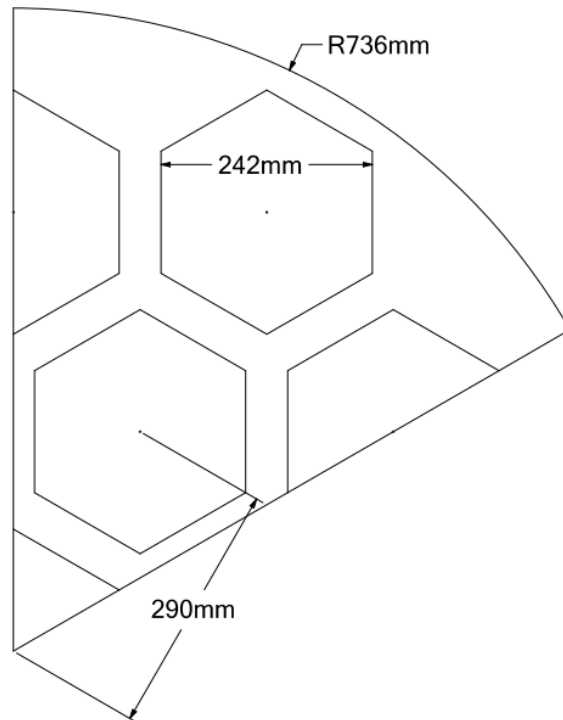
Obr. 3.2: Nosný kôš obalového súboru CASTOR 1000/19. Upravené z [7]

3.2 Tvorba geometrie a výpočtovej siete

V programe ANSYS SpaceClaim bola vytvorená výpočtová geometria, ktorá predstavovala zjednodušený kôš OS. Geometria pozostávala z dvojrozmerného radiálneho rezu košom s použitím 1/6 symetrie. Na Obr. 3.3 sa nachádzajú aj použité rozmery, pričom medzi jednotlivými PS bol konštantný rozstup 290 mm. [7] Tento hypotetický nosný kôš OS bol inšpirovaný konštrukciou CASTOR 1000/19, ale nie je modelovaná presná geometria a jeho vlastnosti. PS boli modelované ako homogénny pevný materiál, v ktorom bol rovnomerne generovaný výkon. Kôš bol modelovaný ako jeden homogénny materiál, ktorý nahradil hliníkové a oceľové dosky a hélium.

Výpočtová sieť bola vytvorená v programe ANSYS Meshing. Sieť bola konformná (susedné elementy mali spoločné strany rovnako dlhé) a skladala sa z trojuholníkových elementov. V rámci tvorby siete bola realizovaná aj citlivosťná analýza siete. Bolo vytvorených niekoľko sietí s rôznymi veľkosťami elementov a sledovala sa maximálna teplota v nosnom koši. V Tab. 3.1 sú vypísané vytvorené siete a u každej sa nachádza počet elementov a nódov a jej parametre kvality. Všetky siete splňovali

odporúčané hodnoty týchto parametrov (Tab. A.1). Výpočty pre citlivostnú analýzu mali rovnaké nastavenie a vlastnosti materiálov ako výpočty, ktoré boli nasledovne pomocou vybranej siete realizované. Popis materiálov a nastavení výpočtu sa nachádza ďalej v tejto kapitole. Hraničné podmienky pre túto analýzu boli výkon jedného PS 700 W a hraničná teplota na valcovom okraji nosného koša 330 K.



Obr. 3.3: Radiálny rez košom OS s použitou 1/6 symetriou

Na Obr. 3.4 je zobrazená vypočítaná závislosť maximálnej teploty palivového pokrytia (v tomto prípade je to aj maximálna teplota vo výpočtovej oblasti) na počte elementov jednotlivých sietí. Je vidieť, že zvyšovanie počtu elementov má u najhustejších troch sietí malý vplyv. Z citlivostnej analýzy bola pre ďalšie výpočty vybraná sieť 3 s počtom elementov viac ako 1,6 milióna. Parametre kvality tejto siete spĺňajú odporúčané hodnoty (Tab. A.1) a závislosť maximálnej teploty na hustote siete je malá.

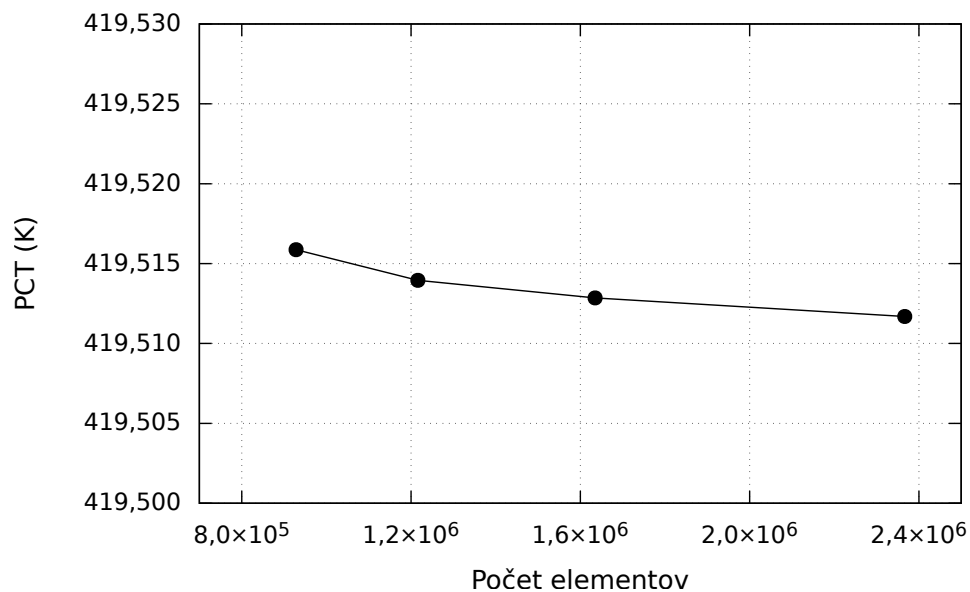
Tab. 3.1: Siete vytvorené pre citlivostnú analýzu vplyvu výpočtovej siete k výpočtu s NK

Sieť 1			
P. elementov:		928547	P. nódov: 465677
PCT: 419,516 K			
Parameter	min.	max.	priem.
PST	1,000	2,518	1,195
SK	0,000	0,606	0,054
KO	0,636	1,000	0,967

Sieť 2			
P. elementov:		1216191	P. nódov: 609698
PCT: 419,514 K			
Parameter	min.	max.	priem.
PST	1,000	2,799	1,200
SK	0,000	0,679	0,056
KO	0,603	1,000	0,965

Sieť 3			
P. elementov:		1634873	P. nódov: 819307
PCT: 419,513 K			
Parameter	min.	max.	priem.
PST	1,000	2,882	1,223
SK	0,000	0,666	0,066
KO	0,568	1,000	0,959

Sieť 4			
P. elementov:		2366712	P. nódov: 1185600
PCT: 419,512 K			
Parameter	min.	max.	priem.
PST	1,000	3,284	1,247
SK	0,000	0,689	0,076
KO	0,537	1,000	0,953



Obr. 3.4: Citlivostná analýza výpočtovej siete

3.3 Materiály

K výpočtom boli použité len dva materiály - pre PS a pre nosný kôš. Keďže sa jedná len o výpočty zdieľania tepla kondukciou v stacionárnom prípade, stačí pre zadenovanie materiálov len ich súčiniteľ tepelnej vodivosti. Pre PS bol použitý ESTV, ktorý bol stanovený v Kap. 2.4.1. Presnejšie bola použitá jeho závislosť na priemernej teplote v palivovom súbore (2.7) s koeficientami z Tab. 2.13. Pri výpočte neboli uvažované medzery v NK, a teda nebolo zahrnuté ani zdieľanie tepla pomocou tepelnej radiácie. Príspevok radiácie je započítaný len v ESTV palivového súboru.

Nosný kôš bol inšpirovaný konštrukciou OS CASTOR 1000/19 (Obr. 3.2). Pre zjednodušenie výpočtov bol NK modelovaný ako homogénny materiál a jeho súčiniteľ tepelnej vodivosti bol prepočítaný pomocou objemových zlomkov jednotlivých častí nosného koša (ocel, hliník a hélium). Takéto modelovanie nosného koša bolo možné preto, lebo sa nahradzuje kompozitný materiál a každá doska, resp. oblasť hélia medzi doskami, sú rovnobežne nad sebou a neboli uvažované dištančné trubice a závitové tyče. Približné hrúbky jednotlivých dosiek z hliníku a ocele boli dodané vedúcim práce v rámci konzultácií [13]:

- hrúbka hliníkovej dosky: 15 mm;
- hrúbka oceľovej dosky: 19 mm;
- počet hliníkových dosiek na výške 4,5 m: 26;
- počet oceľových dosiek na výške 4,5 m: 27.

V Tab. 3.2 sa nachádzajú hodnoty pre výpočet súčiniteľa tepelnej vodivosti hypotetického nosného koša. Najskôr boli vypočítané celkové výšky hliníkových a oceľových dosiek. Ich doplnkom do 4,5 m bola „výška“ hélia, ktorý vyplňuje zvyšok priestora. Z týchto výšok boli vypočítané objemové zlomky. Približný súčiniteľ tepelnej vodivosti hliníka bol prevzatý z [22] pri teplote 423,15 K, oceľ bola zvolená ATABOR z [25] a pre hélium bola použitá hodnota pri 423,15 K. V Tab. 3.2 sa rovnako nachádza aj vypočítaný súčiniteľ tepelnej vodivosti pre hypotetický nosný kôš λ_{NK} . Tento súčiniteľ nie je závislý na teplote, pretože pri takejto geometrii a závislostiach súčiniteľov tepelnej vodivosti konštrukčných materiálov na teplote by bolo náročné zostaviť takýto model. Rovnako by bolo potrebné započítať aj vplyv tepelnej radiácie, ktorý rastie so zvyšujúcou sa teplotou štvrtou mocninou.

Tab. 3.2: Výpočet súčiniteľa tepelnej vodivosti hypotetického nosného koša [13], [22], [25]

Materiál	Výška (m)	V (m ³)	Objemový zlomok (-)	λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	λ_{NK} (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
Al	26 · 0,015	0,288	0,087	229,00	21,954
Oceľ	27 · 0,019	0,379	0,114	17,00	
He	3,597	2,655	0,799	0,20	

3.4 Hraničné podmienky a nastavenia

Pri výpočtoch bol znovu použitý výpočtový kód ANSYS Fluent, pričom pri tomto probléme bolo potrebné len zapnúť riešenie rovnice zákona zachovania energie (riešenie rovníc prúdenia bolo vypnuté). Pre výpočet bola uvažovaná homogénna vsádzka, čiže každý PS mal rovnaký ZTV. Výkon bol zadaný v tvare merného objemového výkonu. Tieto hodnoty sa nachádzajú v Tab. 3.3. Najvyšší použitý výkon v jednom PS bol 950 W, ktorý odpovedá ZTV palivového súboru s vyhorením 55 MWd/kgU po približne 5 rokoch od vyňatia z AZ. [14] Ďalšie dva výkony boli použité rovnaké ako pri stanovení ESTV v Kap. 2.

Tab. 3.3: Celkové výkony v OS, výkony v jednom PS a prepočítané merné objemové výkony v jednom homogénnom PS

\dot{Q} OS (W)	\dot{Q} 1 PS (W)	q_v (W·m ⁻³)
18050	950	5089,87
13300	700	3750,43
7600	400	2143,10

Na ľavom a pravom okraji výpočtovej oblasti (Obr. 3.3) boli zadané symetrické hraničné podmienky. Na konci nosného koša bola nastavená konštantná hraničná teplota T_w , ktorá sa zadávala z intervalu [323, 15; 523, 15] K. Keďže ESTV palivových súborov sú stanovené v závislosti na priemernej teplote v PS a v konkrétnom PS sa tento súčiniteľ nemení, bolo potrebné vytvoriť a vložiť užívateľom definovanú funkciu. Nižšie bude popísaná tvorba a použitie týchto funkcií spolu s vytvorenou funkciou pre výpočet ESTV daného PS.

3.4.1 Užívateľom definované funkcie

Pre tento špecifický problém, kedy je vlastnosť materiálu dopočítaná z inej počítanej veličiny (napr. priemernej teploty), je potrebné v prostredí programu Fluent vytvoriť užívateľom definované funkcie (UDF). Návody k tvorbe týchto funkcií sa nachádzajú v manuáli [1]. UDF je v ANSYS Fluent myslená funkcia napísaná v programovacom jazyku C alebo C++, ktorá môže byť načítaná do výpočtového kódu a slúži k zlepšeniu jeho možností. Je ich možné použiť napr. na:

- úpravu hraničných podmienok, definíciu vlastností materiálov, zdrojových členov v transportných rovniciach, atď.;
- upravenie vypočítaných hodnôt raz za iteráciu;
- inicializáciu výpočtu;
- úpravu hodnôt na konci iterácie, po ukončení ANSYS Fluent alebo po načítaní skompilovanej UDF knižnice;
- zlepšenie postprocessingu;
- vylepšenie už existujúcich ANSYS Fluent modelov (napr. radiačných, viacfázových...).

Je potrebné brať v úvahu, že takmer všetky zadané a vrátené hodnoty sú v jednotkách SI. Pri paralelných výpočtoch je potrebné v UDF zohľadniť to, že výpočtová sieť sa rozdelí na niekoľko častí. To môže spôsobiť, že jedna komponenta môže vo výsledku mať jednu veličinu s rôznymi hodnotami (napr. komponenta rozdelená na dve časti má na konci riešenia dve priemerné teploty).

Jeden zdrojový súbor môže obsahovať aj viac UDF. Tieto súbory môžu byť buď interpretované alebo kompilované v ANSYS Fluent. Interpretovanou UDF sa nazýva taká funkcia, ktorej zdrojový súbor je načítaný priamo počas výpočtu v jednokrokovom procese. Pokiaľ sa proces skladá z dvoch samostatných krokov, je potrebné použiť skompilovanú funkciu. Každá UDF musí byť definovaná pomocou makier *DEFINE*, ktoré sú súčasťou ANSYS Fluent a musí obsahovať príkaz *include udf.h*. Nakoniec musí byť riešič kódu Fluent spojený v užívateľskom prostredí s danou funkciou. Pokiaľ je toto všetko splnené, je možné vlastné funkcie zvoliť v dialógovom okne v prostredí programu.

Vyššie bolo napísané, že zdrojový kód obsahujúci UDF môže byť v prostredí Fluent buď interpretovaný alebo skompilovaný. Táto terminológia sa používa v rámci výpočtového kódu Fluent, ale oba typy funkcií sú skompilované a líšia sa tým, ako je zdrojový kód skompilovaný, a kódom, ktorý vznikne po kompilácii. Skompilované UDF sú oproti interpretovaným rýchlejšie, môžu byť napísané v programovacom jazyku C a C++ (interpretované len v C), môžu zavolať funkcie napísané v iných programovacích jazykoch ale nie sú prenosné na iné platformy a potrebujú C kompilátor.

V rámci tejto práce bola vytvorená UDF pre použitie ESTV pre palivové súbory. Táto funkcia sa nachádza v prílohe v Kap. B.1. Je to vytvorená funkcia, ktorá vezme priemernú teplotu danej komponenty (v tomto prípade PS) a pomocou stanoveného vzťahu pre ESTV priradí materiálu súčiniteľ tepelnej vodivosti. V prílohe je funkcia len pre jednu komponentu a v prípade, kedy by bolo viacero takýchto komponent vo výpočte, musela by funkcia obsahovať tento kód pre každú zvlášť.

Prvá časť UDF slúži k definovaniu súčiniteľa tepelnej vodivosti, kde sa v kóde nachádza „X(tavg)“. Namiesto toho, je potrebné napísať stanovenú závislosť ESTV na priemernej teplote, čo sa nachádza aj v komentári UDF. V ďalšej časti je samotný výpočet priemernej teploty komponenty. Aj keď je v tejto práci riešený dvojrozmerný problém, Fluent s touto geometriou počíta ako s trojrozmernou, pričom sieť obsahuje len jeden „axiálny“ nód o jednotkovom rozmere. Z tohto dôvodu je priemerná teplota počítaná vzťahom

$$T_{\text{mean}} = \frac{\sum_i T_i \cdot V_i}{\sum_i V_i}, \quad (3.1)$$

kde T_i je teplota jedného elementu a V_i je jeho objem. Ďalej je v tejto UDF potrebné zadať, ktorej komponenty bude priemerná teplota počítaná. V prostredí Fluent je každá časť geometrie pomenovaná a daná svojím číslom. Toto číslo je následne potrebné prepísať v UDF namiesto Y v „int zone_ID=Y“.

Už bolo napísané, že pri použití paralelných výpočtov, môžu spôsobiť UDF problémy pri výpočte. Preto je súčasťou vytvorenej UDF časť, ktorá rieši tento problém. Pokiaľ paralelný výpočet rozdelí sieť tak, že aj sledovaná komponenta bude rozdelená na viacero výpočtových oblastí, tak posledná časť UDF sčíta jednotlivé členy vo vzťahu (3.1) z každej výpočtovej oblasti. Pokiaľ je použitý sériový výpočet, alebo rozdelenie siete nezasiahne danú komponentu, nemá táto časť kódu vplyv na výpočet.

Posledným krokom je prepojenie UDF s výpočtovým kódom ANSYS Fluent. V prostredí programu je možné vybrať, či je funkcia interpretovaná alebo skompilovaná. V tomto prípade bola zvolená skompilovaná a v dialógovom okne sa načíta UDF. Pre kompiláciu je možné použiť buď vlastný kompilátor, alebo zabudovaný vo Fluent. Po úspešnom skompilovaní je nutné vo „function hooks“ pripojiť funkciu. Následne sa pri nastavení vlastností materiálov zobrazí nová vytvorená vlastnosť (v tomto prípade súčiniteľ tepelnej vodivosti).

Verifikácia UDF

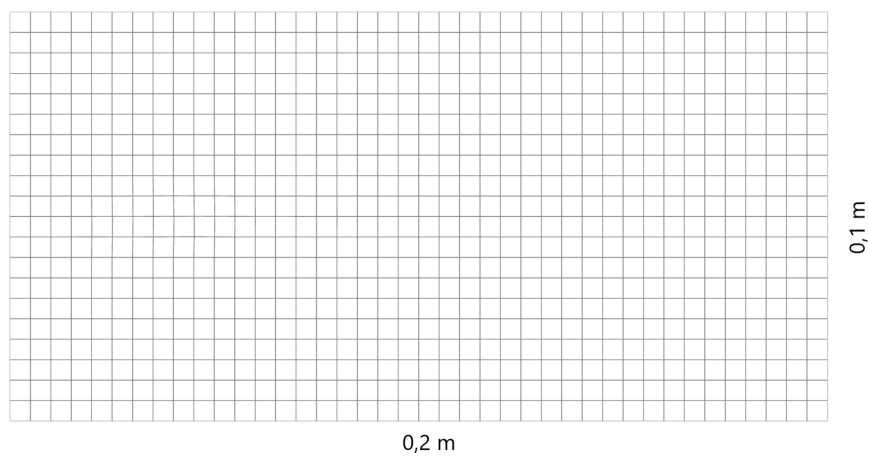
Správnosť vytvorenia tejto UDF bola overená na jednoduchom výpočte v porovnaní s analytickým výpočtom. Na Obr. 3.5 je zobrazená vytvorená geometria a výpočtová sieť. V prostredí Fluent bolo nastavené riešenie len rovnice zákona zachovania energie a po skompilovaní UDF bol zadaný súčiniteľ tepelnej vodivosti, ktorý bol rovnaký ako stanovený ESTV pre TVSA-T. Na hornú a dolnú stranu obdĺžnika bol zadaný nulový tepelný tok. Bočné steny mali konštantnú teplotu, a to 340 K na ľavej strane a 320 K na pravej. Z toho vyplýva, že priemerná teplota

je aritmetickým priemerom týchto dvoch teplôt:

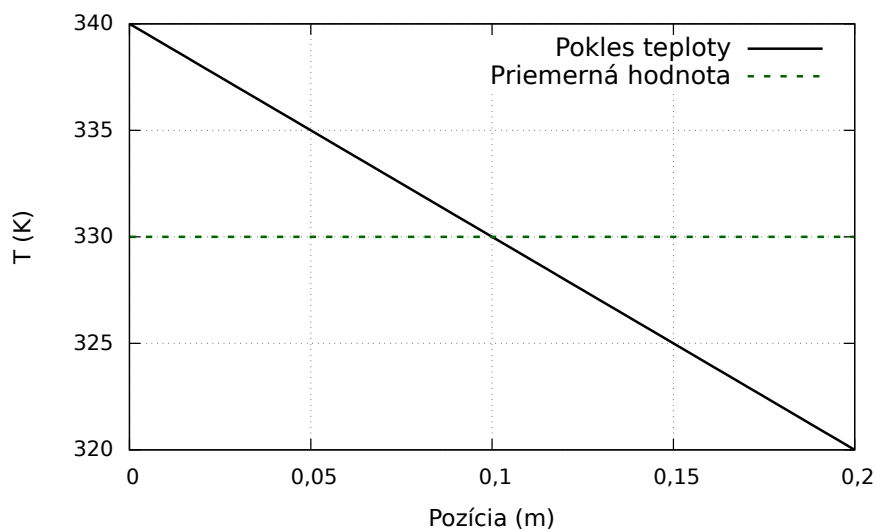
$$T_{\text{mean}} = \frac{340 + 320}{2} = 330 \text{ K.} \quad (3.2)$$

Po dosadení tejto teploty do vzťahu (2.7) pri použití koeficientov pre TVSA-T v Tab. 2.13 by mal byť súčiniteľ tepelnej vodivosti v tomto obdĺžniku konštantný a rovná sa $\lambda = 0,4332 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Vypočítaný pokles teploty sa nachádza na Obr. 3.6. Ďalej sú v Tab. 3.4 porovnané analyticky vypočítané hodnoty s numericky vypočítanými. Je vidieť, že po zaokrúhlení sa aj priemerné teploty, aj súčinitele tepelnej vodivosti rovnajú. Ďalej pre λ platí, že je konštantný v celom obdĺžniku, čo vyplýva napr. aj z toho, že jeho maximálna a minimálna hodnota sa rovná tej priemernej.



Obr. 3.5: Geometria a výpočtová sieť pre verifikáciu UDF



Obr. 3.6: Pokles teploty v obdĺžniku

Tab. 3.4: Porovnanie výpočtov pre verifikáciu UDF

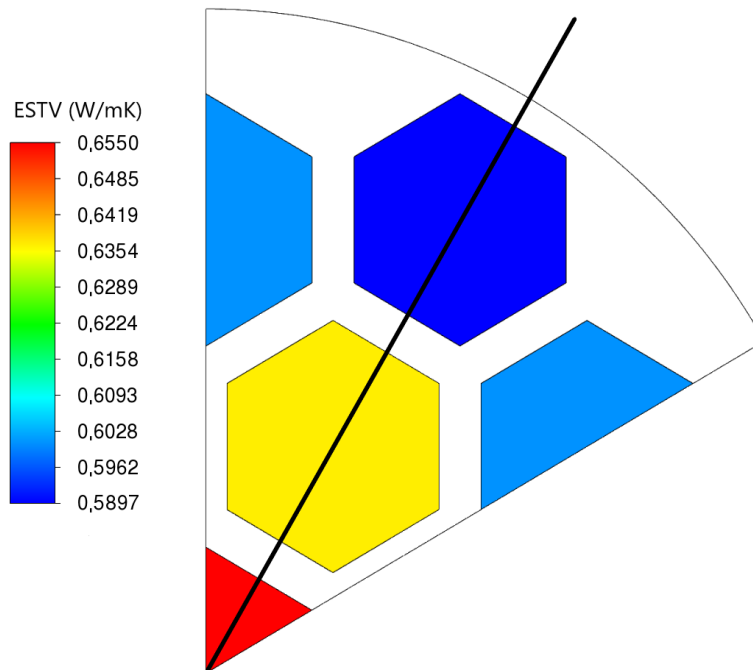
	Analyticky	Fluent
T_{mean} (K)	330,0000	329,9998
λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	0,43324	0,43324

3.5 Výsledky výpočtov v OS

Celkovo bolo realizovaných 27 výpočtov teplotných polí v NK. Pri výpočtoch bola okrem poklesu hodnoty rezidua sledovaná aj konvergencia maximálnej teploty v nosnom koši. Výpočet končil pri dostatočnom poklese rezidua (na menšiu hodnotu ako $1 \cdot 10^{-10}$) a kritérium pre konvergenciu maximálnej teploty bolo nastavené tak, že rozdiel hodnoty medzi dvomi iteráciami za sebou bol menší ako $1 \cdot 10^{-5}$. Výpočet bol realizovaný pomocou tzv. design points, čiže sa v prostredí ANSYS Workbench menili vstupné parametre (hraničná teplota a výkon v PS), ktoré boli definované v ANSYS Fluent. Pri výpočtoch bola ďalej kontrolovaná aj správnosť počítania s UDF, kedy sa vypisovala maximálna a minimálna hodnota súčiniteľa tepelnej vodivosti v palivových súboroch. Tieto hodnoty museli byť rôzne a vychádzať z priemernej teploty v danom PS.

K overeniu použitia UDF sú na Obr. 3.7 vykreslené súčinitele tepelnej vodivosti pri jednom výpočte teplotného poľa. Je vidieť, že v rámci jedného PS sa ESTV nemení, ale keďže každý PS má rôznu priemernú teplotu, tak sa jednotlivé ESTV medzi sebou líšia. Najvyšší ESTV má PS v strede a najnižší na okraji. To súhlasí s predpokladom, že palivový súbor v strednej pozícii má najvyššiu priemernú teplotu, a teda by mal mať aj podľa vzťahu (2.7) najvyšší ESTV a na okrajovej pozícii je PS s najnižšou priemernou teplotou a mal by mať aj najnižší ESTV.

Pri výpočtoch bola sledovaná maximálna teplota, ktorá predstavuje PCT. V Tab. 3.5 sa nachádzajú vypočítané maximálne teploty T_{max} v závislosti na hraničnej teplote T_w pre všetky tri uvažované ZTV. Na Obr. 3.9 sú vykreslené vypočítané teplotné polia pri hraničnej teplote 423,15 K. Pre porovnanie sú vykreslené všetky tri použité výkony. Je vidieť, že najvyššia teplota je v stredovom PS, pretože každý PS mal rovnaký ZTV. V PS, ktoré sú mimo stredovú pozíciu, je maximálna teplota vychýlená mimo centrum PS a je posunutá smerom do stredu NK. Veľkosť ZTV má malý vplyv na posun miesta s maximálnou teplotou v PS. V žltom PS na Obr. 3.7 sa posunulo jeho maximum na čiernej priamke o približne 2 mm medzi výkonmi PS 400 W a 950 W pri rovnakej hraničnej teplote OS 423,15 K. Pri vyššom výkone sa posunulo maximum smerom do stredu PS. Väčší vplyv na miesto s maximálnou teplotou PS má teplota. Pri hraničnej teplote OS 323,15 K sa posunulo maximum po čiernej priamke v žltom PS o viac ako 15 mm smerom do stredu PS (znovu žltý PS na Obr. 3.7) oproti hraničnej teplote 423,15 K pri rovnakom ZTV 700 W.



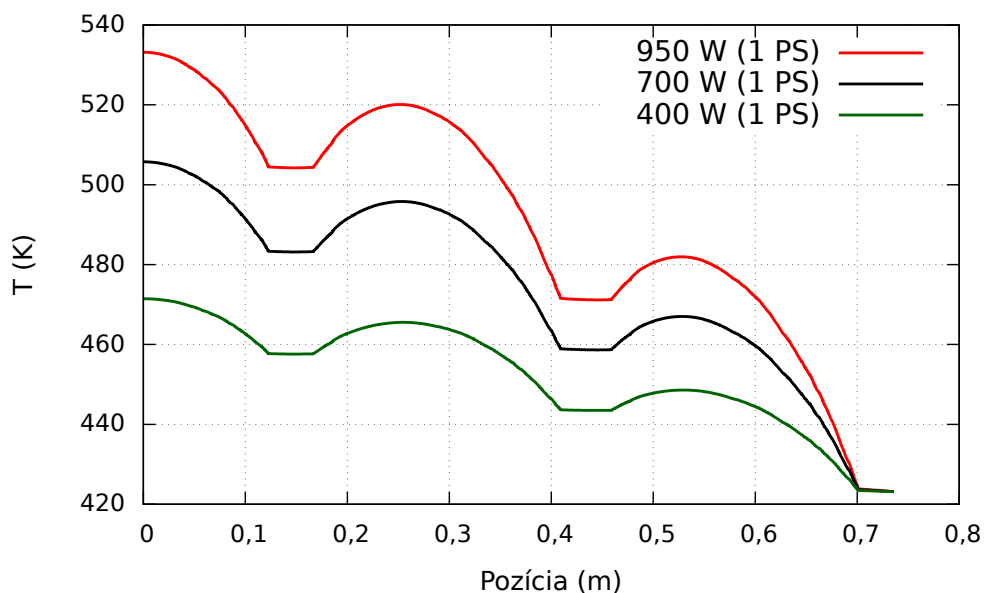
Obr. 3.7: ESTV palivových súboroch pri výpočte so ZTV 700 W a hraničnej teplote 423,15 K

Pokles teploty v NK sa nachádza na Obr. 3.8. Pre každý výkon bol vykreslený cez stred výpočtovej oblasti (čierna čiara na Obr. 3.7), tak aby boli zobrazené tri PS. Je vidieť, že pri vyšších výkonoch dochádza k výraznejším rozdielom medzi okrajom PS a jeho maximálnou teplotou, aj keď hodnota ESTV palivového súboru s vyššou teplotou rastie. Najväčší pokles teploty je na konci NK, kde sa negeneruje žiaden tepelný výkon a súčiniteľ tepelnej vodivosti je výrazne vyšší ako v PS.

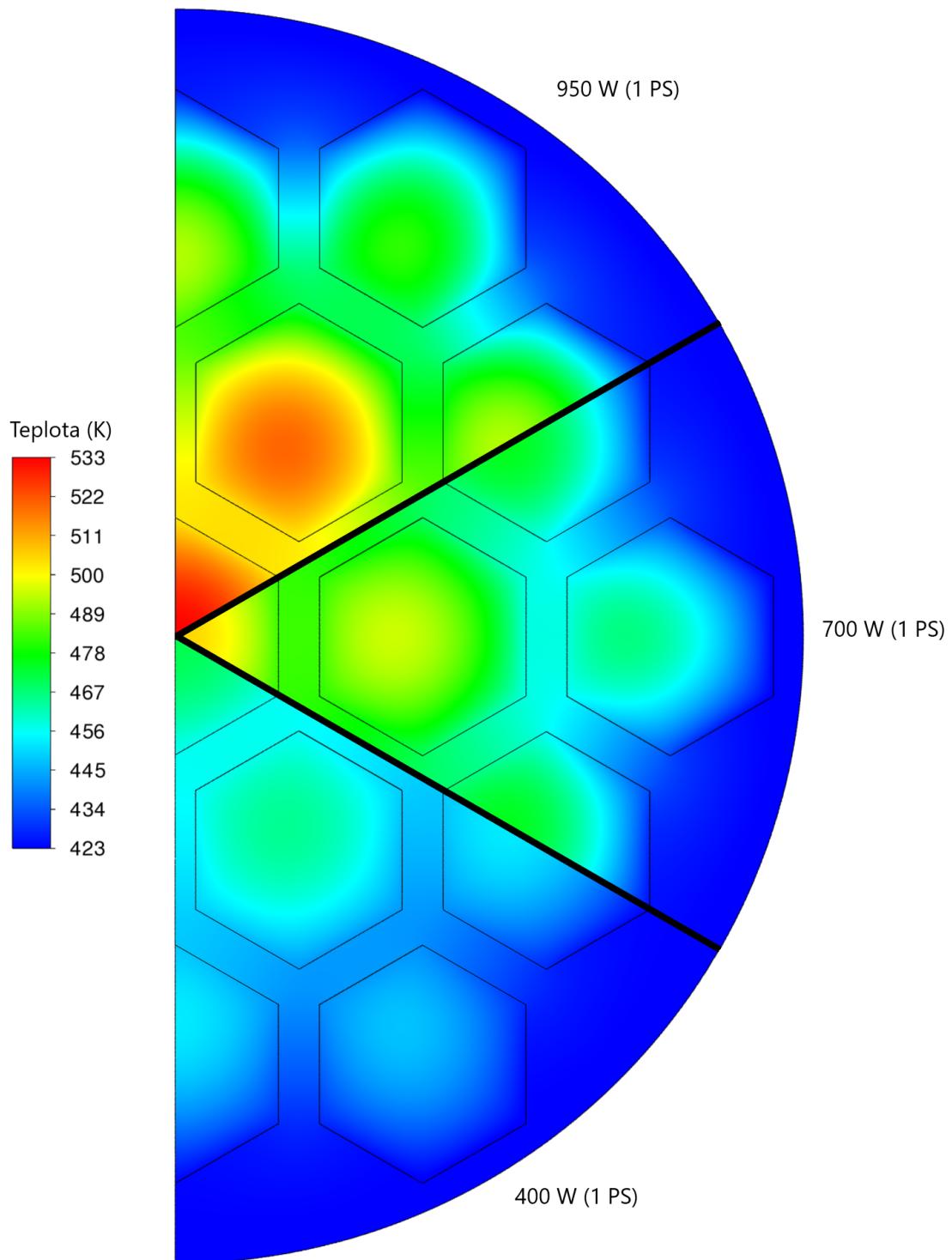
Rozdiel medzi maximálnou a hraničnou teplotou je vykreslený na Obr. 3.10. Je vidieť, že pri všetkých použitých výkonoch sa so zvyšujúcou sa teplotou tento rozdiel znižuje. To je spôsobené len so zvýšením hodnoty ESTV v palivových súboroch, keďže súčiniteľ tepelnej vodivosti NK je v tomto výpočte nezávislý na teplote. V skutočnosti by bol tento rozdiel ešte menší, keďže súčiniteľ tepelnej vodivosti aj hélia, aj materiálov dosiek rastie s teplotou. Ďalej by k odvodu tepla z PS prispievala aj tepelná radiácia a prirodzená cirkulácia hélia vo vertikálnom smere v OS. Tieto výsledky výpočtov sú teda konzervatívne oproti tomu, aké by boli dosahované teploty v skutočnosti pri použití tohto hypotetického NK.

Tab. 3.5: Výsledky výpočtov teplotných polí v nosnom koši pre tri ZTV

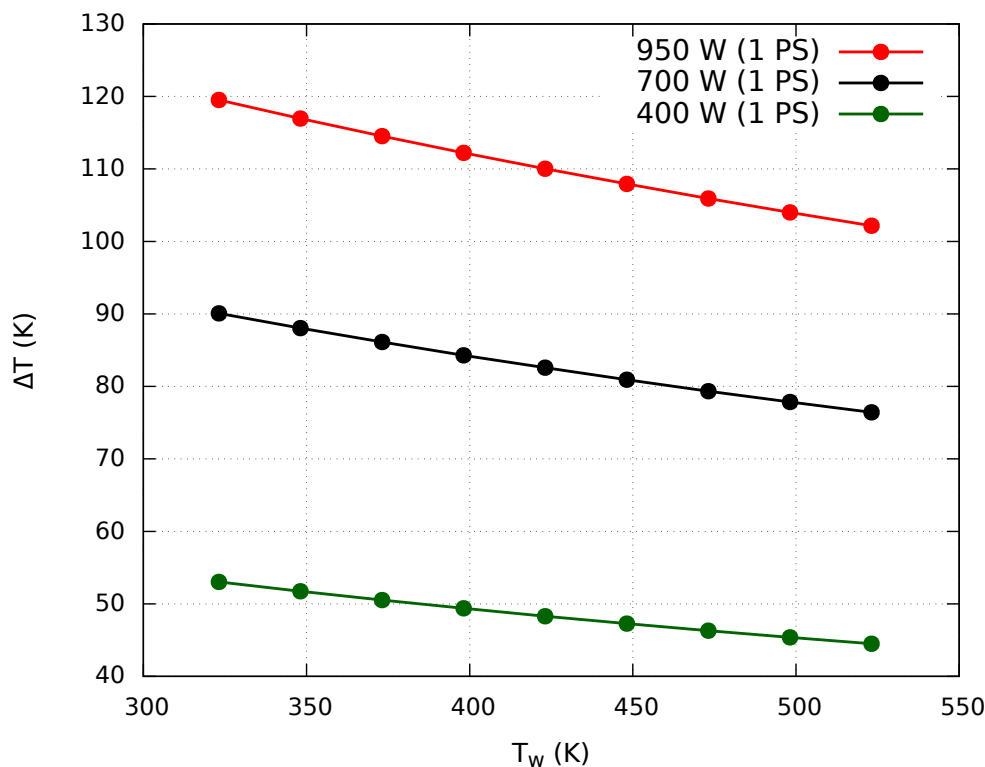
\dot{Q} OS	\dot{Q} 1 PS	\dot{Q} OS	\dot{Q} 1 PS	\dot{Q} OS	\dot{Q} 1 PS
18050 W	950 W	13300 W	700 W	7600 W	400 W
T_w (K)	T_{max} (K)	T_w (K)	T_{max} (K)	T_w (K)	T_{max} (K)
323,15	442,67	323,15	413,23	323,15	376,17
348,15	465,11	348,15	436,20	348,15	399,89
373,15	487,68	373,15	459,27	373,15	423,68
398,15	510,37	398,15	482,44	398,15	447,53
423,15	533,17	423,15	505,71	423,15	471,45
448,15	556,08	448,15	529,06	448,15	495,43
473,15	579,07	473,15	552,49	473,15	519,46
498,15	602,16	498,15	576,00	498,15	543,53
523,15	625,32	523,15	599,56	523,15	567,66



Obr. 3.8: Teplotný profil nosného koša s PS pri troch výkonoch PS a hraničnej teplote 423,15 K



Obr. 3.9: Vypočítané teplotné pole nosného koša s PS pri troch výkonoch PS a hraničnej teplote 423,15 K



Obr. 3.10: Rozdiel medzi maximálnou a hraničnou teplotou vo výpočtovej oblasti v závislosti na hraničnej teplote pre tri výkony

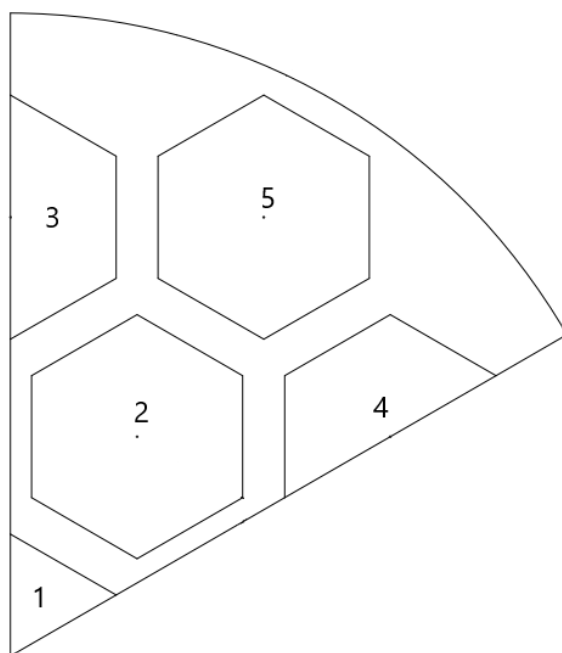
3.6 Výpočet s heterogénnou vsádzkou

Homogénna vsádzka je jedno zo zjednodušení, ktoré bolo uvažované pri výpočtoch. V skutočnosti je potrebné uvažovať rôzny zvyškový tepelný výkon v jednotlivých PS. V tejto práci bol realizovaný jednoduchý ilustračný výpočet, ktorý vychádzal z výpočtov v tejto kapitole. Rozdiel bol v rozložení výkonu v OS, kde boli zadané rozličné výkony PS. Na Obr. 3.11 sú očíslované PS a v Tab. 3.6 sú k nim priradené ZTV. Výkon troch súborov bol zvolený na 700 W a najvyšší výkon bol o približne 15 % vyšší, najnižší o približne 15 % nižší. Celkový výkon OS bol 21 kW. V tabuľke je vidieť, že boli zostavené dve rozloženia a v oboch bol najnižší výkon v stredovom PS. Menila sa pozícia najvyššieho výkonu, kedy bol v „rozložení 1“ zadaný v pozícii 5 na okraji OS a v „rozložení 2“ v pozícii 2 v PS, ktorý je najbližšie k stredovému.

Výpočty teplotných polí neboli realizované pre 9 hraničných teplôt stien, ale pre názornosť boli vybrané len 3, aby bolo možné sledovať vývoj maximálnych teplôt jednotlivých palivových súborov. V Tab. 3.7 sa nachádzajú vypočítané maximálne teploty v PS pre oba rozloženia výkonu a hraničné teploty. Na Obr. 3.12 sú ďalej vykreslené dva teplotné profily (v rovnakom reze ako pri predošlých výpočtoch) pri hraničnej teplote 423,15 K. Z výsledkov je vidieť, že maximálna teplota sa nachádza v PS v strede OS pri oboch uvažovaných rozloženiach. Ďalej je možné pozorovať,

že maximálna teplota pri rovnakej hraničnej teplote sa mení, aj keď je celkový výkon OS rovnaký. Z porovnania teplotných profilov ďalej vyplýva, že vyšší výkon v danom PS spôsobuje vyššie maximum teploty v ňom.

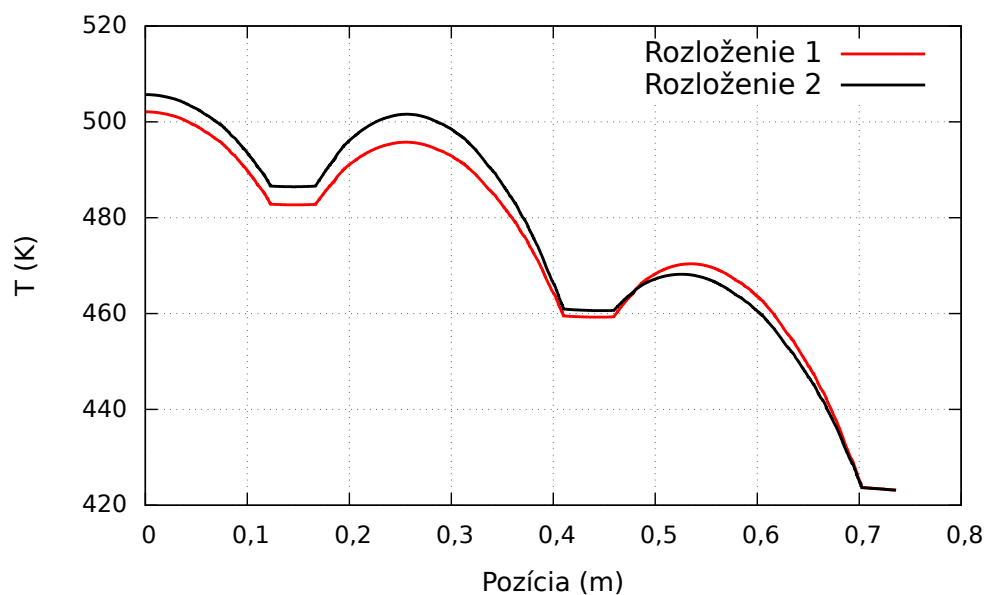
Z výsledkov výpočtov s heterogénnou vsádzkou je vidieť, že rozloženie výkonu v jednotlivých PS má vplyv na maximálnu teplotu v celom OS. Keďže sa táto teplota používa pri stanovení ESTV pre celý NK s palivovými súbormi, musel by byť tento súčiniteľ stanovený len pre danú vsádzku.



Obr. 3.11: Radiálny rez košom OS s použitou 1/6 symetriou a s označenými pozíciami palivových súborov

Tab. 3.6: Rozloženie výkonov v jednotlivých PS pri heterogénnej vsádzke

Pozícia PS	Rozloženie 1		Rozloženie 2	
	\dot{Q} (W)	q_V (W·m ³)	\dot{Q} (W)	q_V (W·m ³)
1	600	3214,66	600	3214,66
2	700	3750,43	800	4286,21
3	700	3750,43	700	3750,43
4	700	3750,43	700	3750,43
5	800	4286,21	700	3750,43



Obr. 3.12: Teplotný profil nosného koša s PS pri dvoch rozloženiach výkonu v PS a hraničnej teplote 423,15 K

Tab. 3.7: Vypočítané maximálne teploty v Kelvinoch v jednotlivých PS

Pozícia PS	Rozloženie 1		
	T_w (K)		
	323,15	423,15	523,15
1	408,81	502,10	596,56
2	402,92	495,76	590,09
3	382,42	475,98	571,29
4	382,42	475,98	571,29
5	377,88	470,38	564,96
Pozícia PS	Rozloženie 2		
	T_w (K)		
	323,15	423,15	523,15
1	412,44	505,69	600,09
2	409,56	501,59	595,28
3	383,79	477,46	572,87
4	383,79	477,46	572,87
5	374,61	468,20	563,66

Kapitola 4

ESTV nosného koša

Nahradenie PS homogénnym materiálom s ESTV výrazne uľahčuje tvorbu geometrie a samozrejme aj následný výpočet teplotných polí. Z tohto dôvodu budú v tejto kapitole realizované výpočty, v ktorých bude stanovený ESTV pre celý hypotetický nosný kôš OS s palivovými súbormi. Postup bude zhodný s tým, ktorý sa použil pri výpočtoch s PS v Kap. 2.4.

4.1 Geometria a výpočtová sieť

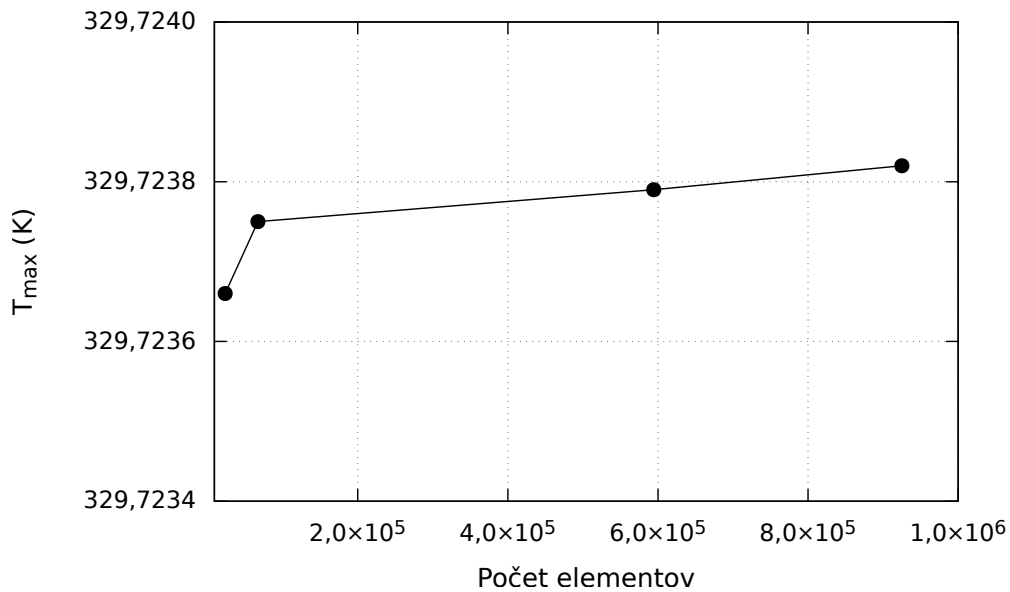
Celá výpočtová oblasť na Obr. 3.3 bola nahradená len jedným homogénnym materiálom, čiže neboli modelované žiadne PS. Keďže bola vytvorená aj nová výpočtová sieť, musela byť znovu realizovaná aj jej citlivostná analýza. K tomu boli vytvorené 4 siete s rôznym počtom elementov. Počet elementov spolu s parametrami kvality sietí sa nachádzajú v Tab. 4.1. Pri tvorbe každej siete boli dodržané odporúčané hodnoty týchto parametrov, ktoré sa nachádzajú v Tab. A.1.

Boli použité rovnaké hraničné podmienky a nastavenia ako v prípade samotného výpočtu ESTV nosného koša. Z tohto dôvodu budú popísané v nasledujúcej kapitole. Hraničná teplota bola konštantná a mala veľkosť 323,15 K. Výkon NK bol použitý 7600 W a zadal sa ako merný objemový výkon (Tab. 4.2). Pre citlivostnú analýzu bol použitý súčiniteľ tepelnej vodivosti nezávislý na teplote, ktorého hodnota bola zvolená $25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Pri výpočtoch sa sledovala hodnota maximálnej teploty, ktorá sa nachádzala v strede NK.

V Tab. 4.1 sa nachádzajú vypočítané maximálne teploty v NK. Tieto hodnoty sú vykreslené na Obr. 4.1. Pre ďalšie výpočty bola zvolená sieť 3, ktorá spĺňala odporúčané hodnoty parametrov kvality (Tab. A.1) a bolo ukázané, že ďalšie zvyšovanie hustoty siete by malo malý vplyv na hodnotu sledovanej veličiny.

Tab. 4.1: Siete vytvorené pre citlivosnú analýzu k výpočtu s homogénnym NK

Sieť 1			
P. elementov:		23352	P. nódov: 11901
T_{\max} : 329,72366 K			
Parameter	min.	max.	priem.
PST	1,000	2,189	1,188
SK	0,000	0,492	0,051
KO	0,704	1,000	0,969
Sieť 2			
P. elementov:		67059	P. nódov: 33904
T_{\max} : 329,72375 K			
Parameter	min.	max.	priem.
PST	1,000	2,080	1,192
SK	0,000	0,460	0,053
KO	0,737	1,000	0,967
Sieť 3			
P. elementov:		594441	P. nódov: 298343
T_{\max} : 329,72379 K			
Parameter	min.	max.	priem.
PST	1,000	2,201	1,190
SK	0,000	0,491	0,052
KO	0,698	1,000	0,968
Sieť 4			
P. elementov:		924965	P. nódov: 463885
T_{\max} : 329,72382 K			
Parameter	min.	max.	priem.
PST	1,000	2,552	1,203
SK	0,000	0,618	0,057
KO	0,646	1,000	0,964



Obr. 4.1: Citlivostná analýza výpočtovej siete pre homogénny NK

4.2 Hraničné podmienky a nastavenia

Hraničné podmienky a nastavenia sú podobné s tými, ktoré boli použité pri stanovení ESTV palivových súborov. V prostredí ANSYS Fluent bolo zapnuté riešenie rovnice zákona zachovania energie, a keďže celá výpočtová oblasť pozostávala z pevného materiálu, nebolo počítané prúdenie tekutín. Boli nastavené vstupné parametre, ktorými boli súčiniteľ tepelnej vodivosti, hraničná teplota a celkový výkon homogénneho NK. Ďalej bol nastavený výstupný parameter - maximálna teplota NK. Koniec výpočtu bol daný konvergenciou tejto veličiny ($1 \cdot 10^{-5}$). Bol sledovaný aj pokles rezidua rovnice zákona zachovania energie pod dostatočne nízku hodnotu (menej ako $1 \cdot 10^{-10}$).

V ANSYS Workbench sa k parametrom pripojil subprogram Direct optimization. Pre každú kombináciu ZTV a hraničnej teploty bol vytvorený výpočet optimalizácie. Boli nastavené hodnoty merného objemového výkonu, ktorý sa vypočítal vzťahom (2.5), kde

$$S = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0,736^2. \quad (4.1)$$

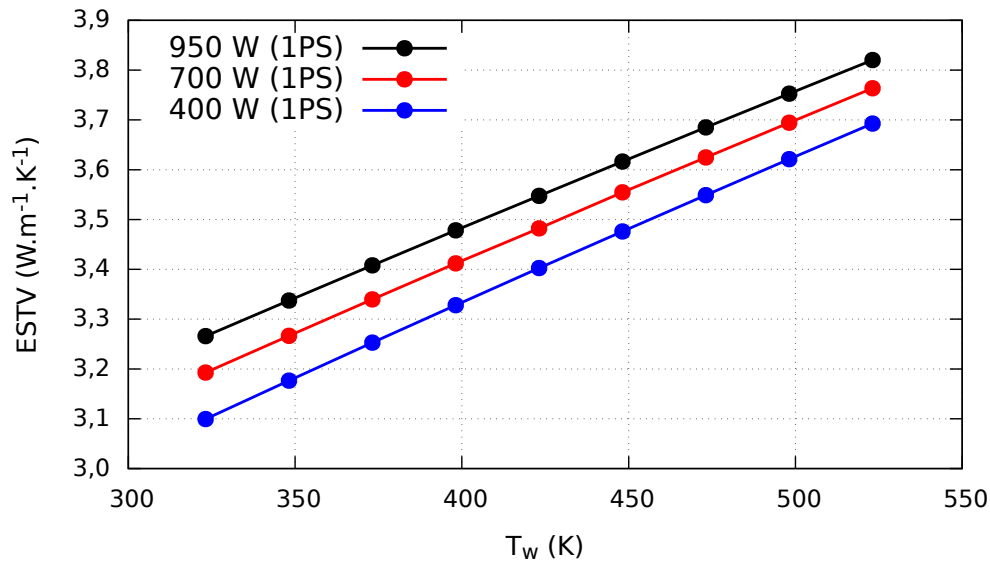
Výstupný parameter bol pevne definovaný a pre každú kombináciu ZTV- T_w boli zadané vypočítané hodnoty z Kap. 3.5. Súčiniteľ tepelnej vodivosti homogénneho materiálu bol nastavený ako hľadaný parameter a pri každom výpočte bol vhodne odhadnutý interval, v ktorom sa môže pohybovať. Index doby chodu bol znovu nastavený na strednú hodnotu 5. Výpočet ESTV homogénneho NK bol zastavený, keď bola vypočítaná maximálna teplota s daným ESTV s presnosťou $1 \cdot 10^{-3}$.

Tab. 4.2: Prepočítaný výkon OS na merný objemový výkon

\dot{Q} 1 PS (W)	\dot{Q} OS (W)	q_v (W·m ⁻³)
400	7600	1213,56
700	13300	2123,73
950	18050	2882,20

4.3 Stanovenie ESTV

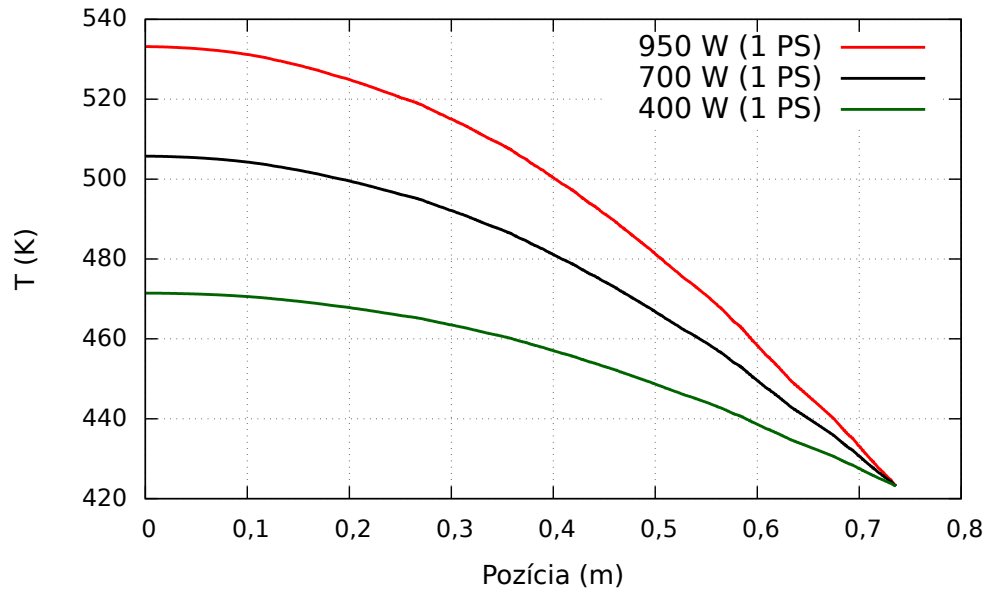
Pre každú kombináciu hraničnej teploty a ZTV boli vypočítané ESTV a výsledné hodnoty sa nachádzajú v Tab. 4.3. Pre lepšie porovnanie sú vypočítané ESTV vyobrazené na Obr. 4.2, kde sa nachádzajú výsledky pre všetky 3 uvažované výkony. Je vidieť, že so zvyšujúcim sa výkonom rastie aj hodnota ESTV, čiže odvod tepla je lepší. To je možné pozorovať aj pri zvyšujúcej sa hraničnej teplote. Táto priama úmernosť je spôsobená vyššími teplotami pri vyšších výkonoch a hraničných teplotách, kedy sa ESTV palivových súborov zvyšuje s teplotou (súčiniteľ tepelnej vodivosti NK bol zadaný nezávislý na teplote - Kap. 3.3). V uvažovanom intervale výkonov a hraničných teplôt sa hodnoty ESTV pohybujú v rozmedzí 3 - 4 W·m⁻¹·K⁻¹.



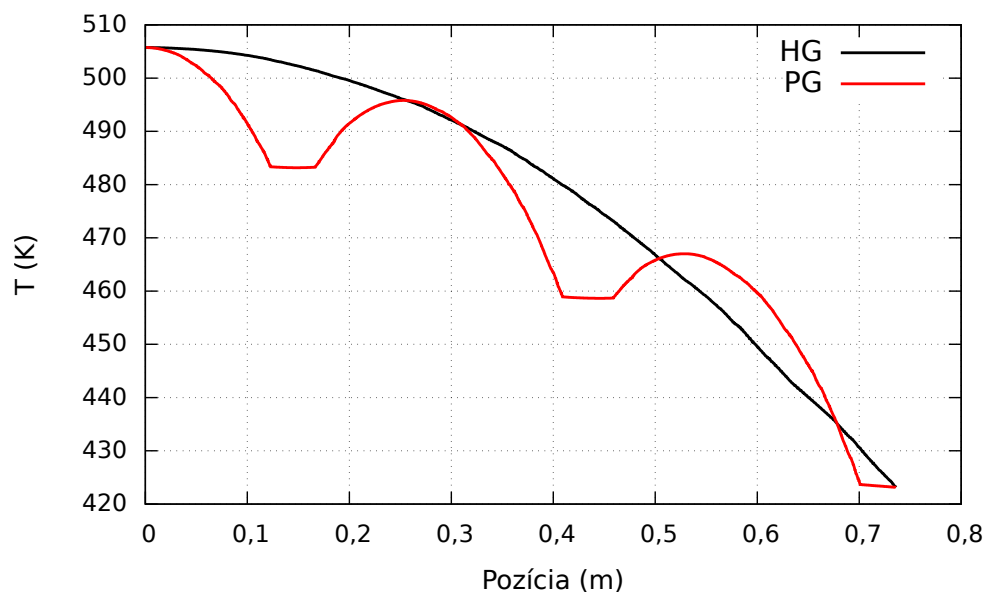
Obr. 4.2: Vypočítané ESTV pre nosný kôš s PS v závislosti na výkone a hraničnej teplote

Hlavný jav, ktorý je možné pozorovať, je rozdiel medzi jednotlivými ESTV pri rôznych tepelných výkonoch OS. Jednotlivé hodnoty sa od seba líšia v desiatinách W·m⁻¹·K⁻¹. To spôsobuje, že nie je možné zostaviť jednu závislosť ESTV na hraničnej, alebo priemernej teplote v hypotetickom koši OS tak, ako to bolo v prípade nahradenia palivového súboru homogénnym materiálom. Pri výpočtoch v NK je pozorovaná väčšia závislosť na ZTV, ako tomu bolo v prípade PS. Takto stanovený ESTV by už nepopisoval šírenie tepla s dostatočnou presnosťou a pri rôznych výkonoch by dochádzalo aj k podhodnocovaniu vypočítanej maximálnej teploty.

Vypočítané teplotné polia sú na Obr. 4.5 pre všetky tri výkony a hraničnú teplotu 423,15 K. Pre rovnaké ZTV a T_w sú vyobrazené na Obr. 4.3 teplotné profily homogénneho NK cez stred výpočtovej oblasti, rovnako ako v prípade výpočtu s nehomogénnym. Pre porovnanie s nehomogénnym výpočtom sú na Obr. 4.4 zobrazené teplotné profily pri výkone jedného PS 700 W a rovnakej hraničnej teplote. Pri homogénnom výpočte sú maximálne teploty dosahované v strede NK, rovnako ako tomu je pri homogénnej vsádzke. Profil je ale parabolický, keďže výkon je rozložený homogénne vo valcovej geometrii a súčiniteľ tepelnej vodivosti tohto homogénneho materiálu je konštantný. Pri PS, ktoré nie sú centrálné, dosahujú tieto lokálne teplotné maximá vyšších hodnôt ako pri homogénnom teplotnom profile. Nahradenie NK bolo vytvorené za účelom zistenia PCT v palivovom súbore, v ktorom sa dosahujú najvyššie teploty. Preto takýto výpočet je možné použiť len na zistenie maximálnej teploty centrálného PS.



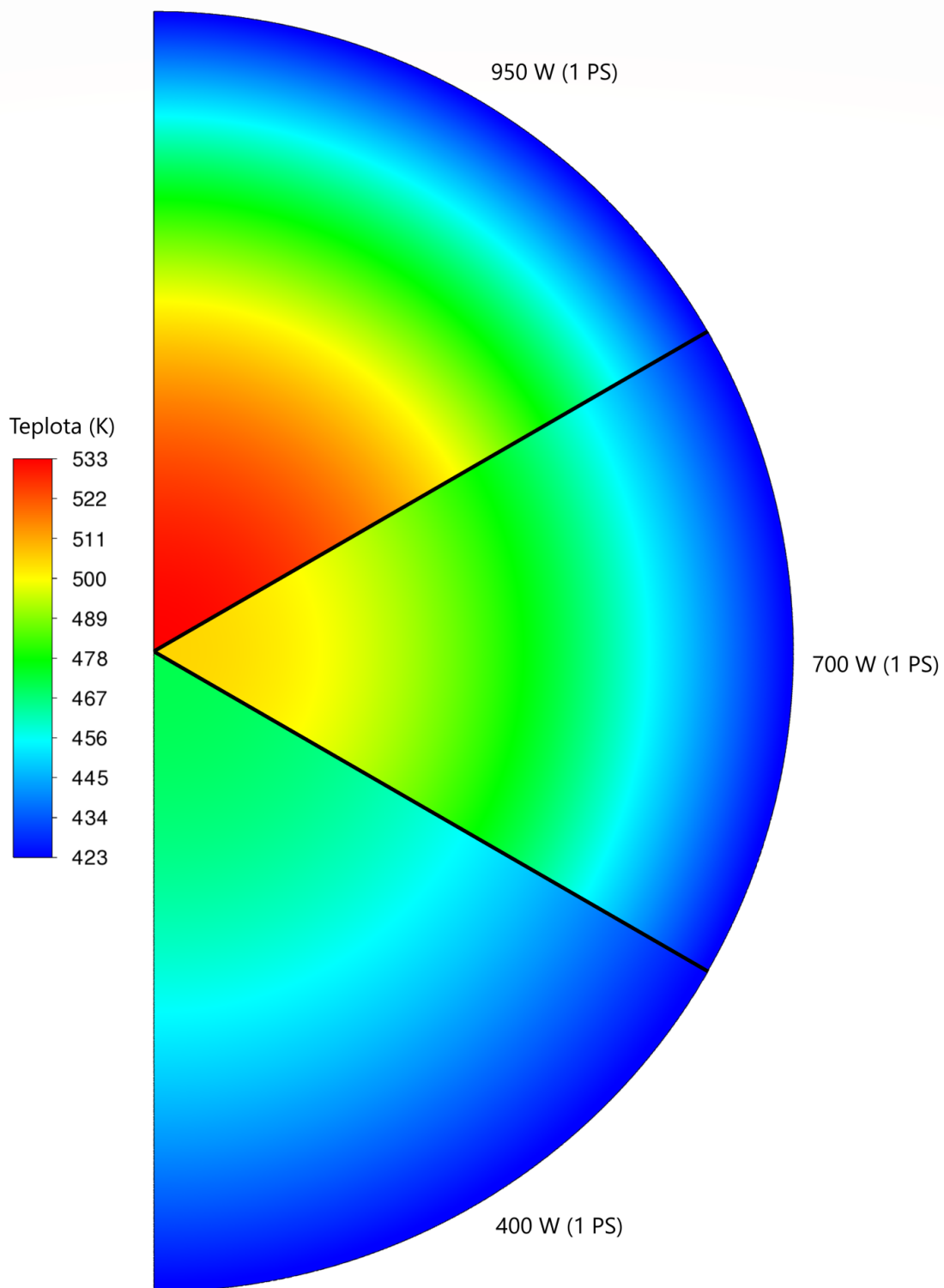
Obr. 4.3: Teplotný profil homogénneho nosného koša s PS pri troch výkonoch OS (prepočítaných na 1 PS) a hraničnej teplote 423,15 K



Obr. 4.4: Porovnanie teplotných profilov nosného koša s PS pred a po nahradení homogénnym materiálom pri výkone 700 W (1 PS) a hraničnej teplote 423,15 K

Tab. 4.3: Vypočítané efektívne súčinitele tepelnej vodivosti pre nosný kôš v závislosti na hraničnej teplote a ZTV

\dot{Q} OS	\dot{Q} 1 PS	\dot{Q} OS	\dot{Q} 1 PS	\dot{Q} OS	\dot{Q} 1 PS
18050 W	950 W	13300 W	700 W	7600 W	400 W
T_w	ESTV	T_w	ESTV	T_w	ESTV
(K)	($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	(K)	($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	(K)	($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
323,15	3,2658	323,15	3,1927	323,15	3,0995
348,15	3,3373	348,15	3,2665	348,15	3,1765
373,15	3,4081	373,15	3,3396	373,15	3,2527
398,15	3,4782	398,15	3,4120	398,15	3,3280
423,15	3,5476	423,15	3,4824	423,15	3,4025
448,15	3,6165	448,15	3,5545	448,15	3,4761
473,15	3,6849	473,15	3,6248	473,15	3,5490
498,15	3,7528	498,15	3,6945	498,15	3,6212
523,15	3,8203	523,15	3,7637	523,15	3,6927



Obr. 4.5: Vypočítané teplotné pole homogénneho nosného koša s PS pri troch výkonoch PS a hraničnej teplote 423,15 K

Z vyššie popísaného vyplývajú limity použitia ESTV pre výpočty teplotných polí v celom OS. Nahradenie PS homogénnym pevným materiálom s ESTV a rovnomerne generovaným výkonom je v prostredí s héliom možné a splňuje aj dostatočne presný popis poklesu teploty v PS. Pri výpočtoch s hypotetickým nosným košom bolo ale ukázané, že zvyškový tepelný výkon má už väčší vplyv na ESTV koša. Tento výsledok je už pri použití hypotetického NK, ktorého súčiniteľ tepelnej vodivosti nebol závislý na teplote. Z toho je možné predpokladať, že pri uvažovaní tejto závislosti by vplyv výkonu na ESTV mohol byť ešte väčší a nahradenie NK homogénnym materiálom ešte menej presné. Jednou možnosťou ako takto nahradiť NK by mohlo byť zostavenie ESTV len pre jeden ZTV, poprípade malý interval okolo tohto výkonu. Takéto stanovenie by ale mohlo byť náročnejšie ako samotný výpočet s presnou geometriou NK. V skutočnom OS ale môže mať vplyv na šírenie tepla aj konvekcia, s ktorou nie je možné v takomto dvojrozmernom probléme počítať. Okrem konvekcie prispieva k odvodu tepla v NK aj tepelná radiácia, ktorá je v tomto výpočte zahrnutá len v PS. Z tohto dôvodu sa vo výpočtoch bežne nahradzujú len PS.

Napríklad v štúdií [16] bol vytvorený trojrozmerný model vertikálneho skladovacieho obalového súboru. Palivové súbory západnej koncepcie typu 17x17 boli modelované pomocou modelu efektívneho súčiniteľa tepelnej vodivosti, ktorý bol stanovený v [17]. K jeho stanoveniu bola použitá metodika podľa modelu Bahneyho a Lotza [3], ktorý bol hlavným zdrojom pri tvorbe súčiniteľov pre palivové súbory v tejto práci. Ďalšie príklady použitia je možné nájsť napr. v [6] alebo v [23].

Záver

V tejto diplomovej práci bol riešený problém výpočtov teplotných polí v obalových súboroch pri skladovaní vyhoreného jadrového paliva. Hlavnou myšlienkou bolo zjednodušiť náročné výpočty tak, aby sa za podmienky konzervatívnosti a dostatočnej presnosti správnosť výsledkov čo najmenej zmenila. Bol použitý model efektívneho súčiniteľa tepelnej vodivosti, v ktorom je geometria nahradená homogénnym pevným materiálom a šírenie tepla je popísané len efektívnym súčiniteľom tepelnej vodivosti. K výpočtom bol použitý výpočtový kód ANSYS Fluent.

Tento model bol vyvíjaný už od autorovej výskumnej úlohy, kde boli stanovené tieto súčinitele pre palivové súbory typu VVER 440 a VVER 1000 pri použití rôznych výplňových plynov obalového súboru. Jedným z nich bolo vákuum, v ktorom je zdieľanie tepla len pomocou tepelnej radiácie a v tomto prostredí boli najvyššie nepresnosti pri nahradení palivových súborov homogénnym materiálom. Z toho dôvodu bolo na jednoduchých geometriách overené nastavenie Discrete ordinates modelu tepelnej radiácie. Keďže výstupy z výpočtového kódu ANSYS Fluent je možné porovnať s analytickým výpočtom len pri obmedzených podmienkach a geometriách, bolo realizované porovnanie s iným modelom, a to Surface to Surface. Tento model nie je možné aplikovať na geometriu počítanú v rámci tejto diplomovej práce, ale pri jednoduchých geometriách je pre overenie nastavenia dostačujúci. Z výsledkov porovnaní s analytickým a numerickým výpočtom bolo zistené, že nastavenie Discrete ordinates modelu bolo vhodne zvolené.

Keďže bolo ukázané, že nastavenie modelu tepelnej radiácie je vhodne zvolené, boli spresnené efektívne súčinitele tepelnej vodivosti palivových súborov v prostredí s héliom pomocou odlišného vzťahu pre súčiniteľ tepelnej vodivosti hélia a neuvažovaním najvyššieho a najnižšieho zvyškového tepelného výkonu. Síce bolo v rámci výskumnej úlohy ukázané, že výkon má malý vplyv na efektívny súčiniteľ tepelnej vodivosti, ale boli pozorované malé odchýlky, ktoré mohli viesť k vyšším nepresnostiam. Nový súčiniteľ tepelnej vodivosti hélia sa líšil od toho pôvodného len málo (menej ako 5 %), ale v rámci práce bolo ukázané, že i taká malá zmena má vplyv na výpočet. Z toho dôvodu aj takéto malé spresnenie zvýši presnosť výpočtu. Pre oba typy palivových súborov bol súčiniteľ stanovený v závislosti na hraničnej teplote, ktorá bola na hranici výpočtovej oblasti konštantná. Pre výpočty teplotných polí v obalových súboroch je fyzikálne správnejšie použiť závislosť na priemernej teplote v palivovom súbore, a preto bol súčiniteľ stanovený aj v závislosti na priemernej teplote v homogénnom palivovom súbore.

Vytvorený homogénny model palivového súboru TVSA-T bol použitý pre ďalšie výpočty teplotných polí v nosnom koši hypotetického obalového súboru. Nosný kôš bol vytvorený z homogénneho materiálu a jeho súčiniteľ tepelnej vodivosti bol získaný prepočtom na základe približnej geometrie a materiálov v nosnom koši obalového súboru CASTOR 1000/19. Pri modelovaní palivových súborov bolo potrebné rozšíriť funkcie výpočtového kódu Fluent. Bola vytvorená užívateľom definovaná funkcia, ktorá z vypočítanej priemernej teploty palivového súboru počítala jeho efektívny súčiniteľ tepelnej vodivosti podľa stanoveného vzťahu. Pri výpočtoch teplotných polí bola použitá homogénna vsádzka. Z výsledkov bolo vidieť, že najvyššia teplota sa nachádza v strede súboru uprostred nosného koša. Zvyšné palivové súbory mali posunutú maximum smerom do stredu koša. Bol realizovaný aj výpočet s heterogénnou vsádzkou, kedy boli použité dve rozloženia výkonu v obalovom súbore a palivový súbor s najvyšším výkonom sa nenachádzal v strednej pozícii. Pri oboch rozloženiach bol použitý rovnaký celkový výkon 21 kW. Z výpočtov vyplynulo, že rozloženie výkonu má vplyv na hodnotu maximálnej teploty v obalovom súbore a najvyššia teplota bola znovu dosiahnutá v strednej pozícii.

Z výpočtov teplotných polí boli pre homogénnu vsádzku stanovené efektívne súčinitele tepelnej vodivosti pre nosný kôš spolu s palivovými súbormi. K stanoveniu boli použité všetky tri celkové výkony obalového súboru a menili sa hraničné teploty. Pri nahradení palivových súborov homogénnym materiálom bolo ukázané, že vplyv výkonu na efektívny súčiniteľ palivového súboru je malý a je možné ho zanedbať. Pri nahradení celého nosného koša spolu so súbormi bolo vidieť, že nie je možné zanedbať výkon pri stanovení efektívneho súčiniteľa tejto výpočtovej oblasti. Z tohto vyplývajú limity použitia modelu efektívneho súčiniteľa tepelnej vodivosti. Pre takúto oblasť by bolo potrebné ho stanoviť pre každý výkon, resp. jeho malé okolie, zvlášť, čo by nemuselo viesť k samotnému urýchleniu výpočtov. Pri uvažovaní heterogénnej vsádzky by bolo potrebné stanoviť súčiniteľ pre každú vsádzku a celkový výkon zvlášť. Preto je vhodné použiť model efektívneho súčiniteľa tepelnej vodivosti len pre nahradenie palivových súborov. Tento model je potom možné využiť aj pri modelovaní obalového súboru v troch rozmeroch, kde by bolo možné počítať s rozdielnym súčiniteľom po axiálnych nódoch a bolo by možné zahrnúť aj prirodzenú konvekciu v nosnom koši a na povrchu obalového súboru.

Literatúra

- [1] ANSYS, Inc. *ANSYS Fluent Customization Manual, 2021R1*, 2021. Dokumentácia a manuály k systému.
- [2] ANSYS, Inc. *ANSYS Fluent Theory Guide, 2021R1*, 2021. Dokumentácia a manuály k systému.
- [3] R. Bahney and T. Lotz. *Spent nuclear fuel effective thermal conductivity report*. US DOE, Yucca Mountain Site Characterization Project Office by TRW Environmental Safety Systems, Inc. 1996. BBA000000-01717-5705-00010 REV 00.
- [4] N. V. Cederberg, B. N. Popov, and N. A. Morozova. *Teplofyzické vlastnosti helia*. GOSENERGOIZDAT, Moskva, 1961.
- [5] P. Čekan. *Návrh koše kontajneru typu Castor pro palivo reaktoru typu VVER 1000*. Diplomová práce, FST-ZČU v Plzni, 2013.
- [6] K. Das, D. Basu, J. Solis, and G. Zigh. *Computational fluid dynamics modeling approach to evaluate vsc-17 dry storage cask thermal designs*. Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses, Southwest Research Institute, San Antonio, 2012.
- [7] T. Funke and C. Henig. *CASTOR 1000/19: Development and Design of a New Transport and Storage Cask*. [online]. [cit. 2022-03-05]. International Youth Nuclear Congress 2008. Switzerland, 2008. Dostupné z: http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:40048126.
- [8] K. Hall and G. Zigh. *CFD Validation of Vertical Dry Cask Storage System*. Alden Research Laboratory Inc., 2019. NUREG/CR-7260.
- [9] B. Hands and V. Arp. *A correlation of thermal conductivity data for helium*. Cryogenics, 1981. ISSN 0011-2275. doi: 10.1016/0011-2275(81)90211-3.
- [10] R. Hejzlar. *Sdílení tepla*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 3 edition, 1999. ISBN 80-010-1982-9.
- [11] J. Howell, M. Menguc, and R. Siegel. *Thermal Radiation Heat Transfer, 5th Edition*. CRC Press, 2010. ISBN 9781439894552.
- [12] International atomic energy agency. *Thermophysical Properties Database of Materials for Light Water Reactors and Heavy Water Reactors*. Number 1496 in TECDOC Series. Vienna, 2006. ISBN 92-0-104706-1.

- [13] D. Kobyłka. *Vlastnosti materiálů*. Dostupné z konzultací.
- [14] D. Kobyłka. *Optimalizace vzájemné vzdálenosti UOS*. SÚRAO, Praha, 2019. TZ 135/2017.
- [15] E. W. Lemmon, I. H. Bell, M. L. Huber, and M. O. McLinden. *NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP*, Version 10.0 [online]. National Institute of Standards and Technology, 2018. Dostupné z: <https://www.nist.gov/srd/refprop>.
- [16] J. Li and Y. Liu. *Thermal modeling of a vertical dry storage cask for used nuclear fuel*. Nuclear Engineering and Design. 2016. doi: 10.1016/j.nucengdes.2016.01.008.
- [17] K. Mittal, Z. Han, J. Li, H. Tsai, and Y. Liu. *Temperatures of Interest for the TN-32 Cask during Storage of High Burnup Fuel*. INMM 55th Annual Meeting, Atlanta, Georgia, USA, 2014.
- [18] NIST. *About REFPROP* [online]. [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://refprop-docs.readthedocs.io/en/latest/GUI/General%20Information/aboutrefprop.html>.
- [19] D. Ortiz-Vega, K. Hall, J. Holste, V. Arp, A. Harvey, and E. Lemmon. *Helmholtz equation of state for helium: final equation of state*. J. Phys. Chem. Ref. Data, 2018.
- [20] Š. Račák. *Výpočty teplotního pole ve vyhořelém palivovém souboru za podmínek skladování a ukládání paliva*. Bakalářská práce, KJR-FJFI-ČVUT v Praze, 2020.
- [21] Š. Račák. *Stanovení efektivního součinitele tepelné vodivosti pro vyhořelé palivové soubory typu VVER*. Výzkumná úloha, KJR-FJFI-ČVUT v Praze, 2021.
- [22] K. Ražnjevič. *Termodynamické tabulky*. Edícia energetickej literatúry. Alfa, Bratislava, 1984.
- [23] P. K. Shukla. *Thermal modeling of a storage cask system: capability development*. TX: Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses, San Antonio, 2007.
- [24] Státní úřad pro jadernou bezpečnost. *Typové schválení OS ŠKODA 1000/19 typu B(U)F: Rozhodnutí SÚJB*. Praha, 2017. SÚJB/ONRV/04619/2017.
- [25] M. Ševeček. *Simulace chování vyhořelého jaderného paliva v průběhu dlouhodobého suchého skladování v obalových souborech typu CASTOR*. Diplomová práce, KJR-FJFI-ČVUT v Praze, 2014.
- [26] J. R. Tallackson. *Thermal transport properties of helium, helium-air mixtures, water, and tubing steel used in the CACHE program to compute HTGR auxiliary heat exchanger performance*. Oak Ridge National Laboratory, USA, 1976. doi: 10.2172/4028643.

- [27] K. Tuček, A. Kecek, P. Van Uffelen, and S. Holmström. *Development of M5 cladding material correlations in the TRANSURANUS code : revision 1*. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2016. ISBN 978-92-79-64655-3.
- [28] D. Vlček. *Odvod zbytkového tepelného výkonu vyhořelého jaderného paliva při suchém i mokřém skladování*. Diplomová práce, KJR-FJFI-ČVUT v Praze, 2018.
- [29] T. Walker, S. Xue, and G. Barton. *Numerical Determination of Radiative View Factors Using Ray Tracing*. Journal of Heat Transfer-transactions of The Asme, 2010. doi: 10.1115/1.4000974.

Prílohy

Dodatok A

Výpočty v PS

Tab. A.1: Parametre kvality siete a ich možné a odporúčané hodnoty [2], [21]

Parameter	Možné hodnoty	Odporúčané hodnoty
Šikmosť (SK)	$\langle 0;1 \rangle$	$\langle 0;0,95 \rangle$
Kvalita ortogonalita (KO)	$\langle 0;1 \rangle$	$\langle 0,15;1 \rangle$
Pomer strán (PST)	$\langle 1;\infty \rangle$	čo najbližšie k 1

Šikmosť predstavuje rozdiel medzi tvarom sledovanej bunky a tvarom bunky, ktorá má rovnaký objem, ale je rovnostranná. Čím je tento parameter menší, tým je kvalita siete lepšia. Kvalita ortogonalita pozostáva z náročnejšieho výpočtu, v ktorom sú zahrnuté normálové vektory strán, vektory z centra elementu do centier susedných elementov a vektory z centra elementu na strany susedných elementov. Lepšie siete majú hodnoty tohto parametru bližšie k 1. Pomer strán predstavuje pomer najdlhšieho rozmeru v elemente k najkratšiemu. Pri modelovaní prúdenia v medznej vrstve môže dosahovať aj vyšších hodnôt ale všeobecne by sa mal blížiť k 1.

A.1 Materiály

Tab. A.2: Koefficienty súčiniteľa tepelnej vodivosti, hustoty a izobarickej mernej tepelnej kapacity pre UO_2 pri vyhorení 45 MWd/kgU v závislosti na teplote [12], [13]

Vlastnosť	λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	c_p ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
a_0	$5,40 \pm 8\cdot 10^{-4}$	10453,87	$-1,00 \pm 3$
a_1	$-6,13\cdot 10^{-3} \pm 7\cdot 10^{-6}$	-	$1,42 \pm 3\cdot 10^{-2}$
a_2	$5,56\cdot 10^{-6} \pm 2\cdot 10^{-8}$	-	$-2,82\cdot 10^{-3} \pm 8\cdot 10^{-5}$
a_3	$-3,35\cdot 10^{-9} \pm 3\cdot 10^{-11}$	-	$2,80\cdot 10^{-6} \pm 1\cdot 10^{-7}$
a_4	$9,66\cdot 10^{-13} \pm 1\cdot 10^{-14}$	-	$-1,08\cdot 10^{-9} \pm 5\cdot 10^{-11}$

Tab. A.3: Koeficienty súčiniteľa tepelnej vodivosti, hustoty a izobarickej mernej tepelnej kapacity zliatinu E110 pri vyhorení 45 MWd/kgU a pre nevyhorené zliatiny E110 a E125 v závislosti na teplote [12], [13], [27]

Materiál Vlastnosť	E110 TVSA-T (45 MWd/kgU)		
	λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	ρ (kg·m ⁻³)	c_p (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
a_0	$8,60 \pm 2 \cdot 10^{-1}$	6550	$255,66 \pm 1 \cdot 10^{-14}$
a_1	$1,68 \cdot 10^{-2} \pm 5 \cdot 10^{-4}$	-	$0,1024 \pm 2 \cdot 10^{-17}$
Materiál Vlastnosť	E110 Gd-2M+ (45 MWd/kgU)		
	λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	ρ (kg·m ⁻³)	c_p (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
a_0	$7,36 \pm 3 \cdot 10^{-1}$	6550	$255,66 \pm 1 \cdot 10^{-14}$
a_1	$1,82 \cdot 10^{-2} \pm 6 \cdot 10^{-4}$	-	$0,1024 \pm 2 \cdot 10^{-17}$
Materiál Vlastnosť	E110 (nevyhorená)		
	λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	ρ (kg·m ⁻³)	c_p (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
a_0	$23,48 \pm 4 \cdot 10^{-20}$	6550	$255,66 \pm 1 \cdot 10^{-14}$
a_1	$-1,92 \cdot 10^{-2} \pm 4 \cdot 10^{-17}$	-	$0,1024 \pm 2 \cdot 10^{-17}$
a_2	$1,68 \cdot 10^{-5} \pm 4 \cdot 10^{-20}$	-	-
Materiál Vlastnosť	E125		
	λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	ρ (kg·m ⁻³)	c_p (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
a_0	$19,30 \pm 3 \cdot 10^{-3}$	6550	$255,66 \pm 1 \cdot 10^{-14}$
a_1	$-6,43 \cdot 10^{-3} \pm 3 \cdot 10^{-5}$	-	$0,1024 \pm 2 \cdot 10^{-17}$
a_2	$4,50 \cdot 10^{-6} \pm 1 \cdot 10^{-7}$	-	-
a_3	$-1,31 \cdot 10^{-8} \pm 2 \cdot 10^{-10}$	-	-
a_4	$1,63 \cdot 10^{-11} \pm 9 \cdot 10^{-14}$	-	-

Tab. A.4: Koeficienty súčiniteľa tepelnej vodivosti, hustoty a izobarickej mernej tepelnej kapacity pre hélium v závislosti na teplote [15]

Vlastnosť	λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	ρ (kg·m ⁻³)	c_p (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
a_0	$2,89 \cdot 10^{-2} \pm 2 \cdot 10^{-4}$	$3,66 \pm 3 \cdot 10^{-2}$	5192,47
a_1	$5,10 \cdot 10^{-4} \pm 1 \cdot 10^{-6}$	$-1,54 \cdot 10^{-2} \pm 3 \cdot 10^{-4}$	-
a_2	$-3,57 \cdot 10^{-7} \pm 4 \cdot 10^{-9}$	$3,16 \cdot 10^{-5} \pm 8 \cdot 10^{-7}$	-
a_3	$2,68 \cdot 10^{-10} \pm 5 \cdot 10^{-12}$	$-3,10 \cdot 10^{-8} \pm 1 \cdot 10^{-9}$	-
a_4	$-9,1 \cdot 10^{-14} \pm 3 \cdot 10^{-15}$	$1,22 \cdot 10^{-11} \pm 5 \cdot 10^{-13}$	-

A.2 Výsledky výpočtov v PS

Tab. A.5: Porovnanie vypočítaných PCT z pôvodných výpočtov a z opravených pre PS Gd-2M+ v závislosti na hraničnej teplote

\dot{Q} (W) T_w (K)	250		
	Pôvodná (K)	Opravená (K)	Rozdiel (K)
323,15	338,663	338,567	-0,096
373,15	386,628	386,594	-0,035
423,15	434,922	434,933	0,011
473,15	483,462	483,516	0,053
523,15	532,211	532,295	0,083
573,15	581,118	581,239	0,121
623,15	630,172	630,323	0,151
\dot{Q} (W) T_w (K)	150		
	Pôvodná (K)	Opravená (K)	Rozdiel (K)
323,15	332,562	332,482	-0,080
373,15	381,281	381,275	-0,005
423,15	430,234	430,263	0,030
473,15	479,341	479,402	0,061
523,15	528,574	528,661	0,088
573,15	577,904	578,022	0,117
623,15	627,316	627,467	0,152

Tab. A.6: Porovnanie vypočítaných PCT z pôvodných výpočtov a z opravených pre PS TVSA-T v závislosti na hraničnej teplote

\dot{Q} (W)	700			
	T_w (K)	Pôvodná (K)	Opravená (K)	Rozdiel (K)
323,15		356,562	356,239	-0,323
373,15		402,354	402,282	-0,073
423,15		448,965	448,990	0,025
473,15		496,064	496,173	0,109
523,15		543,548	543,737	0,189
573,15		591,356	591,620	0,264
623,15		639,427	639,768	0,341
\dot{Q} (W)	400			
	T_w (K)	Pôvodná (K)	Opravená (K)	Rozdiel (K)
323,15		342,664	342,444	-0,220
373,15		390,335	390,143	-0,192
423,15		438,044	438,104	0,060
473,15		486,310	486,437	0,127
523,15		534,810	534,999	0,189
573,15		583,489	583,750	0,261
623,15		632,320	632,657	0,337

Tab. A.7: Vypočítané hodnoty ESTV vo $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ pre Gd-2M+ s porovnaním s pôvodnými výpočtami a priemerná teplota v homogénnom PS (T_{mean})

\dot{Q} (W)	250			T_{mean} (K)	
	T_w (K)	Pôvodný	Opravený		Rozdiel (%)
323,15		0,5057	0,5092	0,70	330,71
373,15		0,5819	0,5840	0,36	379,74
423,15		0,6664	0,6663	-0,02	428,93
473,15		0,7608	0,7574	-0,45	478,23
523,15		0,8657	0,8585	-0,84	527,63
573,15		0,9842	0,9706	-1,38	577,11
623,15		1,1173	1,0945	-2,04	626,67
\dot{Q} (W)	150			T_{mean} (K)	
	T_w (K)	Pôvodný	Opravený		Rozdiel (%)
323,15		0,5001	0,5048	0,93	327,72
373,15		0,5789	0,5798	0,15	377,13
423,15		0,6647	0,6622	-0,37	426,64
473,15		0,7603	0,7535	-0,90	476,21
523,15		0,8683	0,8548	-1,56	525,85
573,15		0,9908	0,9669	-2,41	575,54
623,15		1,1286	1,0912	-3,32	625,27

Tab. A.8: Vypočítané hodnoty ESTV vo $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pre TVSA-T s porovnaním s pôvodnými výpočtami a priemerná teplota v homogénnom PS (T_{mean})

\dot{Q} (W)	700			T_{mean} (K)
	Pôvodný	Opravený	Rozdiel (%)	
T_w (K)				
323,15	0,4426	0,4476	1,13	339,67
373,15	0,5064	0,5084	0,39	387,69
423,15	0,5730	0,5732	0,04	436,05
473,15	0,6455	0,6433	-0,34	484,64
523,15	0,7249	0,7194	-0,75	533,43
573,15	0,8121	0,8019	-1,25	582,37
623,15	0,9084	0,8913	-1,88	631,44
\dot{Q} (W)	400			T_{mean} (K)
	Pôvodný	Opravený	Rozdiel (%)	
T_w (K)				
323,15	0,4331	0,4387	1,28	332,78
373,15	0,4919	0,4981	1,26	381,63
423,15	0,5675	0,5660	-0,27	430,61
473,15	0,6421	0,6370	-0,80	479,78
523,15	0,7247	0,7143	-1,44	529,06
573,15	0,8173	0,7985	-2,30	578,44
623,15	0,9215	0,8902	-3,39	627,90

Dodatok B

Užívateľom definovaná funkcia

B.1 UDF pre výpočet v obalovom súbore

```
#include "udf.h"

real tavg=300; /* prvý odhad priemernej teploty */

/* Zadefinovanie sucinitela tepelnej vodivosti */
DEFINE_PROPERTY(thermal_conductivity,c,t)
{
    real k_eff;
    k_eff= X(tavg);
    return k_eff;
    /* X je vzťah pre závislosť sucinitela tepelnej vodivosti
    na priemernej teplote */
}

/* Nacitanie priemernej teploty */
DEFINE_ADJUST(get_avg_temp,d)
{
    cell_t cell;
    real temper;
    real volume = 0;
    real total_volume = 0;

    Thread *thread;
    int zone_ID = Y; /* Y je číslo zóny podľa ANSYS Fluent */
    tavg = 0;
    temper = 0;
    thread = Lookup_Thread(d,zone_ID);
    begin_c_loop_int(cell,thread)
    {
        volume = C_VOLUME(cell,thread);
        /* Súčet objemov elementov v danej komponente*/
        total_volume += C_VOLUME(cell,thread);
        temper = C_T(cell,thread);
        tavg += temper*volume;
    }
    end_c_loop_int(cell,thread)
}
```

```

    /* Pri pouziti paralelnych vypoctov,
    pri seriovych nerobi nic */
    # if RP_NODE
    total_volume = PRF_GRSUM1(total_volume);
    tavg = PRF_GRSUM1(tavg);
    # endif
    tavg /= total_volume;
    /* Kontrolny vypis hodnot */
    Message0("*****_tavg_=%f_*****\n",tavg);
    Message0("*****_objem_=%f_*****\n",total_volume);
}

```