

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: Stavba jaderně energetických zařízení

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Teplotní výpočet odvodu tepla z palivové kazety do okolí

Autor: **Bc. Jaroslav Vorel**

Vedoucí práce: **Ing. Pavel Žitek**

Akademický rok 2013/2014

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Autorská práva**

Podle Zákona o právu autorském č. 35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledku diplomové práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoli nakládání s nimi, možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

## **Bibliografická citace**

VOREL, J. *Teplotní výpočet odvodu tepla z palivové kazety do okolí*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 2014. 81 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Žitek.

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu této diplomové práce Ing. Pavlu Žitkovi a také konzultantu Ing. Jaroslavu Štěchovi za poskytnuté materiály, vstřícný přístup, odborné rady a věcné konzultace.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Richardu Matasovi, PhD. za poskytnutou pomoc a cenné rady při řešení problémů, které se vyskytly během realizace numerického výpočtu.

Na závěr bych chtěl také poděkovat Prof. Ing. Radimu Marešovi, CsC. za poskytnuté materiály potřebné pro realizaci výpočtů.

Bez výše zmíněných by tato práce ve stávající podobě nemohla vzniknout.

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Vorel	<b>Jméno</b> Jaroslav	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2302T041 „Stavba jaderně energetických zařízení“		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Žitek	<b>Jméno</b> Pavel	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU-FST-KKE		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del>BAKALÁŘSKÁ</del>	<b>NEHODÍCÍ ŠKRTNĚTE</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Teplotní výpočet odvodu tepla z palivové kazety do okolí		

<b>FAKULTA</b>	Strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2014
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

<b>CELKEM</b>	<b>79</b>	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	<b>77</b>	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	<b>2</b>
---------------	-----------	---------------------	-----------	----------------------	----------

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Cílem diplomové práce je výpočet odvodu tepla z palivové kazety do okolního prostředí podle tří zadaných variant: prostupem, vedením, vedením a sáláním. Tento výpočet je realizován pomocí numerické simulace ve Fluentu. Dalším cílem je určení vlastností fiktivního pevného materiálu nahrazující vliv přirozené konvekce hélia ve vnitřních mezerách v CASTORu. Před provedením výpočtu byl vytvořen výpočetní model, vygenerována výpočetní objemová síť a nastaveny parametry výpočtu. Hlavní výsledky práce jsou hodnoty tepelného toku a teploty na vnějším povrchu CASTORu.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>CASTOR, prostup tepla, přestup tepla, vedení tepla, sálání tepla, numerický výpočet, CFD simulace, výpočetní model, výpočetní síť, tepelný tok, součinitel přestupu tepla, součinitel tepelné vodivosti, okrajové podmínky</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA THESIS

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Vorel	<b>Name</b> Jaroslav	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2302T041 „Nuclear Power Equipment Design“		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (inclusive of degree)</b> Ing. Žitek	<b>Name</b> Pavel	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU-FST-KKE		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<del><b>BACHELOR</b></del>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITTLE OF THE WORK</b>	Temperature calculation of the heat transfer from the fuel cassette into the environment		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Power System Engineering	<b>SUBMITTED IN</b>	2014
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

<b>TOTALLY</b>	<b>79</b>	<b>TEXT PART</b>	<b>77</b>	<b>GRAPHICAL PART</b>	<b>2</b>
----------------	-----------	------------------	-----------	-----------------------	----------

<b>BRIEF DESCRIPTION (MAX 10 ŘÁDEK) TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>The aim of the diploma thesis is the calculation of heat transfer from the fuel cassette into the environment according three specified variants: transmittance, conduction, conduction and radiation. This calculation is realized by numerical simulation in the Fluent. Another aim is to determine the properties of the fictive solid material replacing the influence of natural convection of the helium at the internal gaps of the CASTOR. Before performing a calculation computer model was created, computational volume grid was generated and parameters of calculation was set. The main results of the thesis are the values of heat flux and temperature at the outer surface of the CASTOR.</p>
<b>KEY WORDS</b>	<p>CASTOR, heat transmission, heat transfer, heat conduction, heat radiation, numerical calculation, CFD simulation, computational model, computational grid, heat flux, heat transfer coefficient, thermal conductivity, boundary conditions</p>

## Seznam použitých označení a jednotek

### Označení a jednotky veličin - latinské

a	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	součinitel teplotové vodivosti
C	[K]	integrační konstanta
$c_p$	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku
$C_0$	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$	součinitel sálání dokonale černého tělesa
$C_1$	[K]	integrační konstanta
$C_2$	[K]	integrační konstanta
d	[m]	průměr
Fo	[-]	Fourierovo kritérium podobnosti
g	$[m \cdot s^{-2}]$	gravitační zrychlení
Gr	[-]	Grashoffovo kritérium podobnosti
h	$[J \cdot kg^{-1}]$	měrná entalpie
k	[-]	sčítací index
K	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	součinitel prostupu tepla
$K_p$	$[m \cdot K \cdot W^{-1}]$	celkový součinitel odporu stěn při odvodu tepla přestupem do okolí
$K_s$	$[m \cdot K \cdot W^{-1}]$	celkový součinitel odporu stěn mimo vzduchové při vedení a sálání tepla z povrchu kontejneru
$K_v$	$[m \cdot K \cdot W^{-1}]$	celkový součinitel odporu stěn při uvažování pouze vedení tepla v celém rozsahu
l	[-]	sčítací index
L	[m]	výška palivových kazet a palivového koše
n	[-]	index, udává směr normály
Nu	[-]	Nusseltovo kritérium podobnosti
p	[Pa]	tlak
Po	[-]	Pomeranceovo kritérium podobnosti
Pr	[-]	Prandtlovo kritérium podobnosti
$q_k$	$[W \cdot m^{-2}]$	měrné teplo
$q_v$	$[W \cdot m^{-3}]$	měrný vnitřní zdroj tepla
$\dot{q}$	$[W \cdot m^{-2}]$	měrný tepelný tok
$\dot{q}_w$	$[W \cdot m^{-2}]$	měrný tepelný tok na povrchu tělesa

$Q_1$	[J]	množství odvedeného tepla při uvažování prostupu tepla
$Q_2$	[J]	množství odvedeného tepla při uvažování vedení s fiktivním pevným materiálem
$Q_3$	[J]	množství odvedeného tepla při uvažování vedení k povrchu kontejneru a sálání z povrchu do okolního vzduchu
$\dot{Q}$	[W]	tepelný tok
$r$	[m]	obecný poloměr
$r$	[-]	radiální souřadnice válce
$R_{CAin}$	[m]	poloměr vstupní plochy do stěny CASTORU
$R_{CAout}$	[m]	poloměr výstupní plochy ze stěny CASTORU
$Re$	[-]	Reynoldsovo kritérium podobnosti
$R_{PKin}$	[m]	poloměr vstupní plochy do stěny palivového koše
$R_{PKin}$	[m]	poloměr výstupní plochy ze stěny palivového koše
$R_{qv}$	[m]	poloměr na rozhraní tepelného zdroje a vnitřní héliové mezery neboli poloměr výhřevné plochy
$R_{vz}$	[m]	poloměr ohraničující velikost okolního vzduchu
$S$	[m <sup>2</sup> ]	plocha
$t$	[s]	čas
$T$	[K]	teplota
$T_{CAin}$	[K]	teplota na vstupní ploše do stěny CASTORU
$T_{CAout}$	[K]	teplota na výstupní ploše ze stěny CASTORU
$T_{def}$	[K]	definiční teplota okolní tekutiny
$T_f$	[K]	teplota okolní proudící tekutiny
$T_{HeMstř}$	[K]	střední teplota v malé héliové mezeře
$T_{HeVstř}$	[K]	střední teplota ve velké héliové mezeře
$T_{PKin}$	[K]	teplota na vstupní ploše do stěny palivového koše
$T_{PKout}$	[K]	teplota na výstupní ploše ze stěny palivového koše
$T_{qv}$	[K]	teplota na rozhraní tepelného zdroje a vnitřní héliové mezery neboli teplota výhřevné plochy
$T_{vz}$	[K]	teplota okolního vzduchu



$T_w$	[K]	teplota na povrchu pevné látky
$w_k$	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost
$z$	[-]	osová souřadnice válce

### Označení a jednotky veličin - řecké

$\alpha$	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]	součinitel přestupu tepla
$\alpha_{CAin}$	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]	součinitel přestupu tepla na vnitřním povrchu CASTORu ve velké héliové mezeře
$\alpha_{CAout}$	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]	součinitel přestupu tepla na vnějším povrchu CASTORu ve vzduchu
$\alpha_{PKin}$	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]	součinitel přestupu tepla na vnitřním povrchu palivového koše v malé héliové mezeře
$\alpha_{PKout}$	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]	součinitel přestupu tepla na vnějším povrchu palivového koše ve velké héliové mezeře
$\alpha_{qv}$	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]	součinitel přestupu tepla na výhřevné ploše v malé héliové mezeře
$\varepsilon$	[-]	poměrná sálavost
$\lambda$	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	součinitel tepelné vodivosti
$\lambda_{CA}$	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	součinitel tepelné vodivosti CASTORu
$\lambda_{FM}$	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	součinitel tepelné vodivosti fiktivního materiálu
$\lambda_{PK}$	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	součinitel tepelné vodivosti palivového koše
$\lambda_{vz}$	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	součinitel tepelné vodivosti vzduchu
$\nu$	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	součinitel kinematické viskozity
$\xi_x$	[-]	bezrozměrná souřadnice ve směru x
$\xi_y$	[-]	bezrozměrná souřadnice ve směru y
$\xi_z$	[-]	bezrozměrná souřadnice ve směru z
$\pi$	[-]	matematická konstanta
$\rho$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	hustota
$\tau_{kl}$	[Pa]	smykové napětí
$\varphi$	[°]	úhlová souřadnice válce
<b>Symboly</b>		
$\nabla$	[-]	Laplaceův operátor nabra

## Seznam použitých zkratek

AZ	aktivní zóna
BSVP	bazén skladování vyhořelého paliva
CASTOR	cask of storage and transport of radioactive material
CFD	computational fluid dynamics - výpočet dynamiky tekutin
EDU	elektrárna Dukovany
FVM	finite volume method - metoda konečných objemů
GNS	Gesellschaft für Nuklear-Service
H <sub>2</sub> O	lehká voda
JS	jaderné strojírenství
MAAE	mezinárodní agentura pro atomovou energii
MKO	metoda konečných objemů
MKP	metoda konečných prvků
MSVP	mezisklad vyhořelého paliva
PČ	palivový článěk
PK	palivová kazeta
SÚJB	státní úřad pro jadernou bezpečnost
UO <sub>2</sub>	kysličník uranu
VJP	vyhořelé jaderné palivo
VVER	vodo-vodní energetický reaktor
Zr1Nb	slitina zirkonu a 1 % niobu



## Obsah

1	Úvod .....	14
2	Palivová kazeta.....	16
2.1	Funkce a požadavky na palivové kazety .....	16
2.2	Palivový článek.....	17
2.2.1	Jaderné palivo.....	17
2.2.2	Pokrytí paliva .....	17
2.2.3	Materiál Zr1Nb.....	18
2.2.4	Konstrukce palivového článku .....	18
2.3	Konstrukce palivové kazety.....	19
3	Kontejner CASTOR 440/84 .....	22
3.1	Funkce a požadavky na kontejnery .....	22
3.2	Konstrukce CASTORu .....	23
3.3	Princip zajištění hermetičnosti kontejneru .....	24
3.4	Plnění kontejneru a manipulace.....	25
3.5	Zkoušky CASTORŮ.....	26
3.5.1	Mechanická zkouška .....	26
3.5.2	Zkouška vodotěsnosti.....	26
3.5.3	Zkouška tepelné odolnosti.....	27
3.5.4	Zkouška pomocí numerického výpočtu .....	27
4	Základy teorie přenosu tepla .....	28
4.1	Energetická rovnice .....	28
4.2	Fourierův zákon.....	29
4.3	Fourier-Kirchhoffova rovnice.....	29
4.4	Newtonův vztah pro přestup tepla .....	30
4.5	Podmínky jednoznačnosti.....	31
4.5.1	Okrajové podmínky.....	31
4.6	Úprava Fourier-Kirchhoffovy rovnice pro případ stacionárního vedení tepla s vnitřním zdrojem .....	32
5	Geometrický model kontejneru CASTOR .....	34
6	Analytický výpočet odvodu tepla.....	36
6.1	Výpočetní model pro analytické řešení .....	36

6.2	Odvod tepla do okolí prostupem .....	38
6.2.1	Určení součinitele přestupu tepla na povrchu kontejneru .....	40
6.3	Odvod tepla do okolí vedením.....	42
6.4	Odvod tepla do okolí vedením a sáláním .....	43
6.5	Výpočet teploty v závislosti na poloměru ve stěně kontejneru .....	44
7	Základy numerického výpočtu a příprava modelu .....	46
7.1	CFD simulace .....	46
7.1.1	Výpočetní prostředí Fluent a FVM .....	47
7.1.2	Definice řešeného výpočetního modelu .....	47
7.2	Tvorba výpočetního modelu .....	48
7.3	Tvorba výpočetní sítě .....	50
8	Vlastní numerický výpočet variant odvodu tepla.....	52
8.1	Nastavení základních neměnných parametrů výpočtů .....	52
8.2	Výpočet odvodu tepla prostupem .....	52
8.2.1	Závislost hustoty hélia na teplotě .....	53
8.2.2	Závislost součinitele přestupu tepla na teplotě na povrchu kontejneru.....	54
8.3	Hledání fiktivního pevného materiálu nahrazující hélium .....	55
8.4	Výpočet odvodu tepla vedením .....	55
8.5	Výpočet odvodu tepla vedením a sáláním .....	56
9	Vyhodnocení numerického výpočtu.....	57
9.1	Odvod tepla prostupem.....	57
9.2	Určení fiktivního pevného materiálu nahrazující hélium .....	64
9.3	Odvod tepla vedením.....	65
9.4	Odvod tepla vedením a sáláním.....	67
10	Závěr.....	69
11	Seznam použité literatury .....	71
12	Seznam obrázků .....	73
13	Seznam grafů.....	75
14	Seznam tabulek .....	76
15	Seznam příloh.....	77

# 1 Úvod

Základem produkce tepelné energie pomocí jaderného zdroje je štěpná řetězová reakce, při níž z původního štěpitelného prvku, nejčastěji uranu, vznikají nová jádra jiných prvků a také neutrony, které tuto reakci dále udržují. Celková produkovaná tepelná energie je složena z několika složek, přičemž její největší část je tvořena ztrátou kinetické energie právě nově vzniklých jader. Další, už méně významná, část tepelné energie je způsobena záchytem záření, které doprovází zmíněnou štěpnou reakci. Je důležité si uvědomit, že brždění nově vzniklých jader se uskutečňuje pouze v palivu, ale vzniklé záření může být zachyceno i v dalších konstrukčních materiálech mimo vlastní palivo. Poslední nejmenší složkou vývinu tepelné energie je dodatečný rozpad produktů štěpení, který ovšem bude pro pochopení problematiky této práce nejpodstatnější.

Tento způsob výroby tepelné energie se uskutečňuje v jaderných reaktorech umístěných v jaderných elektrárnách s možností provozování na různých výkonových hladinách, nejčastěji ale na nominálním výkonu. V případě plánované výměny paliva je nutno reaktor odstavit, tzn. dostat reaktor na nulový výkon zastavením štěpné řetězové reakce.

Odstavením jaderného reaktoru je ovšem zastavena pouze štěpná řetězová reakce v aktivní zóně (AZ), ale produkovaný tepelný výkon se ihned nezastaví. Tepelný výkon bude pouze volně klesat a to právě z důvodu dodatečného rozpadu produktů štěpení, které jsou také zdrojem tepla, jak už bylo zmíněno výše. Toto teplo vznikající rozpadem produktů štěpení, označované také jako zbytkové teplo, je potřeba nadále odvádět nejen po zastavení štěpné reakce přímo v reaktoru, ale i po vyjmutí palivových kazet (PK) z reaktoru. K tomuto účelu nejdříve slouží tzv. bazén skladování vyhořelého paliva (BSVP), kde jsou PK uloženy až 10 let od vyjmutí z AZ jaderného reaktoru. Tento způsob uložení je nazýván jako mokré skladování, jelikož PK jsou situovány pod hladinou vody a zároveň jsou PK v bazénu kontinuálně chlazeny proudící vodou. Během této doby klesne zbytkové teplo vyhořelého jaderného paliva (VJP) v BSVP. Až poté je možné VJP převést na jiný způsob uložení, tzv. suché skladování, do předem určených kontejnerů a ty následně do meziskladů vyhořelého jaderného paliva (MSVP). Nicméně i v těchto kontejnerech je potřeba stále klesající produkci zbytkového tepla nějakým způsobem odvádět.

Na rozdíl od BSVP, v kontejneru nuceně neproudí kolem PK žádná tekutina, takže odvod tepla je dán pouze přestupem tepla z povrchu kontejneru do okolí, kde probíhá pouze přirozená cirkulace okolního vzduchu. Tato cirkulace je v MSVP zajištěna aretačním větráním, využívající rozdílu výšek přírodních a odvodních otvorů a rozdílu hustot přiváděného a odváděného vzduchu, tzn. bez závislosti na elektrické či jiné energii, čímž je definována vysoká spolehlivost tohoto způsobu odvodu zbytkového tepla. Je důležité tomuto způsobu odvodu tepla věnovat pozornost, jelikož dosud není použit žádný jiný způsob chlazení přímo v kontejneru a tak znalost parametrů příslušných veličin během procesu odvodu tepla je základní předpoklad pro správný konstrukční návrh jak samotného kontejneru, tak i pro zajištění dostatečného větrání.

Tato technologie uložení PK je velmi závislá na součinitelích tepelné vodivosti konstrukčních materiálů, z nichž jsou kontejnery vyrobeny, nicméně jako u většiny tepelně namáhaných

konstrukcí jsou hlavním požadavkem vyhovující mechanické vlastnosti. Způsob určení vhodných materiálů by měl probíhat co nejpřesněji, ale také co nejjednodušeji, jelikož na kontejnery pro uložení VJP jsou kladeny vysoké požadavky, především z hlediska stability konstrukce a bezpečnosti, a proto jsou velice nákladnou záležitostí. Z tohoto důvodu jsou pro návrh odvodu tepla z PK do okolí kontejneru velmi často využívány numerické výpočty, tzv. CFD simulace (Computational Fluid Dynamics - výpočet dynamiky tekutin). Pomocí těchto počítačových simulací je možné relativně přesně odhadnout proces odvodu tepla z kontejneru a zjistit žádané veličiny, aniž by musely být provedeny náročné a drahé experimentální testy.

Hlavním cílem této diplomové práce je právě výpočet odvodu tepla z PK uložených v kontejneru do okolí pomocí CFD simulace provedené v zadaném výpočetním prostředí Fluent. Pro tento výpočet je použit zjednodušený návrh kontejneru z důvodu snížení náročnosti výpočtu při co nejvhodnějším zachování geometrických a materiálových parametrů. Výpočet je proveden v několika předem zadaných variantách (prostup, vedení, vedení a sálání) a následně jsou vyhodnoceny výsledky těchto variant výpočtů.

Před samotným provedením výpočtu je v teoretické části práce detailněji popsána konstrukce PK včetně palivových článků (PČ) pro reaktor VVER 440 (vodo-vodní energetický reaktor, v ruském originále водо-водяной энергетический реактор). Dále jsou uvedeny potřebné informace o kontejneru CASTOR 440/84, používaný právě pro tento typ PK. Nechybí zde ani základní teorie přenosu tepla pro pochopení principů dané problematiky a je zpracován i zjednodušený analytický postup výpočtu odvodu tepla.

Obecně je z analytického i numerického hlediska výpočet odvodu tepla vedením (kondukcí) jednodušší než výpočet odvodu tepla prouděním (konvekcí). Z tohoto důvodu je hélium, které přirozenou konvekcí proudí uvnitř kontejneru, nahrazeno během některých výpočtů neznámou fiktivní pevnou látkou. Dalším cílem této práce je určení charakteristických veličin této látky, která umožní zjednodušit výpočet odvodu tepla, ale nebude mít negativní vliv na přesnost výsledků.

Práce také obsahuje popis návrhu geometrického a výpočetního modelu kontejneru pro odvod tepla. Popsána je zde i tvorba optimální výpočetní sítě a dalších důležitých úkonů pro úspěšné provedení a vyhodnocení výpočtů.

## 2 Palivová kazeta

Palivové kazety (PK) jsou jednou z nejvýznamnějších částí v jaderném reaktoru, jehož vlastnosti určují a definují následující vlastnosti celé elektrárny:

- účinnost elektrárny
- parametry provozu
- provozní spolehlivost
- bezpečnost
- ekonomie provozu
- palivový cyklus

Nejen z těchto důvodů je PK věnována vysoká pozornost. Dalším důvodem zvýšené pozornosti je skutečnost, že PK pracují v náročných podmínkách v AZ jaderného reaktoru a musí odolávat různým náročným vlivům, jako jsou např. vysoké provozní teploty, radiační záření, dynamické a tepelné namáhání a také chemické procesy. Právě chemické procesy, probíhající nejen v samotném jaderném palivu, ale také v použitých konstrukčních materiálech PK, způsobují výrazné změny jejich vlastností, jako jsou změny tvaru a objemu těchto materiálů nebo i bobtnání samotného paliva, což komplikuje provoz PK. I přes všechny tyto vlivy musí během provozu PK pracovat bezpečně a spolehlivě. Realizovaná PK pro reaktor VVER 440 je na Obr. 1.



Obrázek 1 - Palivová kazeta pro reaktor VVER 440

### 2.1 Funkce a požadavky na palivové kazety

U jaderného reaktoru VVER 440, který se nachází na jaderné elektrárně Dukovany (EDU), je v AZ standardně uloženo 349 PK. Aby mohly PK správně plnit svoji funkci, musí vyhovovat těmto základním požadavkům:

- bezpečný a spolehlivý provoz
- dosažení požadovaného tepelného výkonu
- dosažení zadaného vyhoření paliva
- odolnost proti radiačnímu růstu (swelling)
- odolnost proti tečení (creep)
- pevnost, houževnatost a korozní odolnost konstrukčních materiálů
- chemická stálost

Swelling a creep jsou velkým problémem vyskytujícím se především přímo u samotného jaderného paliva. Pokud by palivo nebylo dostatečně odolné vůči těmto dvěma jevům, mohl by se během provozu iniciovat vznik mikrotrhlin. Tyto trhliny mohou vést k lokálnímu přehřátí paliva a mohla by tak být narušena rozměrová stabilita PK a následně i jejich hermetičnost, což je v návrhovém stavu zcela nepřipustné.



## 2.2 Palivový článek

Palivový článek (PČ) je základní konstrukční prvek PK. PČ je složen především ze dvou hlavních částí a to z jaderného paliva, které je zdrojem tepelné energie, a z pokrytí, jehož hlavním účelem je zajistit hermetičnost PČ a zabránit tak úniku radioaktivních látek z AZ reaktoru dále do primárního okruhu.

### 2.2.1 Jaderné palivo

Základním elementem PČ je jaderné palivo. Pro VVER 440 je palivo ve formě tablet válcového tvaru vyrobených lisováním a následně spékáním z kysličníku uranu ( $UO_2$ ), což je jeden z nejčastěji používaných druhů keramických paliv. Tyto tablety jsou v PČ vertikálně



poskládány a tvoří sloupec palivových tablet, viz Obr. 2. Obecná výška tablet může dosahovat až 30 mm, průměr až 20 mm. Tablety ovšem nejsou typické válečky, jelikož na spodním i horním čele jsou zpravidla mírně čokovitě vydutá, takže se tablety dotýkají pouze na malé okrajové čelní ploše, kde je navíc po vnějším obvodu vyrobeno malé sražení. Toto opatření je z důvodu snížení axiálních tepelných dilatací paliva, jelikož na okraji je nejnižší teplota tablety a tím se co nejvíce sníží přenos tepla mezi tabletami v axiálním směru. Dále je v tabletách vyroben malý průchozí centrální otvor, který má za účel odstranit teplotní extrém v ose paliva a snížit tak jeho maximální teplotu, aby nebyla překročena teplota tavení paliva během jeho provozu v reaktoru. Tento otvor také zvětší objem uvnitř PČ sloužící pro shromažďování plynných produktů štěpení.

Palivové tablety na EDU pro VVER 440 mají následující parametry:

- výška 9 až 11 mm
- průměr 7,57 mm
- průměr centrálního otvoru 1,2 až 1,4 mm
- hustota až  $10,6 \text{ g/cm}^3$

Obrázek 2 - Palivové tablety

### 2.2.2 Pokrytí paliva

Pokrytí paliva je druhou hlavní konstrukční částí PČ. Jak už bylo uvedeno výše, hlavním účelem pokrytí je zajistit hermetičnost PČ. Pokrytí by dále mělo zabránit úniku štěpných radioaktivních produktů do chladiva a tím dalšímu šíření radioaktivity mimo AZ reaktoru. V neposlední řadě také zamezuje nežádoucím chemickým procesům, které by mohly vzniknout reakcí mezi palivem  $UO_2$  a chladivem. Aby pokrytí splnilo všechny tyto funkce, je základním požadavkem výběr co nejvhodnějšího materiálu, který by měl mít tyto vlastnosti:

- vysoký součinitel tepelné vodivosti
- nízká schopnost absorpce neutronů
- chemická stálost během provozu
- těsnost proti úniku plynných produktů štěpení
- dobré mechanické vlastnosti a dobré plastické vlastnosti při tečení až do teplot  $800 \text{ }^\circ\text{C}$

Materiál pokrytí paliva pro reaktory VVER 440 je slitina zirkonu a 1 % niobu (Zr1Nb). Tento materiál se používá pro pokrytí paliv v reaktorech chlazených lehkou vodou (H<sub>2</sub>O) a má dobré mechanické vlastnosti, které jsou v tomto případě nutné z následujících důvodů:

- keramické palivo UO<sub>2</sub> má nízké hodnoty mechanických vlastností a pokrytí tak zastává i nosnou funkci PČ
- prostor mezi palivem a pokrytím musí vytvořit pevnou a těsnou bariéru proti úniku plyných štěpných produktů – tlak od těchto produktů může dosahovat až 17 MPa

Pokrytí je zpravidla tvořeno válcovou trubkou z důvodu dosažení co největší teplosměnné plochy, která přímo ovlivňuje množství odvedeného tepla. Z mechanického hlediska je používán vnější průměr pokrytí 9,1 mm a vnitřní průměr 7,8 mm pro materiál Zr1Nb pevnostně zcela dostačující.

### 2.2.3 Materiál Zr1Nb

Zirkonium je považováno za jeden z nejvhodnějších konstrukčních materiálů pro výrobu pokrytí právě díky svým velmi výhodným vlastnostem:

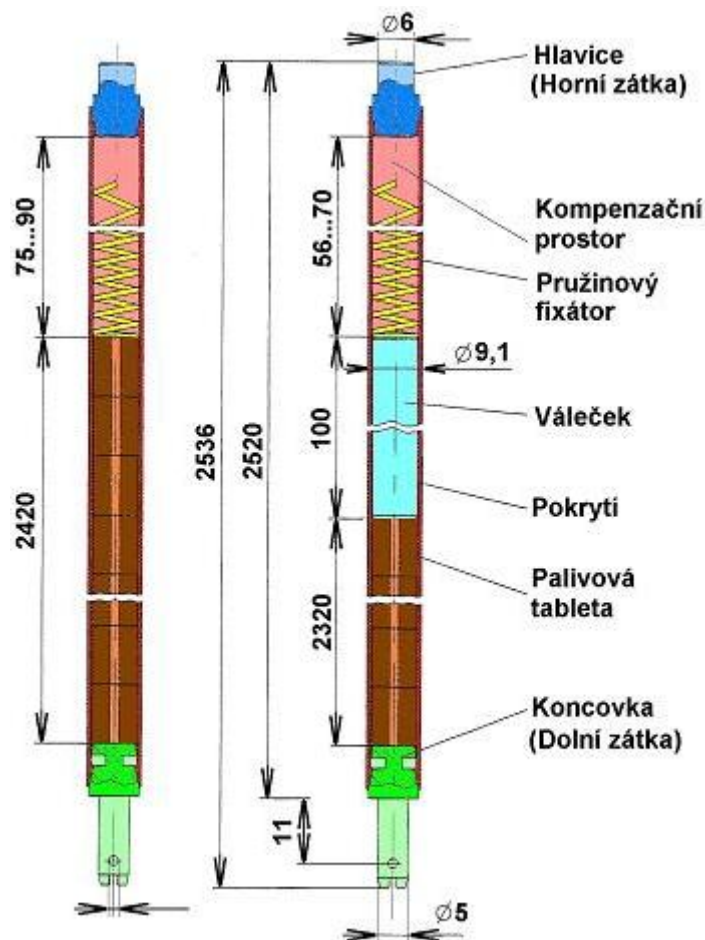
- vysoká korozní odolnost
- vysoká teplota tavení
- nízký absorpční průřez
- dostatečná plasticita
- možnost zpevnění legurami až na 1100 MPa

Jedním z mála vhodných prvků pro legování zirkonia je niob. Niob především zvyšuje korozní odolnost slitiny tak, že na počátku koroze díky niobu vzniknou na materiálu silné a pevné korozní vrstvy, které se s postupem času dále nemění a koroze se tak nemůže dále rozvíjet. Toto ale platí pouze v případě, že okolní teploty nepřesáhnou 450 až 500 °C. V případě překročení těchto teplot nastane rozrušení korozních vrstev a účinek niobu se tak vytrácí. Niob dále zvyšuje pevnostní vlastnosti materiálu i při zvýšených teplotách.

Slitina Zr1Nb disponuje především vysokými mechanickými vlastnostmi a vysokou korozní odolností, která je umocněna přítomností niobu. Zvýšení obsahu niobu ve slitině by vedlo k dalšímu zvýšení pevnostních charakteristik, bohužel také ke snížení korozní odolnosti, což je v tomto případě nežádoucí.

### 2.2.4 Konstrukce palivového článku

Konstrukce PČ pro reaktor VVER 440 je na *Obr. 3* vlevo. Vnější kostru PČ tvoří válcová trubka neboli již zmíněné pokrytí. Na horním konci je k pokrytí připevněna horní zátka, tzv. hlavice a na dolním konci dolní zátka, tzv. koncovka. Obě tyto zátky jsou k pokrytí hermeticky přivařeny a jsou nejčastěji ze stejného materiálu jako pokrytí. Nad koncovkou jsou do určité výšky naskládány palivové tablety z UO<sub>2</sub>. Nad palivovými tabletami je v kompenzačním prostoru uložena fixační pružina, jejíž použití umožňuje během provozu tepelné dilatace palivových tablet v axiálním směru při zachování soudržnosti sloupce tablet. Kompenzační prostor, obdobně jako centrální otvor v palivových tabletách, slouží k shromažďování plyných produktů štěpení.



Obrázek 3 - Konstrukce palivového článku VVER 440

Mezi sloupcem palivových tablet a pokrytím je malá radiální mezera, která je pro tyto PČ standardně 0,1 mm. Z důvodu zvýšení přestupu tepla z PČ a také kvůli kontrole hermetičnosti je tato mezera vyplněna a přetlakována héliem přibližně na hodnotu 0,5 MPa. Vlivem zvětšování objemu paliva se tato mezera během provozu zmenšuje.

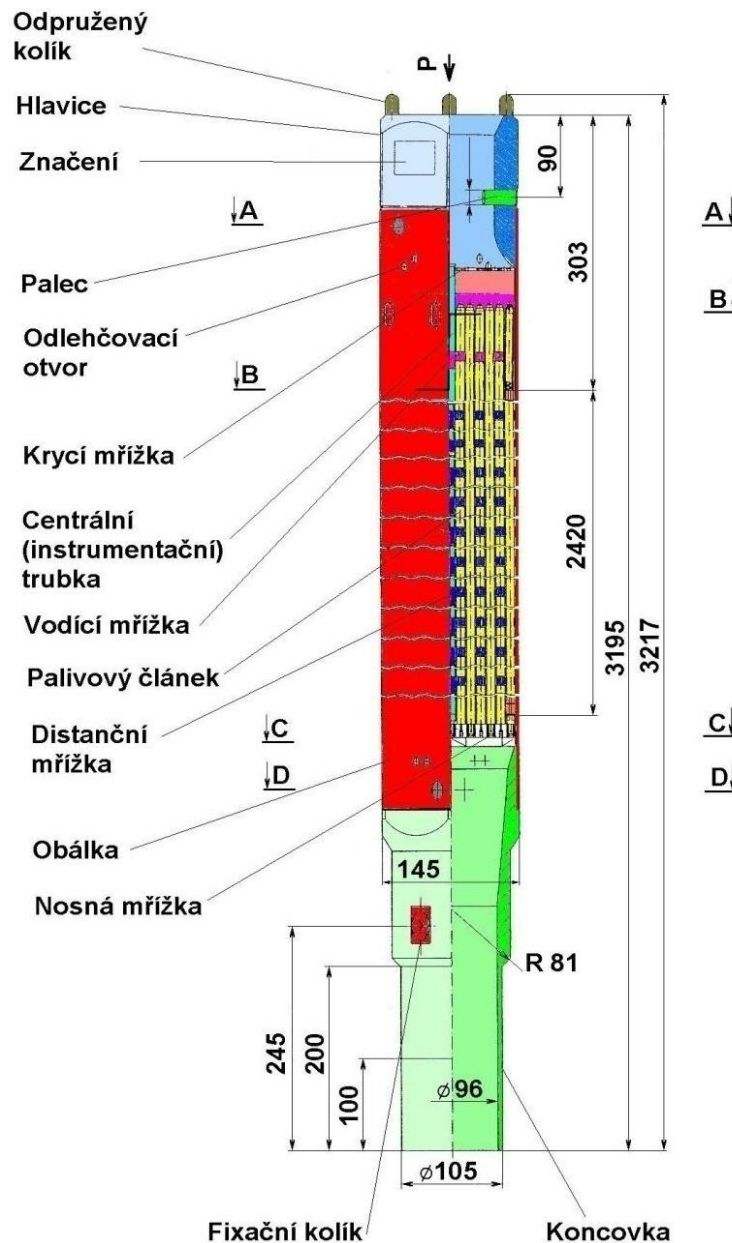
Na Obr. 3 vpravo je PČ regulační kazety, který se oproti standardnímu, výše popsánému PČ, liší pouze vloženým válečkem s nerezavějící oceli. Tento váleček je umístěn přímo pod pružinou a nahrazuje odpovídající část palivových tablet. Obvyklá výška tohoto válečku je 100 mm.

### 2.3 Konstrukce palivové kazety

Nejvýznamnější vliv na návrh konstrukčního řešení PK má zvolený typ reaktoru. Pro různé reaktory jsou provedeny různé konstrukce PK především v závislosti na zvoleném druhu paliva (nejčastěji kovové nebo keramické) a na druhu použitého chladiva a moderátoru. Nicméně z konstrukčního hlediska musí všechny tyto PK být schopny zajistit následující základní funkce:

- pevné a přesné uložení PK v AZ reaktoru včetně zajištění její polohy
- spolehlivé uchycení PK během manipulace

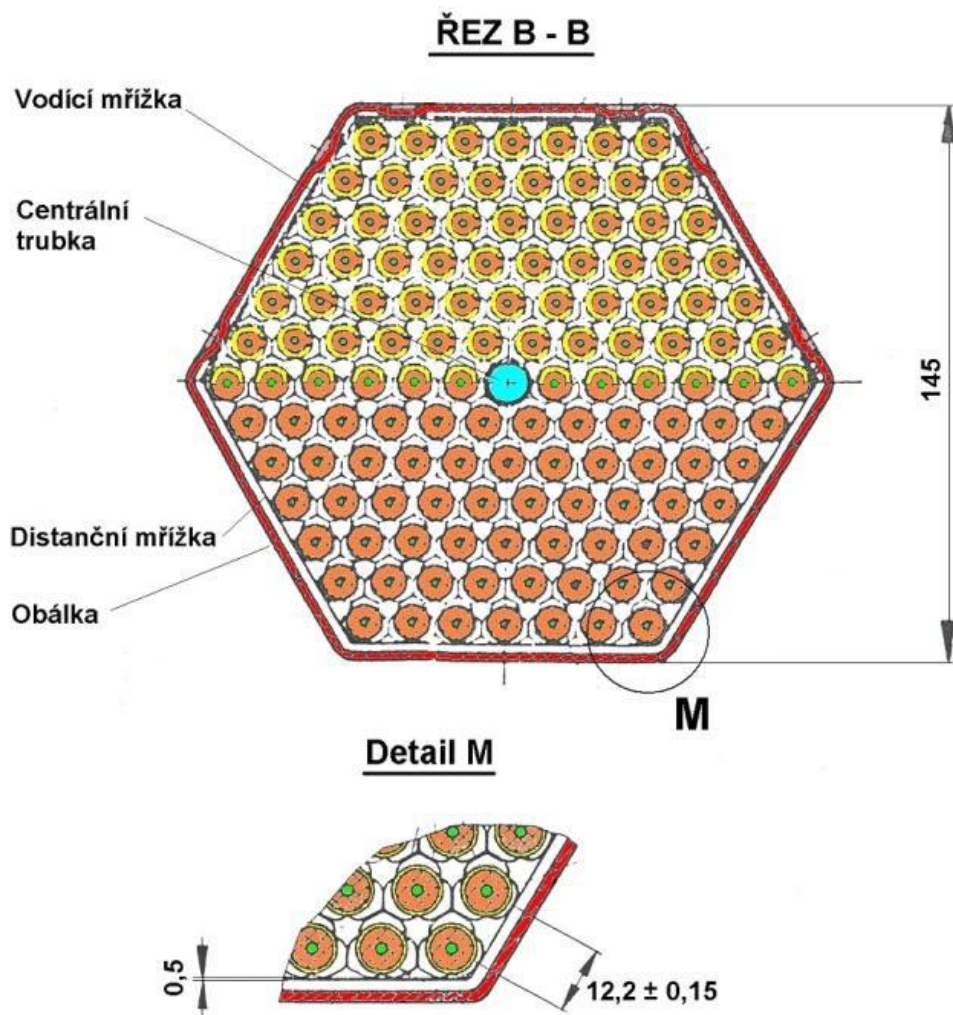
- nízký odpor vůči proudění chladiva
- tvarová stálost a zajištění hermetičnosti PK během provozu
- v případě poruchy PK zajistit možnost jejího vyjmutí
- možnost aplikace měřících čidel pro měření aktivity, teploty a průtoku
- bezpečnost během dopravy PK
- umožnění hromadné výroby



Obrázek 4 - Konstrukce palivové kazety VVER 440

Konstrukce PK pro reaktor VVER 440 je na Obr. 4 a je v ní usazeno 126 PČ, které jsou pomocí své koncovky pevně uloženy do nosné mřížky PK. Tato koncovka PČ je navíc opatřena malým kruhovým otvorem, kterým se koncovka pomocí závlačkového drátu do nosné mřížky zafixuje. Tato mřížka PK má tvar pravidelného šestiúhelníku, stejně tak jako všechny ostatní mřížky. Po výšce PK je umístěno dalších 10 zirkoniových distančních mřížek,

kteří vymezují danou vzdálenost mezi jednotlivými PČ a zabraňují jejich radiálnímu posunu z této předepsané pozice. Tyto distanční mřížky jsou připevněny k centrální trubce, která se nachází v ose PK a neobsahuje PČ. Nad vrchní distanční mřížkou je umístěna vodící mřížka, která slouží k zajištění přesného vedení PČ během jejich ukládání do PK. Po zasunutí PČ do PK jsou hlavice PČ ve vodící mřížce PK volně uloženy, čímž je umožněna axiální dilatace PČ.



Obrázek 5 - Příčný řez palivovou kazetou VVER 440

Svazek takto uložených PČ je obalen šestiúhelníkovou trubkou o tloušťce 1,5 mm, tzv. obálkou, viz *Obr. 5*, která nejen plní nosnou funkci PK a chrání ji proti poškození, ale také zajišťuje proudění chladiva do PK. K obálce je ve spodní části připevněna koncovka, díky níž je PK přesně uložena do nosné desky AZ reaktoru a pomocí fixačního kolíku je tato poloha trvale vymezena, viz *Obr. 4*. K horní části obálky je připojena hlavice pro plynulý výstup chladiva z PK a zároveň umožňující uchycení PK zavážecím strojem při manipulaci.

### 3 Kontejner CASTOR 440/84

V jaderném oboru se kontejnerem nazývá zařízení, které slouží k dlouhodobému uložení VJP. CASTOR 440/84 je kontejner určený pro ruské jaderné palivo s šestiúhelníkovým příčným průřezem (popsané v kapitole 2), které se používá v reaktorech VVER 440, jenž se nachází v EDU. Jedná se o dvouúčelový kontejner, který slouží jak ke skladování, tak i k přepravě VJP a je používán již od roku 1983. Zkratka tohoto kontejneru vznikla z původního anglického výrazu *Cask for storage and transport of radioactive material*, zkráceně tedy CASTOR. Výrobce tohoto kontejneru je česká firma Škoda JS a.s., spolupracující s německou firmou GNS mbH Essen, která je významným výrobcem nejen těchto typů kontejnerů po celém světě. Reálný model kontejneru včetně odkrytých vnitřních částí je na Obr. 6.



Obrázek 6 - Reálný model kontejneru CASTOR 440/84

#### 3.1 Funkce a požadavky na kontejnery

Na kontejnery jsou kladeny vysoké požadavky především z důvodu jaderné a radiační bezpečnosti, které jsou zcela prioritní v celém jaderném oboru. Základními a naprosto zásadními požadavky na všechny typy kontejnerů pro správné plnění jejich funkcí jsou:

- mechanická a tepelná odolnost
- hermetičnost
- radiační stínění
- podkritičnost
- odvod zbytkového tepla z PK

Pro správnou funkci kontejneru musí být všechny tyto vlastnosti zajištěny vždy, bez výjimky, a jsou proto důkladně ověřovány předepsanými zkouškami za normálních i extrémních podmínek.

Jak už bylo uvedeno v úvodu, tato práce se bude zabývat posledním z výše uvedených bodů a to odvodem zbytkového tepla z PK do okolí pomocí numerické simulace pro různé podmínky řešení.

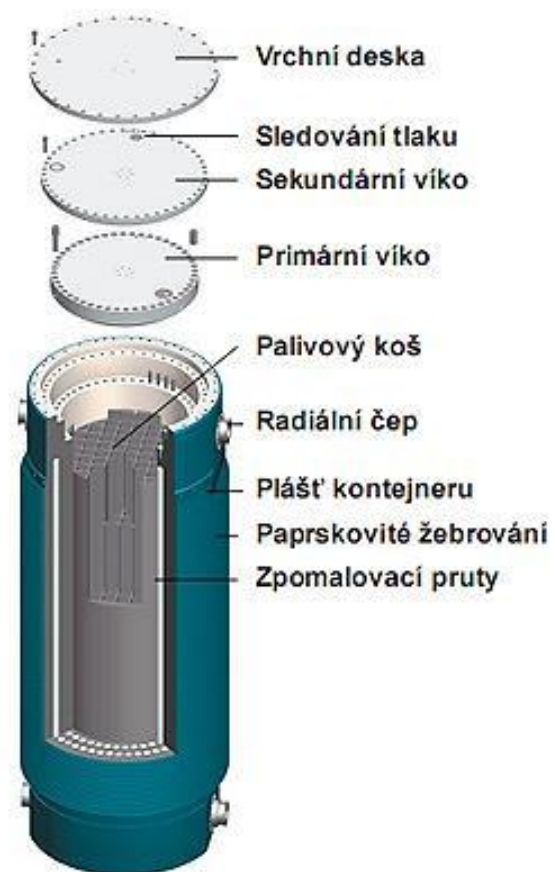
Významný vliv na splnění funkce kontejneru má správný výběr konstrukčních materiálů a navržení vhodné konstrukce. Hlavní materiál tělesa musí mít vysokou hodnotu mechanických vlastností, musí být dostatečně odolný vysokým teplotám, vznikajících od zbytkového tepla z VJP, musí zajistit dostatečné radiační stínění pro zamezení úniku neutronů mimo kontejner a v neposlední řadě musí zaručit dobrou tepelnou vodivost z důvodu co nejlepšího odvodu zbytkového tepla do okolí kontejneru. Konstrukce kontejnerů je navržena zejména podle druhu PK, které se do kontejneru budou zavážet.

### 3.2 Konstrukce CASTORu

Kontejner CASTOR 440/84 má tyto základní parametry:

- průměr: 2660 mm
- délka: 4080 mm
- tloušťka stěny: 37 cm
- maximální tepelný výkon: 25 kW
- kapacita palivových kazet VVER 440: 84 + volná centrální buňka
- maximální hmotnost kontejneru po naplnění: 116,1 t
- maximální přípustná teplota na povrchu kontejneru: 85 °C

Základními částmi kontejneru jsou těleso, tzv. plášť kontejneru, vnitřní koš na VJP a sada těsnících vík, viz *Obr. 7*. Těleso kontejneru chrání vnitřní části před vnějším poškozením a je vyrobeno z tvárné litiny, kde je na jejím vnitřním povrchu vytvořen nános vrstvy niklu pro výrazné zvýšení odolnosti proti korozi. Rovnoběžně s osou kontejneru jsou v tělese vytvořeny válcové otvory ve dvou kruhových řadách, v nichž jsou umístěny polyethylenové zpomalovací pruty, které by měly snížit možnost úniku neutronů z jaderného paliva. Na vnějším povrchu tělesa je vytvořeno pravidelné žebrování z důvodu zvětšení teplosměnné plochy, která tak umožňuje větší přestup tepla z povrchu kontejneru do okolí. Celý vnější povrch kontejneru je ošetřen epoxidovým nátěrem, navíc je zde umístěno čidlo pro měření teploty na povrchu kontejneru. Na dolním a horním konci pláště jsou vytvořeny radiální čepy, které jsou využívány při manipulaci s kontejnerem. Uvnitř tělesa kontejneru je nosná konstrukce PK, tzv. vnitřní palivový koš,



Obrázek 7 - Konstrukce CASTORU 440/84

jehož účelem je oddělit a vymezit polohu PK s VJP, které jsou v tomto koši uloženy, viz *Obr. 8*. Koš je vyroben spojením 85 přesně protlačovaných šestihranných trubek z hliníkové slitiny, konkrétně z materiálu AlMg1,8, což je materiál s dobrými mechanickými vlastnostmi, dostatečnou tepelnou vodivostí a odolností proti korozi. Mezi spojenými stěnami těchto trubek jsou umístěny plechy z ATABORu, které danou konstrukci vyztužují a díky přísadě bóru i snižují únik neutronů z PK. Tyto plechy jsou zafixované pomocí klínů. Takto řešená konstrukce palivového koše je vlastní návrh společnosti Škoda JS a.s. a je kompletně bez svarů. Další důležitou funkcí palivového koše, která je významně ovlivněna právě návrhem samotné konstrukce, je zajištění podkritičnosti PK. Koš je posazený na dně kontejneru, které je chráněno vrstvou hliníku proti oděru.



*Obrázek 8 - Palivový koš dle vlastního návrhu Škoda JS a.s.*

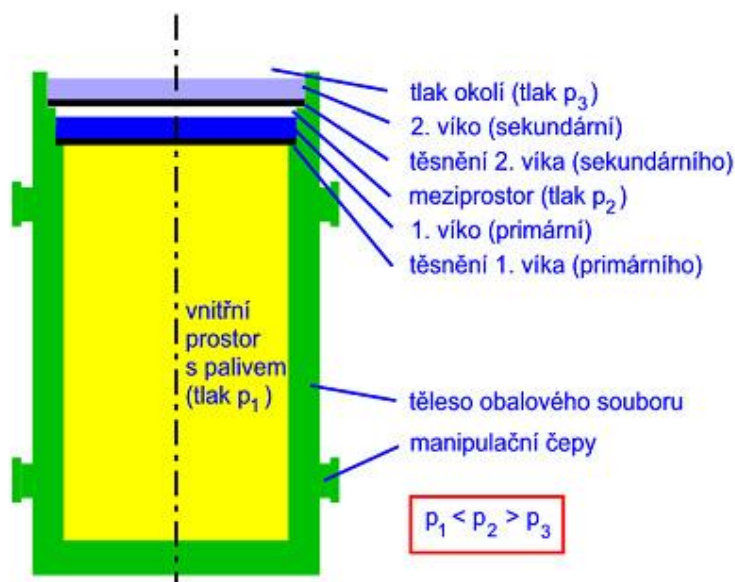
Horní čelo kontejneru je zatěsněno pomocí primárního a sekundárního víka, vyrobených z nerezového materiálu, s využitím niklového těsnění. Sekundární víko je navíc ještě přikryto vrchní deskou z uhlíkové oceli, která plní funkci ochrany proti vnějším vlivům. Každé z vík je přišroubované 48 šrouby. Celý kontejner je sestaven a fixován pouze rozebíratelnými spoji, jelikož se předpokládá, že v budoucnu může být VJP, které obsahuje i více než 90 % nerozštěpeného štěpitelného materiálu, ještě dále využito.

### **3.3 Princip zajištění hermetičnosti kontejneru**

Z *Obr. 9* je patrný důvod, proč je k utěsnění kontejneru použito primární a sekundární víko. Ve vnitřním prostoru kontejneru, který je vyplněn héliem, je vytvořen podtlak a naopak mezi primárním a sekundárním víkem, kde se taktéž nachází hélium, je přetlak. Nad sekundárním víkem je tlak atmosférický. Pokud dojde k porušení těsnosti primárního víka, tak z důvodu podtlaku uvnitř kontejneru neuniknou žádné radioaktivní částice mimo vnitřní prostor, ale naopak bude proudit přetlakované hélium do vnitřního prostoru z prostoru mezi víky a tlak uvnitř kontejneru a mezi víky se vyrovná. Pokud by došlo k porušení těsnosti sekundárního víka, tak se tlak mezi víky vyrovná na hodnotu atmosférického tlaku, ale tento tlak bude pořád vyšší, než tlak ve vnitřním prostoru a k úniku radioaktivních částic z kontejneru opět nedojde. Tímto způsobem je zajištěna hermetičnost kontejneru při porušení těsnosti jednoho z



vík. Mezi primárním a sekundárním víkem je umístěno čidlo pro sledování hodnoty tlaku, které v případě snížení tlaku vyše varovný signál. Následně je vyšetřena a zjištěna příčina tohoto signálu. Porucha tlakového čidla nebo těsnosti sekundárního víka je snadno odstranitelná na suchu a prostor mezi primárním a sekundárním víkem je znovu natlakován héliem. V případě poruchy těsnosti primárního víka je opravu nutno provést pod vodní hladinou a primární víko celé rozebrat a znovu utěsnit.



Obrázek 9 - Podélný řez zjednodušeným modelem CASTORU

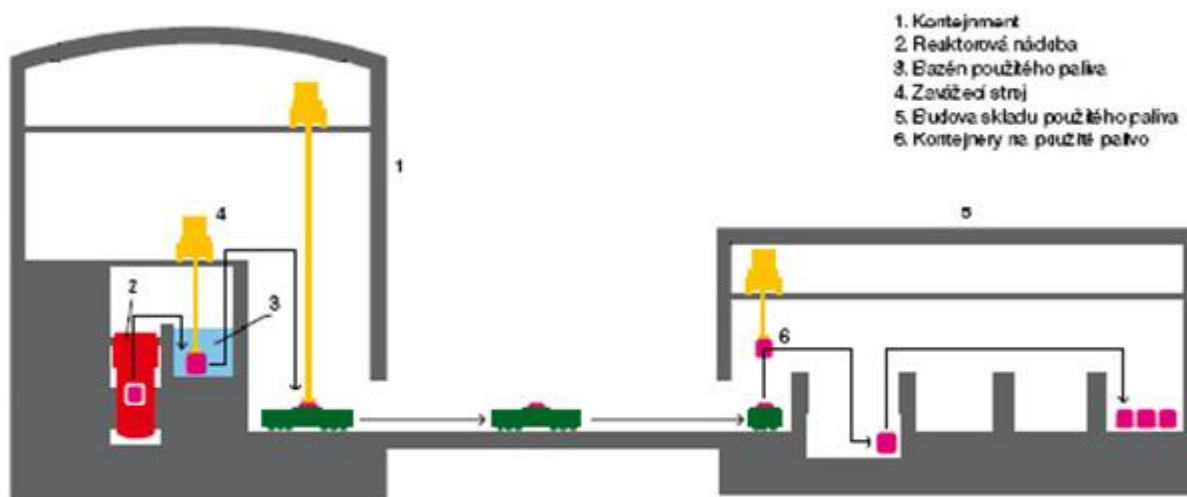
### 3.4 Plnění kontejneru a manipulace

Před začátkem plnění kontejneru je nutné provést zkoušku manipulace s prázdným kontejnerem včetně zkušebního převozu kontejneru do MSVP. V průběhu zkoušky je vytvářen zápis, který zkontroluje Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB). V případě splnění předepsaných podmínek vydá SÚJB souhlas se zaplněním kontejneru a následným převozem na místo volného skladování nebo do konkrétního MSVP.

Před vlastním plněním kontejneru je nejprve nutné umístit VJP z AZ do BSVP. Před začátkem manipulace s VJP je nutné odstranit hradítko mezi BSVP a šachtou reaktoru. Celý tento prostor je pak pomocí čerpadel zaplněn vodou, aby bylo zajištěno radiační stínění radioaktivního VJP během jeho přemístování. Poté je možné VJP vyjmout z AZ jaderného reaktoru a vložit do BSVP pomocí zavážecího stroje. Po ukončení přemístění VJP je hradítko vráceno zpět a šachta reaktoru je vypuštěna. V BSVP je VJP ponecháno tak dlouho, dokud se radioaktivita nesníží pod požadovanou úroveň. Běžně se jedná o dobu do 10 let.

Vlastní plnění a manipulace s kontejnerem je na *Obr. 10*. Plnění kontejneru je provedeno přímo v reaktorovém sále. Kontejner je ponořen pod vodní hladinou a VJP je pod vodní hladinou z BSVP přemístěno do kontejneru. Pod hladinou je také připevněno primární víko kontejneru, následuje vytažení kontejneru, jeho odvodnění a vysušení. Poté je připevněno a utěsněno sekundární víko kontejneru, dále je naplněn prostor mezi víky héliem, je provedena předepsaná kontrola těsnosti, následně i kontrola teploty povrchu kontejneru a kontejner je

poté odvezen z reaktorového sálu. Před umístěním kontejneru do MSVP jej inspektoři z Mezinárodní agentury pro atomovou energii (MAAE) zapečetí a až pak je uzavřený kontejner umístěn pomocí železniční vlečky do připraveného MSVP, kde jsou kontejnery uloženy na desítky let na předem určené pozice z důvodu zajištění přirozené cirkulace vzduchu kolem kontejnerů a dostatečného prostoru pro případnou manipulaci.



Obrázek 10 - Schéma manipulace s VJP a kontejnerem

### 3.5 Zkoušky CASTORŮ

Kontejnery jsou před začátkem využívání podrobeny celé řadě náročných zkoušek a všechny musí být úspěšně ukončeny. Dále budou zmíněny jen ty nejzákladnější. Projektovaná životnost těchto kontejnerů je 60 let.

#### 3.5.1 Mechanická zkouška



Obrázek 11 - Zkouška volným pádem

Mechanická zkouška je složena z několika sérií samostatných zkoušek pádem. První série zkoušek spočívá v puštění kontejneru z výšky 9 m na rovný betonový základ, jejímž cílem je napáchat na kontejneru co největší škody, viz *Obr. 11*. V druhé sérii zkoušek je kontejner naražen volným pádem z výšky 1 m na ocelový trn o průměru 15 cm a délce 20 cm v takové pozici, aby opět byla způsobena co největší poškození na kontejneru. Kontejner by měl být dokonce navržen tak, aby odolal pádu letadla.

#### 3.5.2 Zkouška vodotěsnosti

Při této zkoušce musí kontejner odolat vnějšímu přetlaku 2 MPa, což odpovídá hloubce 200 m pod vodní hladinou. Tato zkouška se obvykle provádí pouze výpočtem. Jinou alternativou této zkoušky je ponoření kontejneru 15 m pod vodní hladinu po dobu 8 hodin.

### 3.5.3 Zkouška tepelné odolnosti

Při této zkoušce je kontejner rovnoměrně zatížen žářem po dobu 30 minut kolem celého povrchu, viz *Obr. 12*. Teplota tohoto plamene musí být alespoň 800 °C.



*Obrázek 12 - Zkouška tepelné odolnosti*

### 3.5.4 Zkouška pomocí numerického výpočtu

Provádět testy kontejneru experimentálně na reálném zařízení není vždy nejvhodnější řešení, proto jsou mnohem častěji některé zkoušky provedeny pomocí numerického výpočtu. V současné době se pro tyto účely nejčastěji využívá metoda konečných prvků (MKP) a metoda konečných objemů (MKO). Hlavní výhodou numerických metod využívající MKP je zjištění stavu, kdy materiál dosáhne své meze napětí, což lze při experimentálních zkouškách určit jen velice těžko nebo to nelze zjistit vůbec. Dále je také možné odhalit deformace, které nemusí být během reálných zkoušek patrné. Nicméně pro kontrolu správnosti výpočtu včetně nastavení odpovídajících podmínek je čas od času potřebné provést zkoušku experimentálně na skutečném zařízení.

## 4 Základy teorie přenosu tepla

Přenos tepla mezi dvěma látkami, jehož cílem je vyrovnání teplotního rozdílu mezi nimi, se stejně jako řada dalších fyzikálních jevů řídí svými pevně danými zákonitostmi:

- teplo samovolně přechází vždy z teplejší látky na látku chladnější, nikdy opačně
- aby mohlo teplo přecházet z jedné látky na druhou, musí mezi látkami existovat teplotní rozdíl
- v ideálním případě, tzn. beze ztrát, je úbytek tepla z teplejší látky roven přírůstkem tepla do látky chladnější

Z fyzikálního hlediska obecně existují tři způsoby přenosu tepla:

- vedení (kondukce) – tento přenos tepla se uskutečňuje v pevných látkách, klidných kapalinách a v tekutinách proudících laminárně ve směru kolmém na proudění, obecně ve spojitém látkovém prostředí. Tento způsob přenosu tepla je realizován pomocí dvou mechanismů:
  - přímý styk molekul, které do sebe narážejí a předávají si vzájemně kinetickou energii (pevné látky a kapaliny)
  - difúze, při níž vzájemným přemísťováním molekul z jedné látky do druhé dochází k vyrovnání teplot (pouze kapaliny)
- proudění (konvekce) – podmínkou je opět spojitě látkové prostředí. Odehrává se u laminárně (pouze v podélném směru) a turbulentně (v podélném i příčném směru) proudících tekutinách. Energie je přenášena pomocí pohybu molekul, přičemž pohyb může být:
  - přirozený, kde se tekutina dostává do pohybu rozdílem hustot ohřátých a studených částic
  - nucený, kde k vyvolání pohybu slouží jiné zařízení, např.: ventilátor, kompresor, čerpadlo atd.
- sálání (radiace) – jedná se o přenos energie pomocí elektromagnetického vlnění, které se šíří rychlostí světla, má tepelné účinky a nepotřebuje pro přenos tepla žádné médium. U tuhých těles sálá jen malá vrstva na povrchu, ale plyny sálají celým svým objemem. Příkladem sálání je přenos tepla ze Slunce na Zemi.

### 4.1 Energetická rovnice

Jak již bylo uvedeno výše, v ideálním případě je množství tepla odebraného z látky teplejší rovno množství tepla dodaného do látky chladnější. Toto tvrzení není nic jiného než zákon o zachování energie, který je možné matematicky popsat pomocí základní diferenciální rovnice, tzv. energetické rovnice, v následujícím tvaru:

$$\frac{dh}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} = \frac{\tau_{kl}}{\rho} \frac{\partial w_k}{\partial l} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial q_k}{\partial k} + \frac{q_v}{\rho} \quad (1)$$

kde  $k$  a  $l$  jsou sčítací indexy. Každá část této rovnice představuje jiný způsob změny energie:

- levá část rovnice popisuje změnu energie 1 kg látky za sekundu
- první člen pravé části rovnice představuje disipaci kinetické energie na teplo

- druhý člen pravé části rovnice zastupuje difúzi tepla
- poslední člen na pravé straně rovnice určuje produkci tepla od vnitřního zdroje

Uvedení postupu odvození rovnice (1) je zdouhavé a pro tuto práci nedůležité. Postupným zjednodušováním je možné tuto rovnici upravit na tvar známý jako Fourier-Kirchhoffova rovnice vedení tepla, který bude pro některé zadané varianty tepelného výpočtu využít. Před odvozením této Fourier-Kirchhoffovy rovnice bude uveden neméně důležitý Fourierův zákon.

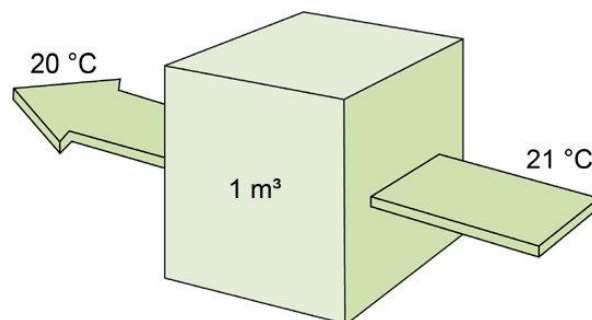
## 4.2 Fourierův zákon

Tento zákon popisuje teorii vedení tepla v pevných látkách a tvrdí, že:

„Měrný tepelný tok  $\dot{q}$  (to je tepelný tok  $\dot{Q}$  vztahovaný na jednotku plochy  $S$ ) přenášený vedením v nějaké látce je přímo úměrný velikosti teplotního gradientu a má opačné znaménko než tento gradient.“ [7]

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{S} = -\lambda \cdot \text{grad}T \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (2)$$

Jedná se tedy o měrný tepelný tok, který projde za jednotku času jednotkovou plochou kolmou na směr tepelného toku.  $\lambda$  [W/mK] je součinitel tepelné vodivosti, který udává množství tepla, které projde krychlí o straně 1 m při teplotním rozdílu protilehlých stěn 1 K, viz Obr. 13.



Obrázek 13 - Grafická interpretace součinitele tepelné vodivosti

Matematický předpis pro gradient v kartézském souřadnicovém systému i se zavedením Laplaceova operátoru nabývá následující:

$$\text{grad} = \nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial k} \quad (3)$$

## 4.3 Fourier-Kirchhoffova rovnice

Fourier-Kirchhoffova rovnice je získána zjednodušením diferenciální energetické rovnice. Nejprve je zaveden předpoklad, že v látce během daného procesu nedojde ke změně tlaku ( $dp = 0$ ) a nebudou zde působit žádná napětí ( $\tau_{kl} = 0$ ). Rovnice (1) je tak zjednodušena do následujícího tvaru:

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial q_k}{\partial k} + \frac{q_v}{\rho} \quad (4)$$

Dále je možné rozepsat změnu entalpie (5) a měrné teplo (6):

$$dh = c_p dT \quad (5)$$

$$q_k = -\lambda \cdot \text{grad}T = -\lambda \frac{\partial T}{\partial k} \quad (6)$$

Po zavedení vztahů (5) a (6), a za předpokladu konstantní izobarické měrné tepelné kapacity ( $c_p = \text{konst.}$ ), rovnice (4) přejde na tvar:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial}{\partial k} \left( -\lambda \frac{\partial T}{\partial k} \right) + \frac{q_v}{\rho c_p} \quad (7)$$

Výraz na levé straně rovnice je možné rozepsat do tvaru parciálních derivací následovně:

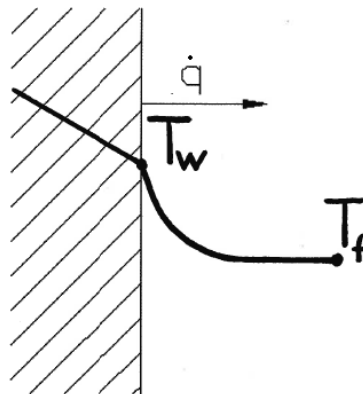
$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial k} w_k \quad (8)$$

Jelikož je uvažováno vedení tepla v pevné látce, je v posledním členu na pravé straně rovnice (8) nulová rychlost ( $w_k = 0$ ) a po dosazení do rovnice (7) vznikne obecná parciální diferenciální rovnice vedení tepla známá jako Fourier-Kirchhoffova rovnice:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial}{\partial k} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial k} \right) + \frac{q_v}{\rho c_p} \quad (9)$$

Tato Fourier-Kirchhoffova rovnice vedení tepla nabývá platnosti právě pro homogenní, izotropní a nepohybující se prostředí. Díky ní je možné určit hodnoty teplot a tepelného toku v pevných látkách.

#### 4.4 Newtonův vztah pro přestup tepla



Obrázek 14 - Ilustrace Newtonova vztahu pro přestup tepla

Newtonův vztah (10) se používá k popisu přestupu tepla z povrchu tělesa do okolní proudící tekutiny:

$$\dot{q} = \alpha \cdot (T_w - T_f) \quad (10)$$

kde  $T_w$  [K] je teplota na povrchu pevné látky (index w je z anglického výrazu wall = stěna),  $T_f$  [K] je teplota okolní proudící tekutiny v dostatečné vzdálenosti, aby na ní teplota stěny

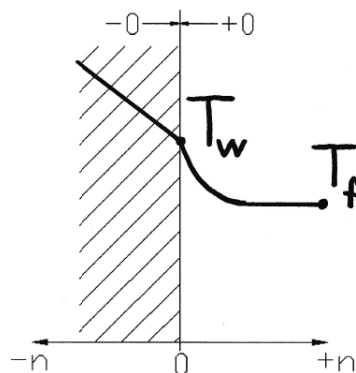
neměla vliv (index  $f$  je z anglického výrazu fluid = tekutina) a  $\alpha$  [ $W/m^2K$ ] je součinitel přestupu tepla, který udává množství tepla, které za jednotku času přejde mezi jednotkovou plochou a okolní tekutinou při jejich tepelném rozdílu 1 K. Na rozdíl od součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  je součinitel přestupu tepla  $\alpha$  závislý na celé řadě veličin charakterizujících jak danou látku, tak i stav proudění. Nejčastěji se určuje experimentálně, ale lze určit i výpočtem.

#### 4.5 Podmínky jednoznačnosti

Obecná Fourier-Kirchhoffova rovnice vedení tepla popisuje pouze vlastní proces vedení tepla, ale nezahrnuje v sobě jiné vlivy, jako např. tvar řešeného tělesa, jeho stav, vliv okolí apod. Pokud nebude tato rovnice vedení tepla doplněna tzv. podmínkami jednoznačnosti, není možné získat jednoznačně určené teplotní pole v řešené oblasti. Druhy podmínek:

- Geometrické – udávají tvar a velikost prostoru
- Fyzikální – udávají hodnotu všech fyzikálních veličin obsažených v rovnicích, např.: součinitel tepelné vodivosti, měrná tepelná kapacita, hustota, kinematická viskozita, atd.
- Časové – jsou známé také jako počáteční podmínky a udávají stav procesu v celé řešené oblasti ve výchozím čase  $t = 0$
- Okrajové – udávají stav procesu na omezujících plochách řešené oblasti

##### 4.5.1 Okrajové podmínky



Obrázek 15 - Výchozí schéma pro odvození okrajových podmínek

Okrajová podmínka I. druhu (Dirichetova) - zadáno:  $T_w$

$$T|_{n=0} = T_w \quad (11)$$

⇒ rozložení teplot  $T_w$  na povrchu tělesa se nemění.

Okrajová podmínka II. druhu (Neumannova) - zadáno:  $\dot{q}_w$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=-0} = \dot{q}_w \quad (12)$$

⇒ definuje hodnotu měrného tepelného toku  $\dot{q}_w$  kolmo na povrch tělesa.

Okrajová podmínka III. druhu (Fourierova) - zadáno:  $\alpha$ ,  $T_f$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=-0} = \alpha \cdot (T|_{n=0} - T_f) \quad (13)$$

⇒ měrný tepelný tok přenášený vedením na povrch tělesa je roven měrnému tepelnému toku odebíranému konvektivním přenosem z tohoto povrchu do okolní tekutiny.

Okrajová podmínka IV. druhu (podmínka při styku dvou těles) - zadáno:  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=-0} = -\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=+0} \quad (14)$$

⇒ v místě styku hranic dvou ploch je měrný tepelný tok na obou plochách stejný.

Okrajová podmínka V. druhu - zadáno:  $\varepsilon$ ,  $T_f$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=-0} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^4 \Big|_{n=0} - \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 \right] \quad (15)$$

#### 4.6 Úprava Fourier-Kirchhoffovy rovnice pro případ stacionárního vedení tepla s vnitřním zdrojem

V podkapitole 4.3 byla definována obecná parciální diferenciální Fourier-Kirchhoffova rovnice vedení tepla v pevných látkách (9):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial}{\partial k} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial k} \right) + \frac{q_v}{\rho c_p} \quad (9)$$

Vzhledem k náročnosti výpočtu je součinitel tepelné vodivosti uvažován konstantní ( $\lambda = \text{konst.}$ ) a rovnice je tak zjednodušena na tvar:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial k^2} + \frac{q_v}{\rho c_p} \quad (16)$$

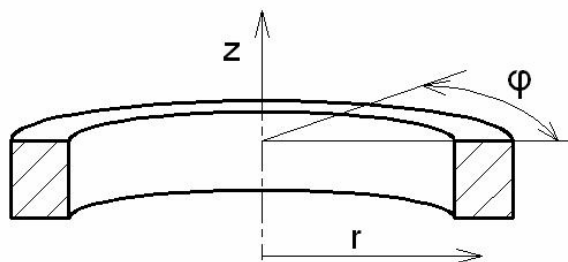
Vzhledem k tomu, že produkce zbytkového tepla z VJP v kontejneru se v čase mění jen velmi pozvolna, je možné proces odvodu tepla uvažovat jako stacionární děj. Do rovnice (16) bude navíc zaveden již výše zmíněný Laplaceův operátor a rovnice tak přejde do tvaru:

$$0 = \lambda \cdot \nabla^2 T + q_v \quad (17)$$

Jelikož odvod tepla z kontejneru nebude během analytického řešení počítán v kartézském souřadnicovém systému, nýbrž v cylindrickém, viz *Obr. 16*, je i Laplaceův operátor nabra převezen do cylindrického souřadnicového systému, v němž jeho kvadrát nabývá tvaru:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (18)$$





Obrázek 16 - Cylindrický souřadnicový systém

Po aplikaci Laplaceova operátoru pro cylindrický souřadnicový systém (18) na již upravenou Fourier-Kirchhoffovu rovnici vedení tepla (17) a po vydělení této rovnice součinitelem tepelné vodivosti  $\lambda$  vznikne vztah:

$$0 = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_v}{\lambda} \quad (19)$$

Rovnice (19) je dále zjednodušena předpokladem, že vedení tepla bude uvažováno pouze v radiálním směru, z čehož vyplývá, že gradient teploty v osovém směru ( $z$ ) a úhlovém směru ( $\varphi$ ) je nulový:

$$0 = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{q_v}{\lambda} \quad (20)$$

Pro následující výpočty je vhodné tento tvar zjednodušené Fourier-Kirchhoffovy rovnice vedení tepla přepsat do tvaru (21) a jelikož je teplota závislá pouze na poloměru, je možné parciální derivaci nahradit derivací totální (22):

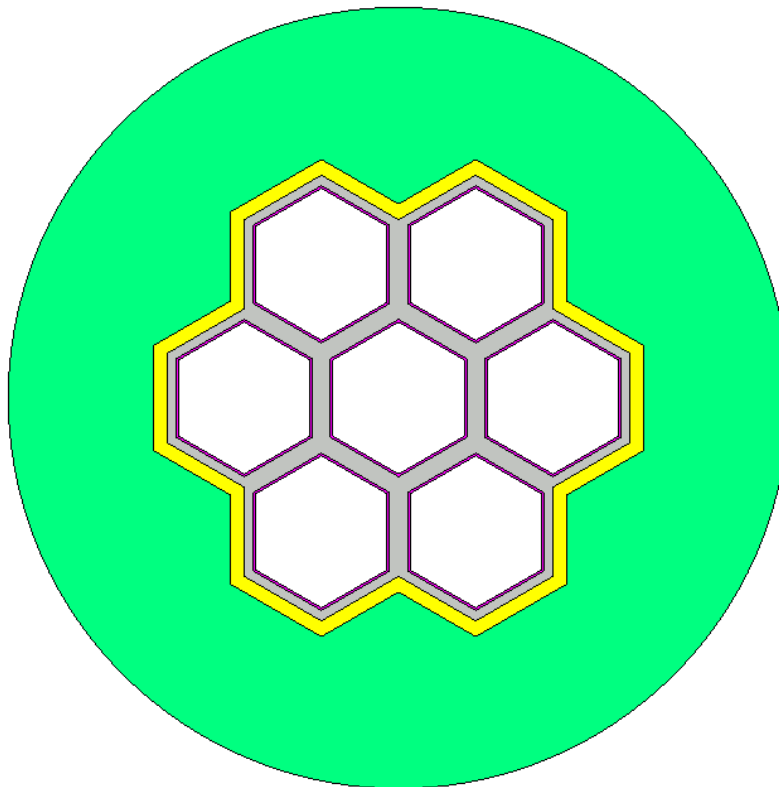
$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = -\frac{q_v}{\lambda} \quad (21)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) = -\frac{q_v}{\lambda} \quad (22)$$

Tímto postupem byl získán konečný tvar zjednodušené diferenciální Fourier-Kirchhoffovy rovnice pro stacionární vedení tepla s vnitřním zdrojem.

## 5 Geometrický model kontejneru CASTOR

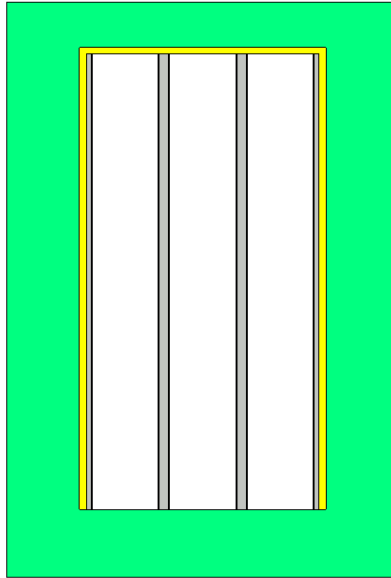
Vzhledem k náročnosti reálné konstrukce kontejneru CASTOR a s předpokladem, že bude model dále výchozím i pro numerickou simulaci, je geometrický model poněkud zjednodušen a to v mnoha ohledech. Tím nejvýznamnějším zřejmě je, že je pro výpočet uvažován zmenšený model kontejneru pouze pro 7 PK, který byl pro tuto práci doporučen. Radiální rozměry PK, vnitřního koše a mezer jsou reálné dle skutečnosti, nicméně bylo potřeba upravit tloušťku stěny kontejneru, aby odpovídala doporučené konfiguraci modelu a byla tak zachována co největší odpovídající přesnost výpočtu. Příčný průřez modelu kontejneru je na *Obr. 17*, z něhož je patrné, že nebyly uvažované zpomalovací pruty ve stěně kontejneru, jejichž přítomnost by komplikovala přípravu vlastního numerického výpočtu (zejména při tvorbě výpočetní sítě) a vliv na výsledky by nebyl významný.



*Obrázek 17 - Příčný průřez geometrického modelu kontejneru*

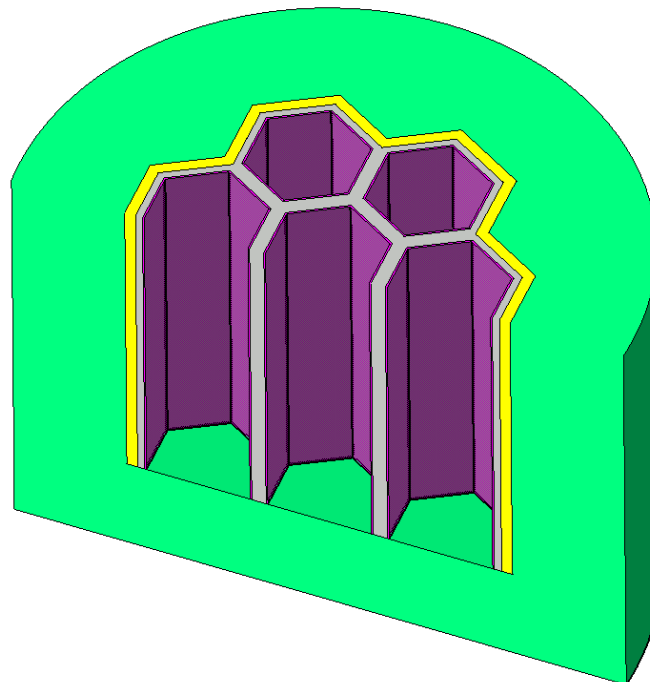
Tento zjednodušený model je složen z několika oddělených částí. Ochranu proti vnějším vlivům tvoří vlastní těleso kontejneru (zeleně) o vnějším průměru 860 mm. Mezi vnitřním povrchem kontejneru a vnějším povrchem palivového koše (šedivě) je velká héliová mezera (žlutě), která má šířku 15 mm. Tato mezera rovněž zasahuje i pod horní víko kontejneru s totožnou velikostí. Na vnitřních plochách palivového koše je malá héliová mezera o šířce 2,5 mm (fialově), která odděluje palivový koš od přímého kontaktu s PK, které ovšem nejsou v koši vymodelovány (nejsou potřebné pro provedení daných výpočtů). Palivový koš dosedá přímo na dno kontejneru, tudíž tam žádná mezera není. Tloušťka jednoho šestiúhelníku

palivového koše je 10 mm. Výška palivového koše byla doporučena 1 m, tloušťka spodního víka je zvolena 150 mm a tloušťka horního víka 100 mm. Podélný osový průřez je na *Obr. 18*, kde je dobře viditelná i héliová mezera pod horním víkem kontejneru a i její propojení s mezerou mezi palivovým košem a pláštěm kontejneru.



*Obrázek 18 – Podélný osový průřez geometrického modelu kontejneru*

Tento zjednodušený model kontejneru byl vytvořen v modelářském prostředí Catia V5. Další potřebné rozměry jsou uvedeny v příloženém výkresu. Pro ještě názornější představu je zde vložen i izometrický pohled, který je otevřen pomocí příčného i podélného řezu, viz *Obr. 19*.



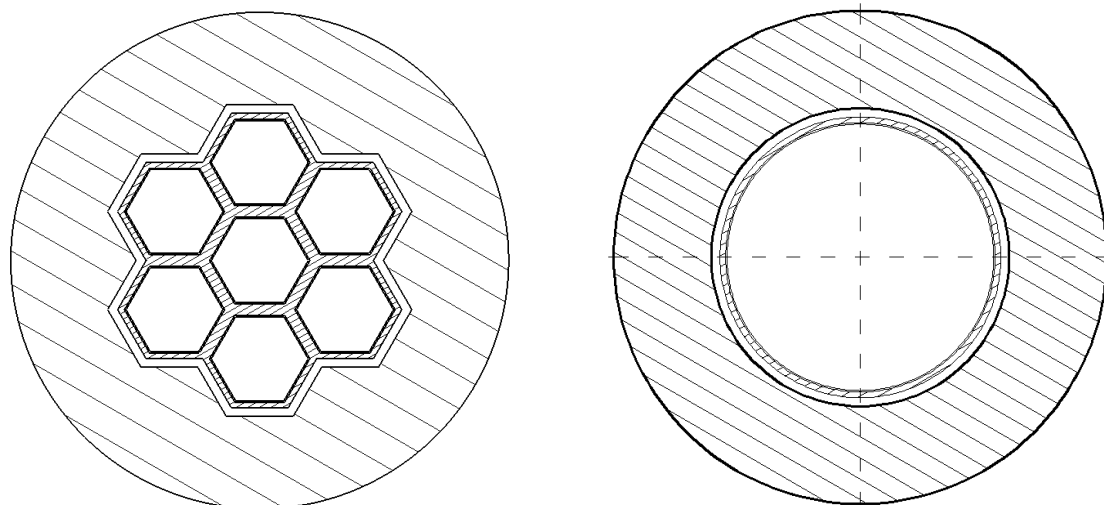
*Obrázek 19 - Izometrický pohled do vnitřku kontejneru*

## 6 Analytický výpočet odvodu tepla

Přestože není analytický výpočet odvodu tepla náplní této práce, je zde alespoň zjednodušeně naznačen postup analytického řešení, přičemž je uvažováno šíření tepla pouze v radiálním směru, takže řešená je jen hlavní část kontejneru v místě PK, tedy bez horního a spodního víka a horní héliové mezery. Obdobná úvaha je pak aplikována i na numerické řešení. Analyticky jsou řešitelné jen jednoduché úlohy s jednoznačnými okrajovými podmínkami, v opačném případě je výpočet velmi složitý. Největší výhodou analytického řešení je fakt, že je snadno a rychle uskutečněn prvotní odhad průběhu řešeného děje, nicméně v tomto případě je výpočet proveden pouze obecně bez číselných hodnot.

### 6.1 Výpočetní model pro analytické řešení

Jelikož je vytvořený geometrický model kontejneru vzhledem ke svému tvaru pro analytický výpočet velmi složitý, viz *Obr. 20* (vlevo), je pro analytické řešení model adekvátně zjednodušen. Pravidelný lomený profil okrajových PK kolem tenké stěny palivového koše je nahrazen odpovídající kružnicí. Velikost této kružnice je vypočtena pomocí střední hodnoty z největší a nejmenší vzdálenosti od osy kontejneru, nacházející se v zlomových bodech profilu. Na tuto kružnici jsou dále navázány další odpovídající kružnice zachovávající totožnou šířku héliových mezer, tloušťku palivového koše a vnější průměr kontejneru, viz *Obr. 20* (vpravo).



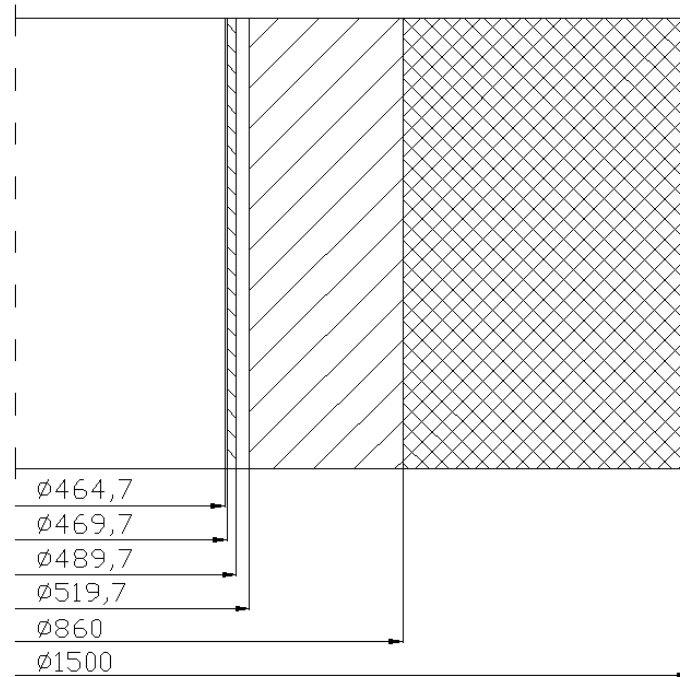
*Obrázek 20 - Skutečný (vlevo) a zjednodušený (vpravo) výpočetní model kontejneru pro analytické řešení*

Skutečné hodnoty průměrů výpočetního modelu pro analytické řešení jsou uvedeny v měřítku na *Obr. 21*, přičemž výška PK je zmenšena na polovinu z důvodu úspory místa. Zde je navíc znázorněna i odpovídající oblast vzduchu v okolí kontejneru, která je uvažována také ve tvaru válce obklopujícího kontejner (dvojitě šrafování). Héliové mezery jsou bez šrafování.

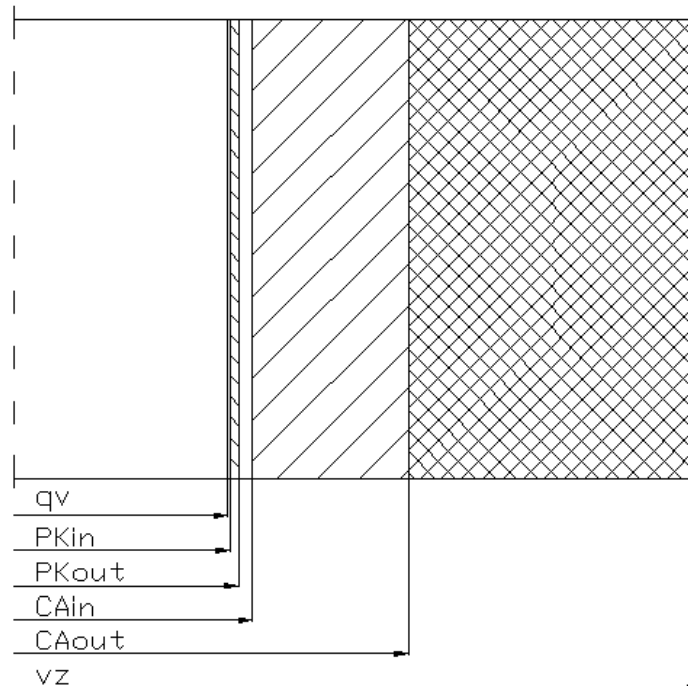
Na *Obr. 22* jsou uvedeny použité indexy na všech rozhraních. Tyto indexy jsou aplikovány na použité veličiny, především na poloměry a teploty, které jsou nejpodstatnější. Dále jsou aplikovány také na součinitele přestupu tepla, které jsou tak dobře identifikovatelné a vždy působí na daném povrchu směrem do tekutiny, čili do malé a velké héliové mezery nebo do

vzduchu. Součinitelé tepelných vodivostí jsou pro tento analytický výpočet uvažovány jako konstanty a použité indexy se vztahují k názvům komponent (palivový koš = PK (nikoliv palivová kazeta), CASTOR = CA).

Dále je tedy uvedeno analytické řešení pro stacionární odvod tepla válcovými stěnami, přičemž odvod tepla z palivových kazet bude realizován třemi různými způsoby.



Obrázek 21 - Osový řez kontejnerem se znázorněním skutečných průměrů PK



Obrázek 22 - Uvedení použitých indexů na jednotlivých rozhraních

## 6.2 Odvod tepla do okolí prostupem

Základní výchozí varianta odvodu tepla z palivových kazet je vypočtena pomocí kombinace přestupu a vedení tepla. Hélium v malé i velké mezeře je uvažováno jako reálná tekutina, kde se přestup tepla mezi povrchy bude realizovat pomocí přirozené konvekce, jejíž princip je vysvětlen v úvodu kapitoly 4. Okolní vzduch je uvažován jako standardní plynná látka se svými přirozenými vlastnostmi, takže teplo je z povrchu kontejneru odváděno taktéž přestupem, přičemž okrajová teplota vzduchu  $T_{vz}$  je konstantní, v čase neměnná. Palivový koš a kontejner jsou uvažovány jako pevné materiály s konstantním součinitelem tepelné vodivosti. Zadané hodnoty:

- poloměry:  $R_{qv}$ ,  $R_{PKin}$ ,  $R_{PKout}$ ,  $R_{CAin}$ ,  $R_{CAout}$ ,  $R_{vz}$
- součinitelé tepelné vodivosti:  $\lambda_{PK}$ ,  $\lambda_{CA}$
- součinitel přestupu tepla:  $\alpha_{qv}$ ,  $\alpha_{PKin}$ ,  $\alpha_{PKout}$ ,  $\alpha_{CAin}$ ,  $\alpha_{CAout}$
- teploty:  $T_{qv}$ ,  $T_{vz}$
- délka modelu:  $L$

Pro určení množství odvedeného tepla z výhřevné plochy do malé héliové mezery je využit již dříve zmíněný Newtonův vztah (10) pro přestup tepla, upravený pro tento konkrétní případ do rovnice (23) a následně upravený do tvaru (24):

$$Q = \alpha_{qv} \cdot (T_{qv} - T_{HeMstř}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_{qv} \cdot L \cdot t \quad (23)$$

$$T_{qv} - T_{HeMstř} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot t} \cdot \frac{1}{\alpha_{qv} \cdot R_{qv}} \quad (24)$$

kde  $T_{HeMstř}$  je střední teplota v malé héliové mezeře daná vztahem:

$$T_{HeMstř} = \frac{T_{qv} + T_{PKin}}{2} \quad (25)$$

Analogicky je možné zapsat rovnici pro přestup tepla z malé héliové mezery do stěny palivového koše:

$$T_{HeMstř} - T_{PKin} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot t} \cdot \frac{1}{\alpha_{PKin} \cdot R_{PKin}} \quad (26)$$

Výpočet množství tepla pro obecný případ vedení tepla ve válcové stěně je dán vztahem:

$$Q = -\lambda \frac{dT}{dr} \cdot S \cdot t = -\lambda \frac{dT}{dr} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot t \quad (27)$$

Tento vztah je upraven a následně integrován:

$$\int dT = -\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L \cdot t} \cdot \int \frac{dr}{r} \quad (28)$$

$$T = -\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L \cdot t} \cdot \ln r + C \quad (29)$$

Po integraci na pravé straně rovnice (29) vznikla integrační konstanta  $C$ , která je odstraněna pomocí vhodně zvolených okrajových podmínek. V tomto případě je vhodné využít okrajovou podmínku I. druhu (11) za předpokladu, že výpočet je proveden pro vedení tepla ve stěně palivového koše ( $\lambda = \lambda_{PK}$ ):

- pro  $r = R_{PKin} \Rightarrow T = T_{PKin}$

$$T_{PKin} = -\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{PK} \cdot L \cdot t} \cdot \ln R_{PKin} + C \quad (30)$$

- pro  $r = R_{PKout} \Rightarrow T = T_{PKout}$

$$T_{PKout} = -\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{PK} \cdot L \cdot t} \cdot \ln R_{PKout} + C \quad (31)$$

Odečtením rovnice (31) od rovnice (30) vznikne:

$$T_{PKin} - T_{PKout} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot t} \cdot \frac{1}{\lambda_{PK}} \ln \left( \frac{R_{PKout}}{R_{PKin}} \right) \quad (32)$$

Analogicky dle rovnice (24) pro výpočet přestupu tepla a dle rovnice (32) pro výpočet vedení tepla je možné stanovit další potřebné vztahy pro kompletní výpočet odvodu tepla z kontejneru. V případě vedení tepla je nutné vhodně definovat okrajové podmínky I. druhu. Další potřebné rovnice jsou tedy pro:

- přestup tepla ze stěny palivového koše do velké heliové mezery:

$$T_{PKout} - T_{HeVstř} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot t} \cdot \frac{1}{\alpha_{PKout} \cdot R_{PKout}} \quad (33)$$

- přestup tepla z velké heliové mezery do stěny CASTORu:

$$T_{HeVstř} - T_{CAin} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot t} \cdot \frac{1}{\alpha_{CAin} \cdot R_{CAin}} \quad (34)$$

- vedení tepla ve stěně CASTORu:

$$T_{CAin} - T_{CAout} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot t} \cdot \frac{1}{\lambda_{CA}} \ln \left( \frac{R_{CAout}}{R_{CAin}} \right) \quad (35)$$

- přestup tepla ze stěny CASTORu do okolního vzduchu:

$$T_{CAout} - T_{vz} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot t} \cdot \frac{1}{\alpha_{CAout} \cdot R_{CAout}} \quad (36)$$

kde  $T_{HeVstř}$  je střední teplota ve velké heliové mezeře určená analogicky jako v případě malé heliové mezery dle vztahu (25). Tímto způsobem byla vytvořena soustava rovnic (24), (26) a (32) až (36) popisující teplotní pole napříč celým kontejnerem. Vzájemným odečtením těchto rovnic je získán vztah:

$$T_{qv} - T_{vz} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot t} \cdot K_p \quad (37)$$

$$K_p = \frac{1}{\alpha_{qv} \cdot R_{qv}} + \frac{1}{\alpha_{PKin} \cdot R_{PKin}} + \frac{1}{\lambda_{PK}} \ln \left( \frac{R_{PKout}}{R_{PKin}} \right) + \frac{1}{\alpha_{PKout} \cdot R_{PKout}} + \frac{1}{\alpha_{CAin} \cdot R_{CAin}} + \frac{1}{\lambda_{CA}} \ln \left( \frac{R_{CAout}}{R_{CAin}} \right) + \frac{1}{\alpha_{CAout} \cdot R_{CAout}} \quad (38)$$

$K_p$  je celkový součinitel odporu stěn při odvodu tepla přestupem a vedením do okolí. Obecně je v energetice mnohem známější a používanější tzv. součinitel prostupu tepla  $K$ , který je jen převrácenou hodnotou součinitele  $K_p$ . Pro případy vedení tepla v kombinaci s přestupem je zaveden souhrnný termín známý jako prostup tepla, k němuž se součinitel  $K$  vztahuje. Aplikací součinitele prostupu tepla  $K$  do rovnice (37) a následnou její úpravou je vyjádřen vztah pro množství odvedeného tepla s indexem 1 z důvodu jednoznačného označení (39):

$$Q_1 = K \cdot (T_{qv} - T_{vz}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot t \quad (39)$$

Po odvození vztahu (39) a určení množství odvedeného tepla jsou známy všechny potřebné veličiny pro provedení výpočtu teploty na vnějším povrchu kontejneru pomocí upraveného vztahu (36):

$$T_{CAout} = T_{vz} + \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot t} \cdot \frac{1}{\alpha_{CAout} \cdot R_{CAout}} \quad (40)$$

### 6.2.1 Určení součinitele přestupu tepla na povrchu kontejneru

Správné stanovení tohoto součinitele je velice důležité, neboť on udává intenzitu přestupu tepla na rozhraní mezi pevnou látkou a okolní tekutinou, takže čím vyšší součinitel je, tím intenzivnější je i přestup tepla. Jelikož ve výpočtu součinitele přestupu tepla vystupuje mnoho ovlivňujících faktorů, jako jsou fyzikální vlastnosti tekutiny, charakter proudění, ale i geometrický tvar, tak není možné ve všech případech provést výpočet součinitele pokaždé stejným způsobem a je nemožné uvést univerzální rovnici pro jeho výpočet. Respektováním výše uvedeného byla alespoň stanovena rovnice popisující proces sdílení tepla konvekcí a nazývá se obecná kritériální rovnice sdílení tepla konvekcí (41), přičemž Nusseltovo kritérium podobnosti je jediné, z kterého je možné vypočítat součinitel přestupu tepla:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr, Fo, Po, \xi_x, \xi_y, \xi_z) \quad (41)$$

Ve vztahu (41) jsou ve sledu uvedena tyto kritéria podobnosti: Reynoldsovo, Grashoffovo, Prandtlovo, Fourierovo a Pomeranceovo.  $\xi_x, \xi_y, \xi_z$  jsou bezrozměrné souřadnice. Kritérium podobnosti je bezrozměrný zlomek, který seskupuje geometrické, kinematické a fyzikální veličiny a má hlubší fyzikální význam. Za předpokladu, že je Nusseltovo kritérium na povrchu konstantní, je rovnice (41) zjednodušena na tvar (42). Při přirozeném proudění má Grashoffovo kritérium silně převažující význam a obecná kritériální rovnice je tak ještě zjednodušena na vztah (43):

$$Nu = f(Re, Gr, Pr, Fo, Po) \quad (42)$$



$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (43)$$

Nusseltovo kritérium pro případ vertikální stěny je určeno následovně:

$$Nu = 0,135(Gr, Pr)^{\frac{1}{3}} \quad (44)$$

Vztah (44) lze použít pouze v případě, že je splněna následující podmínka:

$$\frac{d}{L} = \frac{35}{Gr^{\frac{1}{4}}} \quad (45)$$

Grashoffovo kritérium zahrnuje vliv přirozené konvekce reálné tekutiny a určí se ze vztahu:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{CAout} - T_{vz}) \cdot L^3}{\nu^2} \quad (46)$$

kde  $g$  je gravitační zrychlení,  $\beta$  je teplotní součinitel objemové roztažnosti (pro ideální plyn je  $\beta = 1/T$ ),  $L$  je charakteristický rozměr (v tomto případě výška kontejneru) a  $\nu$  je součinitel kinematické viskozity dané reálné tekutiny.

Matematický zápis Prandtlova kritéria je poněkud jednodušší a vyjadřuje sdílení tepla v tekutinách:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (47)$$

kde  $a$  je součinitel teplotové vodivosti definovaný takto:

$$a = \frac{\lambda_{vz}}{\rho \cdot c_p} \quad (48)$$

Nyní jsou známy všechny hodnoty veličin potřebné pro určení hodnoty Nusseltova kritéria a je tak možné vypočítat součinitel přestupu tepla na vnějším povrchu kontejneru z následujícího vztahu:

$$\alpha_{CAout} = \frac{Nu \cdot \lambda_{vz}}{L} \quad (49)$$

Tímto způsobem lze postupovat v případě, že jsou látkové vlastnosti tekutiny konstantní. Nicméně je vhodné doplnit možnost, když by tyto vlastnosti byly uvažovány jako proměnné v závislosti na teplotě. Pak by byla zavedena tzv. definiční teplota daná vztahem:

$$T_{def} = \frac{T_{CAout} - T_{vz}}{2} \quad (50)$$

což je střední hodnota mezi teplotou na povrchu kontejneru a teplotou okolního vzduchu. Poté by byly všechny veličiny obsažené ve vztazích pro výpočet součinitele přestupu tepla vztaheny právě k této definiční teplotě.

### 6.3 Odvod tepla do okolí vedením

V tomto případě je odvod tepla z kontejneru uvažován v celém rozsahu čistě vedením. Hlavní změnou oproti předchozí variantě výpočtu pomocí prostupu tepla je tedy nahrazení héliových mezer neznámou fiktivní pevnou látkou tak, aby přestupy tepla vlivem přirozené konvekce byly ekvivalentně nahrazeny vedením tepla právě v této fiktivní pevné látce. Tento fiktivní materiál bude nalezen během numerického výpočtu, což je jeden z cílů této práce. Okolní látka je opět vzduch se svými přirozenými fyzikálními vlastnostmi, avšak bude uvažován jako pevná látka umožňující vedení tepla s konstantním součinitelem tepelné vodivosti a bude známa jeho teplota  $T_{vz}$ , která je v čase konstantní. Zadáno:

- poloměry:  $R_{qv}$ ,  $R_{PKin}$ ,  $R_{PKout}$ ,  $R_{CAin}$ ,  $R_{CAout}$ ,  $R_{vz}$
- součinitelé tepelné vodivosti:  $\lambda_{FM}$ ,  $\lambda_{PK}$ ,  $\lambda_{CA}$ ,  $\lambda_{vz}$
- teploty:  $T_{qv}$ ,  $T_{vz}$
- délka modelu:  $L$

Rovnice vedení tepla jsou vytvořeny opět analogicky podle kterékoliv předchozí rovnice popisující vedení tepla s aplikací odpovídajících okrajových podmínek I. druhu. Pro tento případ odvodu tepla bude odvozena následující soustava rovnic:

- vedení tepla v malé mezeře nahrazené pevným fiktivním materiálem:

$$T_{qv} - T_{PKin} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot t} \cdot \frac{1}{\lambda_{FM}} \ln \left( \frac{R_{PKin}}{R_{qv}} \right) \quad (51)$$

- vedení tepla ve stěně palivového koše:

$$T_{PKin} - T_{PKout} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot t} \cdot \frac{1}{\lambda_{PK}} \ln \left( \frac{R_{PKout}}{R_{PKin}} \right) \quad (52)$$

- vedení tepla ve velké mezeře nahrazené pevným fiktivním materiálem:

$$T_{PKout} - T_{CAin} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot t} \cdot \frac{1}{\lambda_{FM}} \ln \left( \frac{R_{CAin}}{R_{PKout}} \right) \quad (53)$$

- vedení tepla ve stěně CASTORu:

$$T_{CAin} - T_{CAout} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot t} \cdot \frac{1}{\lambda_{CA}} \ln \left( \frac{R_{CAout}}{R_{CAin}} \right) \quad (54)$$

- vedení tepla v uvažované vzduchové stěně :

$$T_{CAout} - T_{vz} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot t} \cdot \frac{1}{\lambda_{vz}} \ln \left( \frac{R_{vz}}{R_{CAout}} \right) \quad (55)$$

Pro získání požadovaného výsledku budou rovnice (51) až (55) od sebe odečteny a následnou úpravou tak získána rovnice:

$$T_{qv} - T_{vz} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot t} \cdot K_v \quad (56)$$

kde  $K_v$  je celkový součinitel odporu stěn při vedení tepla:

$$K_v = \frac{1}{\lambda_{FM}} \ln \left( \frac{R_{PKin}}{R_{qV}} \right) + \frac{1}{\lambda_{PK}} \ln \left( \frac{R_{PKout}}{R_{PKin}} \right) + \frac{1}{\lambda_{FM}} \ln \left( \frac{R_{CAin}}{R_{PKout}} \right) + \frac{1}{\lambda_{CA}} \ln \left( \frac{R_{CAout}}{R_{CAin}} \right) + \frac{1}{\lambda_{vz}} \ln \left( \frac{R_{vz}}{R_{CAout}} \right) \quad (57)$$

Výsledný vztah udávající množství odvedeného tepla čistě vedením je získán pouze úpravou rovnice (56) do tvaru (58). Z důvodu lepší přehlednosti bude množství odvedeného tepla při uvažování vedení značeno s indexem 2:

$$Q_2 = \frac{(T_{qv} - T_{vz}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot t}{K_v} \quad (58)$$

Pokud je nahrazení hélia fiktivním pevným materiálem provedeno správně, měla by množství odvedeného tepla  $Q_1$  a  $Q_2$  být přibližně stejná.

Z rovnice (55), a za předpokladu, že je již známo množství odvedeného tepla vedením  $Q_2$ , je opět možné určit teplotu na vnějším povrchu kontejneru:

$$T_{CAout} = T_{vz} + \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot t} \cdot \frac{1}{\lambda_{vz}} \ln \left( \frac{R_{vz}}{R_{CAout}} \right) \quad (59)$$

Obdobným způsobem je možné zpětně vypočítat teploty na všech daných rozhraních z rovnic (51) až (54).

#### 6.4 Odvod tepla do okolí vedením a sáláním

V této poslední variantě je výpočet proveden opět pomocí vedení tepla s využitím fiktivního pevného materiálu jako v předchozím případě, ale s tím rozdílem, že okolní vzduch je uvažován jako plynná látka, obdobně jako v případě odvodu tepla prostupem, přičemž teplo není z povrchu kontejneru odváděno přestupem, nýbrž pouze sáláním do okolního vzduchu. Je zaveden předpoklad, že oproti předchozím případům odvodu tepla jsou navíc známé hodnoty poměrné sálavosti  $\varepsilon$  a součinitele sálání dokonale černého tělesa  $C_0$ . Zadáno:

- poloměry:  $R_{qv}$ ,  $R_{PKin}$ ,  $R_{PKout}$ ,  $R_{CAin}$ ,  $R_{CAout}$ ,  $R_{vz}$
- součinitelé tepelné vodivosti:  $\lambda_{FM}$ ,  $\lambda_{PK}$ ,  $\lambda_{CA}$
- poměrná sálavost:  $\varepsilon$
- součinitel sálání dokonale černého tělesa:  $C_0$
- teploty:  $T_{qv}$ ,  $T_{vz}$
- délka modelu:  $L$

Sálání je proces, při kterém je energie uvolňována pomocí elektromagnetického záření, které pro přenos tepla nepotřebuje žádné médium, může se tedy šířit i ve vakuu. Nicméně v tomto případě sálá povrch kontejneru do okolního vzduchu a množství odvedeného tepla s indexem 3 je tak dáno vztahem:

$$Q_3 = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{T_{CAout}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{vz}}{100} \right)^4 \right] \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_{CAout} \cdot L \cdot t \quad (60)$$

Ze vztahu (60) je možné opět vyjádřit teplotní rozdíl obdobně jako v rovnici (55) a stejně jako při odvodu tepla vedením využít rovnice (51) až (54), nicméně po úpravě vztahu (60) by vznikla na pravé straně čtvrtá odmocnina množství odvedeného tepla. Takový vztah by byl jen velice těžko slučitelný se vztahy (51) až (54), jak bylo provedeno v předchozích případech, a proto bude zavedeno řešení s využitím okrajové podmínky V. druhu (15). Tato podmínka udává rovnost měrných tepelných toků na daném rozhraní, přičemž jeden měrný tepelný tok je realizován vedením a druhý sáláním:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=-0} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^4 \Big|_{n=0} - \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 \right] \quad (15)$$

Vhodným rozšířením této okrajové podmínky (vynásobením příslušnou plochou  $S$  a časem  $t$ ) jsou měrné tepelné toky jednoduše převedeny na množství tepla, přičemž množství tepla na straně sálání je dáno vztahem (60) a množství tepla na straně vedení je možné určit právě z rovnic (51) až (54) jejich vzájemným odečtením. Následnou matematickou úpravou vznikne vztah:

$$Q_3 = \frac{(T_{qv} - T_{CAout}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot t}{K_s} \quad (61)$$

kde  $K_s$  je celkový součinitel odporu stěn, mimo vzduchové, při vedení tepla:

$$K_s = \frac{1}{\lambda_{FM}} \ln \left( \frac{R_{PKin}}{R_{qv}} \right) + \frac{1}{\lambda_{PK}} \ln \left( \frac{R_{PKout}}{R_{PKin}} \right) + \frac{1}{\lambda_{FM}} \ln \left( \frac{R_{CAin}}{R_{PKout}} \right) + \frac{1}{\lambda_{CA}} \ln \left( \frac{R_{CAout}}{R_{CAin}} \right) \quad (62)$$

Dosazením vztahů (60) a (61) do rozšířené okrajové podmínky V. druhu je získán vztah:

$$\frac{(T_{qv} - T_{CAout}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot t}{K_s} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{T_{CAout}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{vz}}{100} \right)^4 \right] \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_{CAout} \cdot L \cdot t \quad (63)$$

Z rovnice (63) je možné, i když velmi složitě, vypočítat teplotu vnějšího povrchu  $T_{CAout}$  a následně ji zpětně dosadit do vztahu (60) pro výpočet množství odvedeného tepla z povrchu sáláním.

## 6.5 Výpočet teploty v závislosti na poloměru ve stěně kontejneru

Pro určení této závislosti je teplo odváděno z povrchu kontejneru přestupem do okolního vzduchu. Základním výchozím vztahem je již dříve odvozená Fourier-Kirchhoffova rovnice stacionárního vedení tepla s vnitřním zdrojem (16). Jelikož se ale jedná o zjištění závislosti ve stěně kontejneru, kde se již vnitřní zdroj nevyskytuje, bude vztah dále zjednodušen na tvar (64) vynecháním měrného vnitřního zdroje tepla:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (64)$$

Dvojnásobnou integrací vztahu (64) vznikne (66):

$$dT = \frac{C_1}{r} dr \quad (65)$$

$$T(r) = C_1 \cdot \ln r + C_2 \quad (66)$$

Integrační konstanty  $C_1$  a  $C_2$  jsou určeny pomocí okrajových podmínek. Konstanta  $C_1$  je určena pomocí Fourierovy okrajové podmínky III. druhu (13), která je aplikovaná na stěnu kontejneru:

$$-\lambda_{CA} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_{CAout}} = \alpha_{CAout} \cdot (T_{CAout} - T_{vz}) \quad (67)$$

Úpravou vztahu (65) a jeho dosazením do rovnice (67) vznikne:

$$-\lambda_{CA} \frac{C_1}{R_{CAout}} = \alpha_{CAout} \cdot (T_{CAout} - T_{vz}) \quad (68)$$

Jednoduchou matematickou úpravou je určena konstanta  $C_1$ :

$$C_1 = -\frac{R_{CAout} \cdot \alpha_{CAout}}{\lambda_{CA}} \cdot (T_{CAout} - T_{vz}) \quad (69)$$

Konstanta  $C_1$  je dosazena zpět do rovnice (66):

$$T(r) = C_2 - \frac{R_{CAout} \cdot \alpha_{CAout}}{\lambda_{CA}} \cdot (T_{CAout} - T_{vz}) \cdot \ln r \quad (70)$$

Konstanta  $C_2$  je určena z Dirichtetovy okrajové podmínky I. druhu (11):

$$T|_{r=R_{CAin}} = T_{CAin} \quad (71)$$

Tato podmínka je aplikována do vztahu (70) a vznikne:

$$T_{CAin} = C_2 - \frac{R_{CAout} \cdot \alpha_{CAout}}{\lambda_{CA}} \cdot (T_{CAout} - T_{vz}) \cdot \ln R_{CAin} \quad (72)$$

Opět jednoduchými matematickými operacemi je vyjádřena konstanta  $C_2$ :

$$C_2 = T_{CAin} + \frac{R_{CAout} \cdot \alpha_{CAout}}{\lambda_{CA}} \cdot (T_{CAout} - T_{vz}) \cdot \ln R_{CAin} \quad (73)$$

Konstanta  $C_2$  je dosazena do vztahu (70) a následnou úpravou je vyjádřena závislost teploty na poloměru ve stěně kontejneru (75):

$$T(r) = T_{CAin} + \frac{R_{CAout} \cdot \alpha_{CAout}}{\lambda_{CA}} \cdot (T_{CAout} - T_{vz}) \cdot \ln R_{CAin} - \frac{R_{CAout} \cdot \alpha_{CAout}}{\lambda_{CA}} \cdot (T_{CAout} - T_{vz}) \cdot \ln r \quad (74)$$

$$T(r) = T_{CAin} + \frac{R_{CAout} \cdot \alpha_{CAout}}{\lambda_{CA}} \cdot (T_{CAout} - T_{vz}) \cdot \ln \left( \frac{R_{CAin}}{r} \right) \quad (75)$$

Analogickým způsobem, při použití vhodných okrajových podmínek, by bylo možné ze vztahu (66) určit teplotní závislost i ve zbývajících stěnách.

## 7 Základy numerického výpočtu a příprava modelu

Numerický výpočet odvodu tepla z kontejneru do okolí je proveden dle zadání pomocí výpočetního prostředí Fluent, který je jednou ze součástí systému Ansys, využívající CFD simulaci. Největší předností numerického výpočtu je zjištění konkrétních číselných hodnot při určování teplotního pole v určitém prostoru. Pro úspěšné provedení výpočtu je ovšem nutné znát hodnoty vstupujících veličin, v opačném případě není možné relevantní výpočet provést.

V této kapitole budou dále popsány hlavní oblasti, které jsou potřebné pro úspěšné zvládnutí daného numerického výpočtu. Jedná se zejména o přiblížení principu CFD simulace, tvorbu vlastního výpočetního modelu a generování výpočetní sítě.

### 7.1 CFD simulace

*„CFD (Computational Fluid Dynamics - výpočet dynamiky tekutin) je počítačová simulace procesů v mechanice tekutin a ve sdílení tepla, která využívá základních transportních a stavových rovnic mechaniky tekutin.“ [12]*

Základním principem CFD simulace je diskretizace diferenciálních nebo integrálních rovnic na rovnice algebraické. Cílem řešení těchto rovnic je určení proměnných, nacházejících se v konečném počtu kontrolních objemů, které jsou definovány pomocí výpočetní sítě.

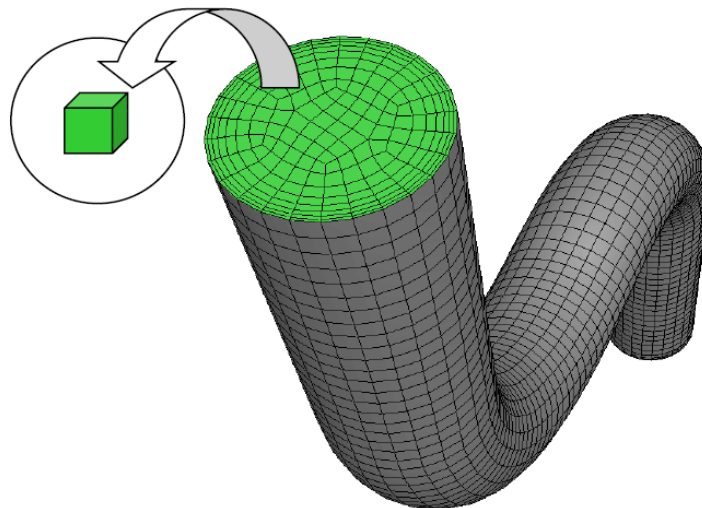
Pro úspěšné zvládnutí CFD simulace a získání výsledků je nutné provést tyto základní úkony rozdělené do třech na sebe navazujících kategorií:

- a) Pre-processing
  - vytvoření zadané geometrie výpočetního modelu
  - vygenerování dostatečně jemné výpočetní sítě
  - definování okrajových podmínek
- b) Processing
  - automatická kontrola bezchybnosti výpočtové sítě
  - výběr vhodných matematických modelů
  - výběr potřebných materiálů a případné definování vlastního materiálu
  - přiřazení vybraných materiálů k jednotlivým objemům výpočetního modelu
  - nastavení konkrétních hodnot okrajových podmínek
  - nastavení inicializačních parametrů
  - nastavení hodnoty residuálů a počtu iterací
  - vlastní numerické řešení
- c) Post-processing
  - zobrazení žádaných hodnot na přesně definovaných pozicích (např. tepelný tok, teploty, ...)
  - vizualizace skalárních veličin (teploty, tlaky, ...)
  - tvorba vektorových polí (v tomto případě při výpočtu přirozené konvekce)
  - případná tvorba grafů a animací

V současné době jsou nejen CFD simulace, ale i ostatní simulace, stále více využívány a jsou tak částečně nahrazovány experimentální metody. Hlavní výhodou simulací je jejich mnohem nižší nákladnost a časová náročnost oproti skutečným experimentům, nicméně i reálné experimenty mají v některých oblastech nezastupitelnou úlohu.

### 7.1.1 Výpočetní prostředí Fluent a FVM

Fluent je výpočetní software pro řešení 2D i 3D simulací týkajících se proudění tekutin, sdílení tepla a spalovacích procesů. Dle zadání jsou numerické výpočty provedeny právě ve výpočetním prostředí Fluent, který pro numerické řešení využívá princip metody konečných objemů (Finite Volume Method - FVM). Podstata této metody je v rozdělení výpočetního modelu na konečný počet menších nepřekrývajících se kontrolních objemů pomocí objemové výpočetní sítě, viz *Obr. 23*, přičemž soustava výpočetních rovnic je použita pro každý objem samostatně. Výsledkem jsou žádané hodnoty skalárních a vektorových veličin získané ve středu vytvořených kontrolních objemů nebo v okrajových plochách.



Obrázek 23 - Grafická ilustrace metody konečných objemů

### 7.1.2 Definice řešeného výpočetního modelu

Z hlediska času:

- stacionární model - jelikož se zbytkový vývin tepla z palivových kazet uložených v kontejneru v čase mění jen velmi málo, je možné tento proces považovat za stacionární a ustálený výsledek je získán jen volbou dostatečného počtu iterací

Z hlediska prostoru:

- 3D model - dle zadání, jelikož na 2D modelu by nebylo možné nasimulovat přirozenou konvekci v héliových mezerách a realizovat tak přestup tepla

Z hlediska bilancování veličin:

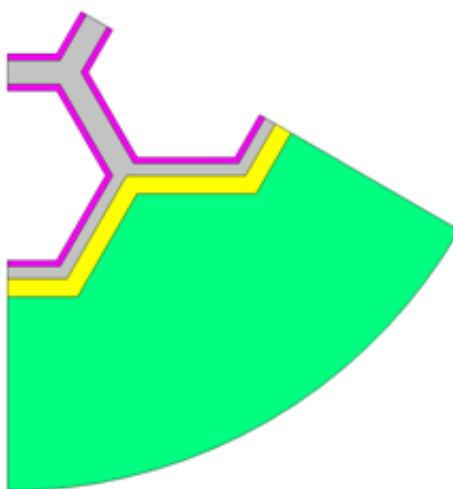
- anizotermický model - pro výpočet je použita energetická rovnice, cílem výpočtů je znát parametry přímo související s teplotou včetně teploty samotné v daných místech

## 7.2 Tvorba výpočetního modelu

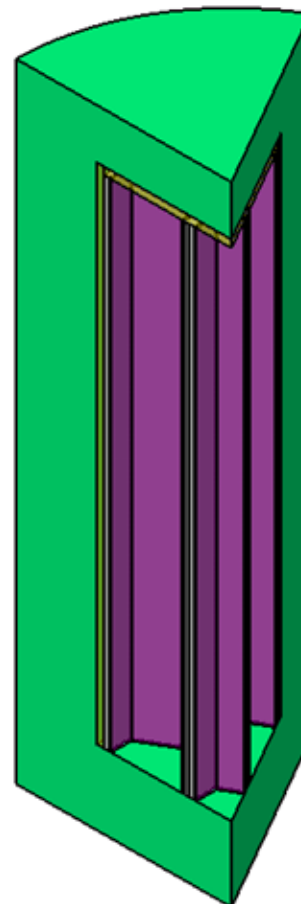
Pro uskutečnění numerického výpočtu byl vytvořen a v kapitole 5 popsán geometrický model vytvořený v modelářském prostředí Catia. I přes výrazné zjednodušení geometrie kontejneru oproti realizovaným konstrukcím by výpočet aplikovaný na celý geometrický model probíhal relativně dlouho. Nicméně v tomto případě je možné využít symetrie profilu kontejneru, což výrazně sníží čas potřebný pro výpočet. Výpočetní model je tedy vhodně zjednodušen na pouhou 1/6 profilu, viz *Obr. 24*. Zásadní podmínkou pro aplikaci této úpravy je okrajová podmínka symetrie a totožná výpočtová síť na bočních plochách zjednodušeného profilu. Takto symetricky zmenšený výpočetní model pouze na kruhovou výseč o úhlové velikosti 60° je dále ještě upraven odstraněním horního a spodního víka a horní héliové mezery. Cílem tohoto kroku je zjednodušit tvorbu výpočetní sítě a stanovit tak stejný tvar výpočetního modelu v příčném průřezu v celé jeho délce, viz *Obr. 25*.

Nicméně během tvorby výpočetní sítě se s tímto modelem z Catie objevily komplikace, zejména při zjemňování sítě v určitých místech modelu pro dosažení přesnějších výsledků a návaznosti kontrolních objemů přes hranice jednotlivých komponent. Tento původní model je vytvořen modelováním jednotlivých komponent jako celků, viz *Obr. 25*:

- malá héliová mezera (fialově) = 1 díl
- palivový koš (šedivě) = 1 díl
- velká héliová mezera (žlutě) = 1 díl
- kontejner (zeleně) = 1 díl



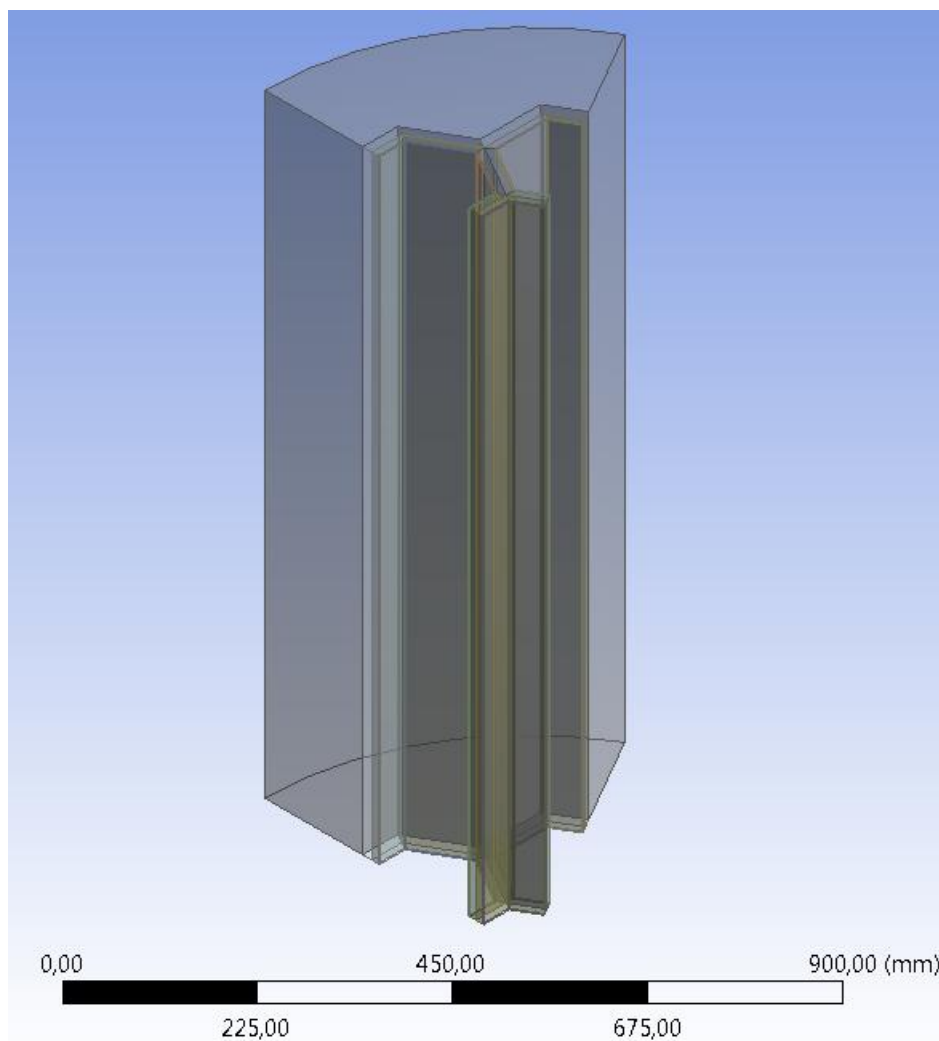
Obrázek 25 - Příčný průřez výpočetním modelem z Catie



Obrázek 24 - Výpočetní model vytvořený v Catii



Návrh řešení tohoto problému, který se vyskytl během generování výpočetní sítě, spočíval ve vhodném rozdělení jednotlivých dílu modelu na menší části. Jelikož by byla úprava už takto vytvořeného modelu náročná a mohla by vést k výskytu chyb, byla jako jednodušší varianta zvolena tvorba nového výpočetního modelu, ale se zachováním původních geometrických parametrů popsaných v předchozích kapitolách. Nový výpočetní model nebyl vytvořen znovu v Catii, ale už v modelářském prostředí DesignModeler, jenž je součástí systému Ansys, přímo bez horního a spodního víka a horní héliové mezery, tedy ve své finální podobě, viz *Obr. 26*. Na obrázku je pro lepší názornost rozměrů modelu zobrazeno i odpovídající měřítko modelu.

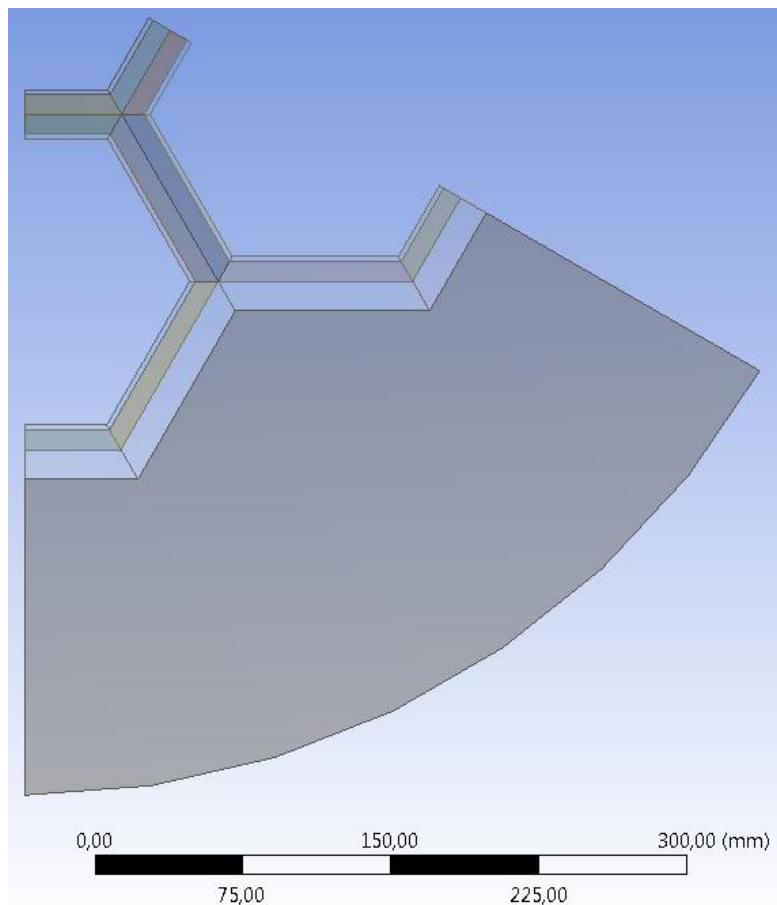


*Obrázek 26 - Finální výpočetní model pro numerické řešení vytvořený v DesingModeleru*

Na příčném průřezu finálního modelu je ukázáno a přibliženo již zmíněné rozdělení jednotlivých dílu na menší části, viz *Obr. 27*. Dělení bylo následující:

- malá héliová mezera = 10 částí
- palivový koš = 10 částí
- velká héliová mezera = 4 částí
- kontejner = 1 díl (nezměněno)

Celkem je tedy potřeba pro vytvoření tohoto modelu nakreslit a objemově vytáhnout 25 částí. Vytvořené hranice jsou zřejmé a poskytují možnost výraznějšího ovlivnění generované sítě do požadované struktury.



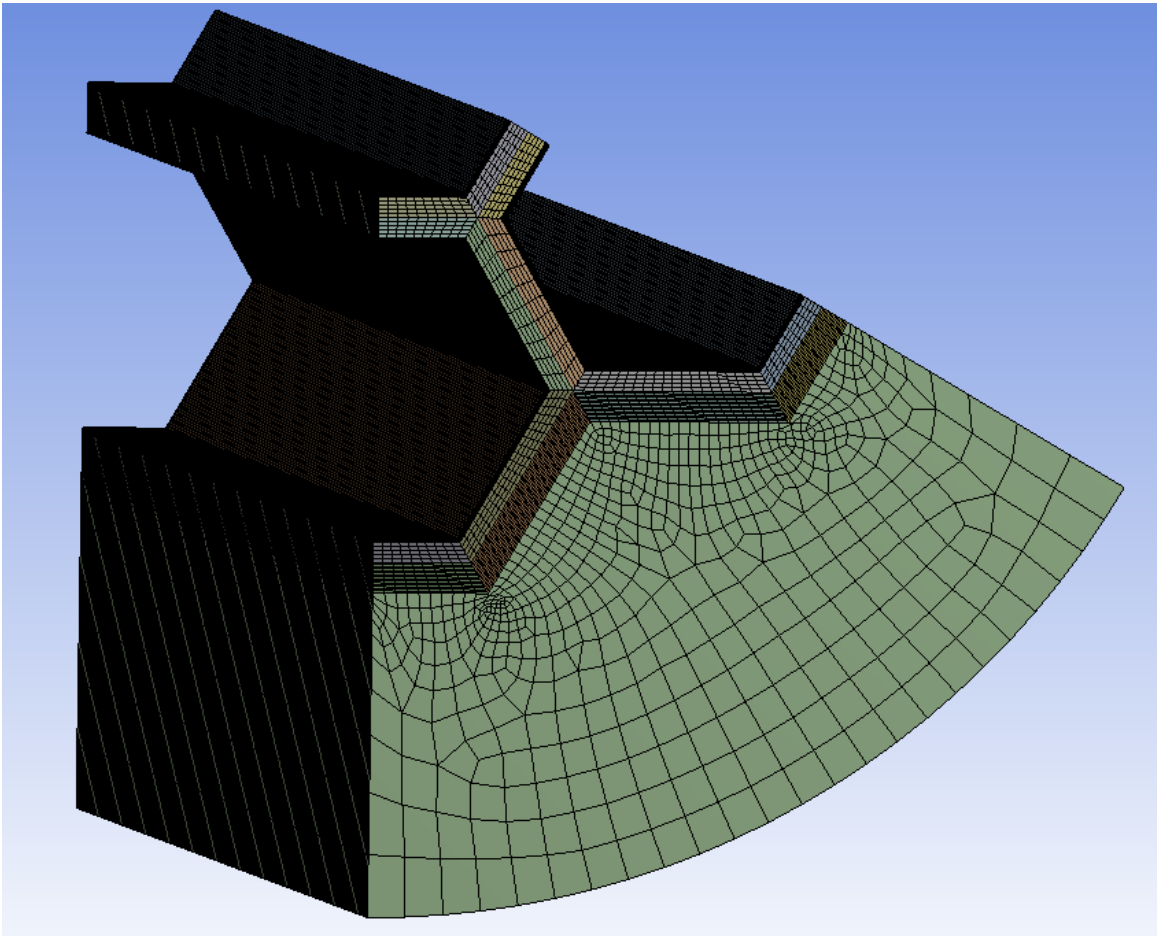
Obrázek 27 - Příčný průřez finálního výpočetního modelu se znázorněním rozdělení jednotlivých dílů

### 7.3 Tvorba výpočetní sítě

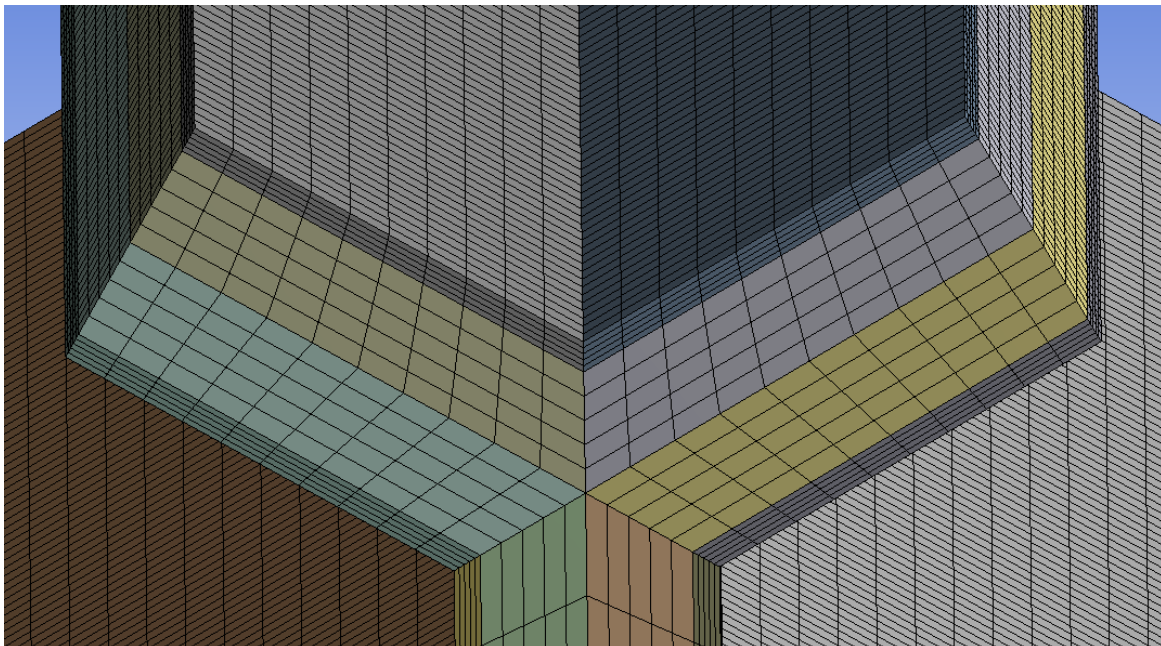
Výpočetní síť je vytvořena v systému Ansys, konkrétně v prostředí Meshing. Nejvhodnější metodou pro vytvoření objemové sítě na tento model byla zvolena metoda Sweep, která spočívá v roztažení plošné sítě od definované počáteční plochy směrem k cílové ploše se zadaným pevným počtem buněk po tažené délce. Parametry vlastní povrchové sítě tak jsou definovány pouze na počáteční ploše a do objemu je tato povrchová síť vygenerována právě pomocí metody Sweep. Výpočetní model je pomocí objemové sítě rozdělen na 536 600 kontrolních objemů.

Plošná síť na čelní počáteční ploše je nastavena ručním zadáváním vhodného počtu elementů na jednotlivé hrany podle potřeby dosažení požadované jemnosti sítě. Některé jednotlivě vymodelované sousedící části, dávající dohromady 1 díl (např. velká héliová mezera skládající se ze 4 částí), jsou seskupeny z důvodu lepší návaznosti výpočetní sítě mezi jednotlivými částmi. Výsledná objemová síť je tak tvořena převážně pravidelnými šestistěny, především v menších dílech mimo vlastní stěnu kontejneru, kde je v některých oblastech vygenerovaná síť tvořena i nepravidelnými čtyřstěny, viz *Obr. 28*.

Na *Obr. 29* je zobrazen detail výpočetní sítě v místě palivového koše a malé héliové mezery. Zde je vidět pravidelná plošná struktura sítě včetně jejího požadovaného zjemnění v malé héliové mezeře. Výpočetní model o délce 1 m je rozdělen na 200 elementů po 5 mm.



*Obrázek 28 - Izometrický pohled na vygenerovanou objemovou síť na výpočetním modelu*



*Obrázek 29 - Detail výpočetní sítě v místě palivového koše a malé héliové mezery*

## 8 Vlastní numerický výpočet variant odvodu tepla

V této kapitole je především popsán postup vlastního numerického výpočtu odvodu tepla z kontejneru zadanými variantami, které jsou stejné jako během analytického řešení (prostup, vedení, vedení a sálání). Popisu vlastního výpočtu předchází stručný popis definování výchozích parametrů, které během jednotlivých variant zůstanou nezměněny a jsou platné pro všechny provedené výpočty.

### 8.1 Nastavení základních neměnných parametrů výpočtů

Základním předpokladem pro začátek nastavování vlastního výpočtu je úspěšné načtení výpočetního modelu včetně výpočetní objemové sítě. Pokud je vše v pořádku, standardně by se po spuštění Fluentu neměla objevit žádná chyba. Automatická kontrola sítě je provedena tlačítkem *Check* v hlavní záložce Fluentu. V případě úspěšné kontroly je vše připraveno pro nastavení a kontrolu parametrů výpočtu. Následující parametry budou nastaveny na počátku prvotního výpočtu a zůstanou nezměněny během všech následujících výpočtů:

- jak už bylo zmíněno v analytickém řešení, výpočet bude uvažován jako stacionární děj
- matematické modely - v tomto případě je uvažován laminární viskózní model a samozřejmě je použito energetické rovnice
- pro koš je ve všech výpočtech uvažován jako materiál hliník a pro kontejner ocel, tyto materiály jsou použity se standardně zavedenými hodnotami vlastností z databáze Fluentu
- okrajová podmínka na výhřevné ploše - objemový zdroj tepla je trvale nahrazen konstantní hodnotou teploty 250 °C (523,15 K) na této výhřevné ploše

Další parametry, především okrajová podmínka na vnějším povrchu kontejneru, se během jednotlivých výpočtů mění a jsou specifikovány v dalším textu.

### 8.2 Výpočet odvodu tepla prostupem

Výpočet odvodu tepla prostupem je složen z těchto tepelných procesů v následujícím sledu od osy kontejneru:

- přestup tepla z výhřevné plochy do malé héliové mezery
- přestup tepla z malé héliové mezery do stěny palivového koše
- vedení tepla ve stěně palivového koše
- přestup tepla ze stěny palivového koše do velké héliové mezery
- přestup tepla z velké héliové mezery do stěny kontejneru
- vedení tepla ve stěně kontejneru
- přestup tepla ze stěny kontejneru do okolního prostředí

Přestup tepla v héliových mezerách je realizován pomocí přirozené konvekce, která je vyvolána změnou hustoty hélia v závislosti na změně jeho teploty. Samozřejmě je tedy působení gravitačního zrychlení, jinak by tento proces nefungoval. Tato závislost je přímo zadána do materiálových vlastností hélia. Z výše uvedeného tedy jasně plyne, že v mezerách

je jako materiál uvažováno plynné hélium. Tento fakt je zdůrazněn z důvodu, že v dalších variantách výpočtu odvodu tepla už v těchto mezerách hélium nebude. Konkrétní zadaná závislost hustoty hélia na teplotě je uvedena v následující podkapitole.

Dalším velmi důležitým parametrem, zřejmě nejpodstatnějším, je nastavení okrajové podmínky na vnějším povrchu kontejneru. Nejpodstatnější je způsob, kterým je teplo z této plochy odváděno a jak již bylo uvedeno výše, je zde v tomto výpočtu aplikován přestup tepla do okolí. Pro aplikaci této podmínky je potřeba znát teplotu okolního prostředí a součinitel přestupu tepla na povrchu kontejneru. Teplota okolního prostředí je zadána na konstantní hodnotu 38°C (311,15 K). Součinitel přestupu tepla je z důvodu získání přesnějších výsledků zadán pomocí funkční závislosti na teplotě. Tato závislost je obdobně jako závislost hustoty hélia na teplotě uvedena v dalším textu.

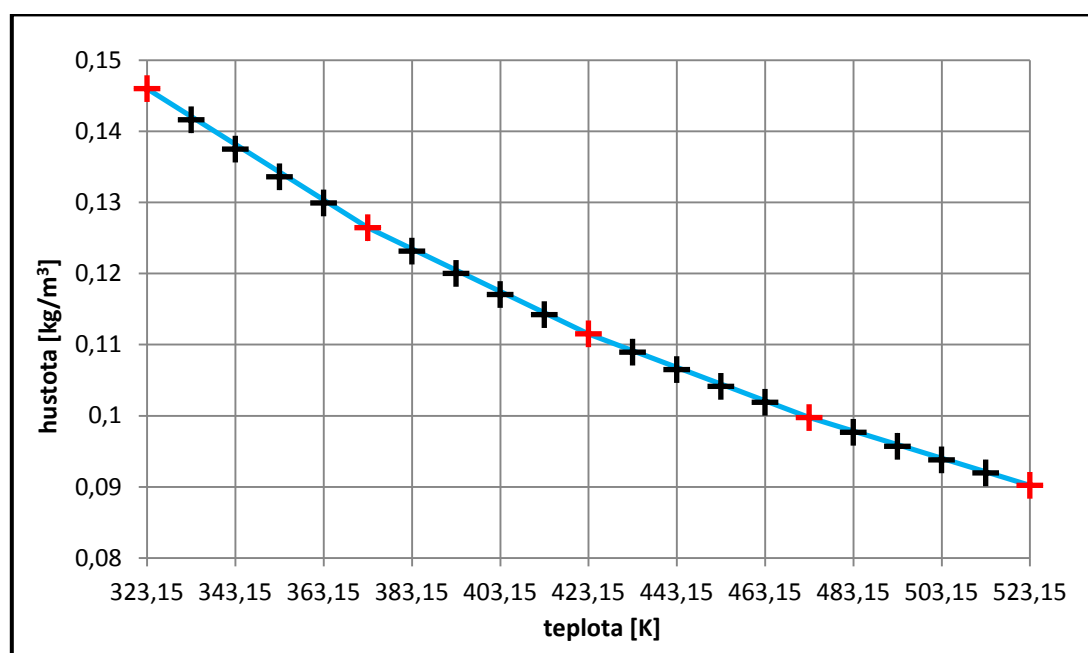
Tímto jsou definované nejdůležitější parametry výpočtu. Dále jsou nastaveny hodnoty residuálů, počet iterací pro vykreslení grafů a podobné, už méně důležité, parametry odvíjející se od individuálních požadavků výpočtáře. Po kontrole nastavení je provedena standardní inicializace výpočtu a po nastavení žádaného počtu iterací je spuštěn vlastní numerický výpočet.

### 8.2.1 Závislost hustoty hélia na teplotě

Z [16] jsou získány hodnoty hustoty hélia v širokém rozsahu teplot při atmosférickém tlaku, z nichž je sestrojena závislost hustoty hélia na teplotě. Tato závislost je zadána do materiálových vlastností hélia ve Fluentu, viz *Graf 1*. Přestože je uvnitř CASTORu malý podtlak, jsou tyto hodnoty hustoty hélia dostatečně přesné pro provedení tohoto výpočtu.

Teplota [K]	323,15	373,15	423,15	473,15	523,15
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	0,14601	0,12645	0,11152	0,09974	0,09021

Tabulka 1 - Východí hodnoty hustoty hélia při různých teplotách



Graf 1 - Závislost hustoty hélia na teplotě při atmosférickém tlaku

Závislost byla do Fluentu zadána pomocí 5 bodů, které jsou v grafu vyznačeny červeně a jejich konkrétní hodnoty jsou uvedeny v *Tab. 1*. Tato závislost se ve Fluentu nazývá *piecewise linear* (po částech lineární) a jejím principem je definování libovolného počtu konkrétních bodů. V tomto případě jsou body definovány pomocí hodnoty teploty hélia a k tomu odpovídající hustoty. Sousední zadané body jsou pak lineárně spojeny. Pro ověření přesnosti této závislosti byly do grafu vykresleny i další body, reprezentující hodnoty hustoty hélia při odlišných teplotách. Tímto je vlastně potvrzen fakt, že je zvolen dostatečný počet bodů pro zadání této závislosti s dostatečnou přesností.

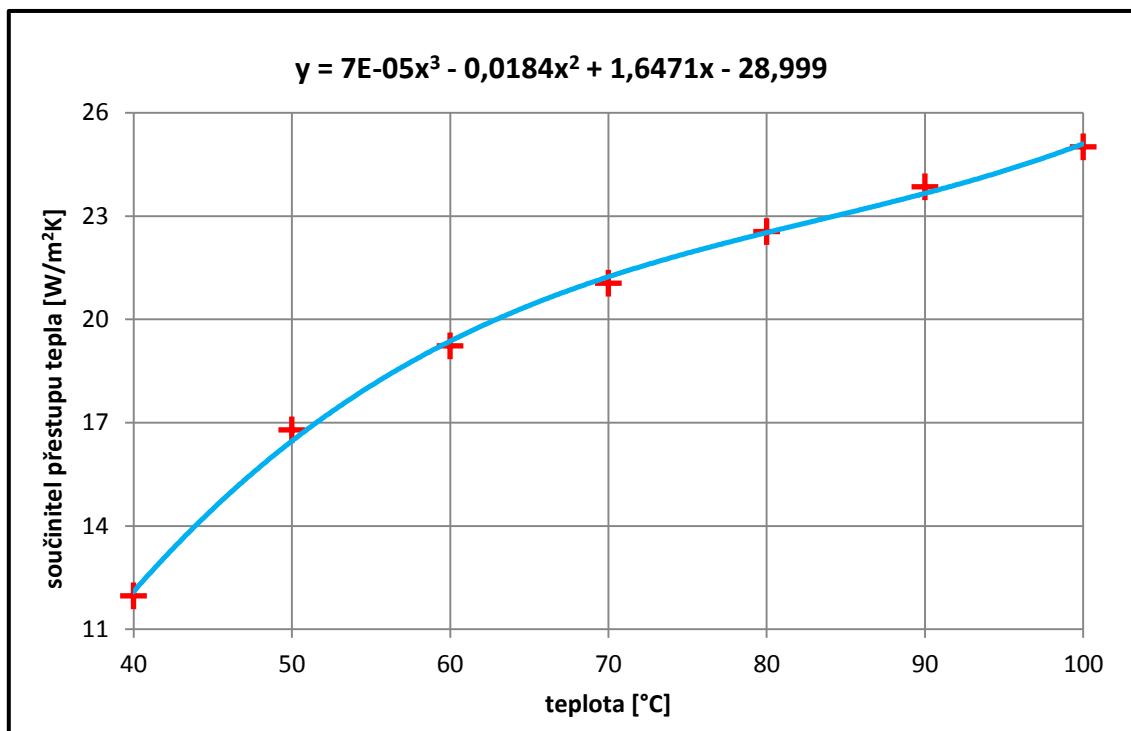
### 8.2.2 Závislost součinitele přestupu tepla na teplotě na povrchu kontejneru

Pro stanovení závislosti součinitele přestupu tepla na teplotě jsou od konzultanta této práce získány konkrétní hodnoty, viz *Tab. 2*.

Teplota [°C]	40	50	60	70	80	90	100
Součinitel přestupu tepla [W/m <sup>2</sup> K]	11,97	16,79	19,23	21,05	22,55	23,85	25,01

Tabulka 2 - Výchozí hodnoty součinitele přestupu tepla na vnějším povrchu kontejneru při různých teplotách

K sestavení závislosti z hodnot uvedených v *Tab. 2* byla použita polynomičká funkce třetího řádu, viz *Graf 2*. Tento řád se jeví jako dostatečně přesný a tudíž není potřeba zadávat funkci s vyšším stupněm polynomu. Nicméně tuto závislost není možné do Fluentu zadat tak jednoduše jako v případě předchozí závislosti hélia. Pro implementaci této závislosti do výpočtu je nutné napsat pomocný skript s přesně definovanou strukturou, tzv. UDF funkci, která mimo jiné obsahuje matematicky popsanou funkční závislost, viz *Graf 2*. Tato UDF funkce je nejprve načtena do Fluentu a až pak je možné ji vybrat a zadat do dané okrajové podmínky.



Graf 2 - Závislost součinitele přestupu tepla na teplotě na povrchu kontejneru

### 8.3 Hledání fiktivního pevného materiálu nahrazující hélium

Po úspěšném provedení výpočtu odvodu tepla prostupem je před výpočtem odvodu tepla vedením nutné určit vlastnosti pevného fiktivního materiálu, nahrazující hélium v mezerách. Hlavní porovnanou veličinou pro správné určení fiktivního materiálu je odváděný tepelný tok ze stěny kontejneru. Princip hledání je založen na vytvoření fiktivního pevného materiálu pomocí libovolného pevného materiálu, vybraného z databáze Fluentu, který je na fiktivní materiál přejmenován a jsou mu změněny i jeho vlastnosti. Fiktivní materiál má na počátku výpočtu stejné vlastnosti jako původní hélium v databázi Fluentu (hustota, měrná tepelná kapacita a součinitel tepelné vodivosti), přičemž i hustota bude nyní konstantní. Vzhledem k tomu, že se v tomto výpočtu neobjevuje přestup tepla v mezerách vlivem přirozené konvekce, je možné zanedbat i vliv gravitačního zrychlení. Po vytvoření fiktivního pevného materiálu a jeho přiřazení malé i velké mezeře, je možné zahájit hledání pomocí série pokusných výpočtů změnou některé veličiny ovlivňující tepelný tok.

Z Fourierova zákona (2) vyplývá, že tepelný tok při vedení tepla je závislý na součiniteli tepelné vodivosti, rozdílu teplot na okrajových plochách a geometrickém parametru modelu. Jelikož se geometrický parametr modelu nemění a ani se nemění okrajové podmínky, tudíž teploty na okrajových plochách, je jedinou proměnou veličinou, kterou lze měnit tepelný tok, součinitel tepelné vodivosti fiktivního materiálu. Postupnými změnami součinitele tepelné vodivosti je měněna hodnota tepelného toku na vnějším povrchu kontejneru a tak je po několika pokusných upřesňujících výpočtech dosažena přibližně stejná hodnota tepelného toku jako v případě odvodu tepla prostupem. Počet potřebných výpočtů na nalezení odpovídajícího fiktivního materiálu není možné předběžně stanovit, jelikož se odvíjí od přesnosti odhadu součinitele tepelné vodivosti. Po nalezení tohoto fiktivního materiálu je možné provést výpočet odvodu tepla vedením.

### 8.4 Výpočet odvodu tepla vedením

Tato varianta výpočtu odvodu tepla vychází z nastavení výpočtu pro hledání fiktivního materiálu a je složena z následujících tepelných procesů:

- vedení tepla v malé mezeře obsahující pevný fiktivní materiál
- vedení tepla ve stěně palivového koše
- vedení tepla ve velké mezeře obsahující pevný fiktivní materiál
- vedení tepla ve stěně kontejneru

Vedení tepla vzduchem nebylo uskutečněno, jelikož by bylo potřeba oproti ostatním variantám rozšířit výpočetní model v DesignModeleru, aktualizovat a doplnit výpočetní síť v Meshingu a znovu nastavovat celý výpočet ve Fluentu. Jako ekvivalentní náhrada vedení tepla vzduchem, s použitím okrajové podmínky na vnější hranici vzduchu, byla doporučena možnost zadání okrajové podmínky formou teploty přímo na vnější povrch kontejneru. Hodnota této okrajové podmínky je převzata z prvotního výpočtu odvodu tepla prostupem. Tato změna je jediná vůči výchozímu nastavení pro tento výpočet. Nyní je možné po nové inicializaci výpočet spustit.

## 8.5 Výpočet odvodu tepla vedením a sáláním

Tato varianta výpočtu je složena z následujících tepelných procesů:

- vedení tepla v malé mezeře obsahující pevný fiktivní materiál
- vedení tepla ve stěně palivového koše
- vedení tepla ve velké mezeře obsahující pevný fiktivní materiál
- vedení tepla ve stěně kontejneru
- sálání tepla z povrchu kontejneru

Jak je z těchto procesů na první pohled zřejmé, výchozí variantou pro tento výpočet je výpočet odvodu tepla vedením. Jediným rozdílem je změna typu okrajové podmínky na vnějším povrchu kontejneru. V tomto případě je teplo odváděno pouze sáláním z povrchu kontejneru do okolního prostředí, což je případ spíše čistě teoretický a slouží především k porovnávacím účelům. Teplota okolního prostředí byla nastavena na konstantních 38 °C, což je standardní hodnota pro všechny výpočty, pokud tuto podmínku využijí. Navíc je potřeba zadat hodnotu poměrné sálavosti, která je zvolena 0,8 dle [17]. Následuje opět spuštění vlastního výpočtu.



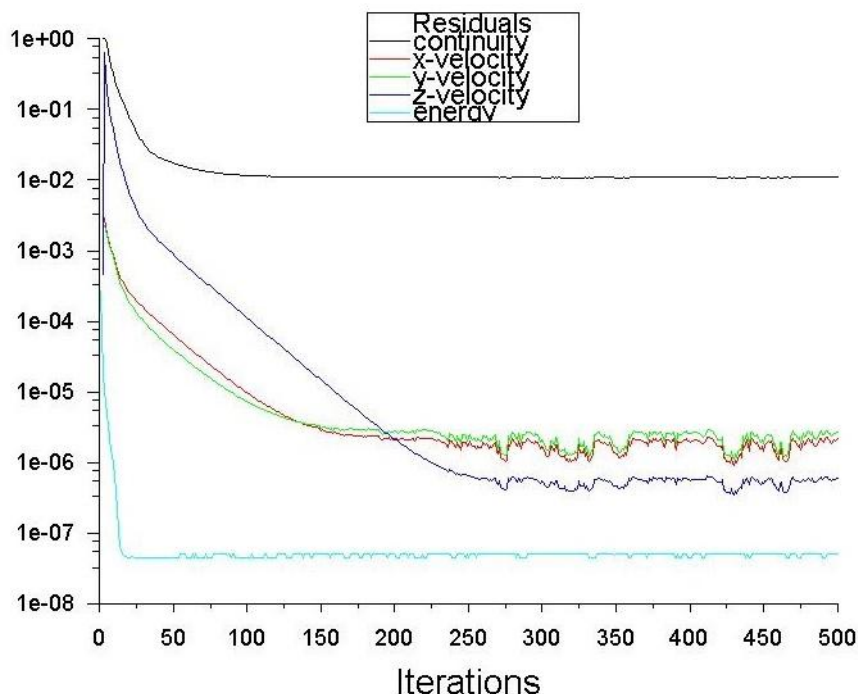
## 9 Vyhodnocení numerického výpočtu

Po úspěšném provedení všech zadaných výpočtů je nutné tyto simulace vhodným způsobem vyhodnotit a získat konkrétní hledané výsledky. Získané výsledky jsou vhodně prezentovány a postupně porovnávány s výsledky ostatních výpočtů.

Hlavní hledanou veličinou je teplota na vnějším povrchu kontejneru, která by neměla přesáhnout předepsanou mezní hodnotu 85 °C (358,15 K). Hlavní porovnávací veličinou je hodnota tepelného toku, který je odváděn na vnějším povrchu kontejneru do okolního prostředí. Tepelný tok je náhradou za množství odvedeného tepla. Tato původně uvažovaná veličina, která měla sloužit k porovnání variant, nebyla vhodně zvolena a není možné ji pro tento případ použít. Důvodem je skutečnost, že není znám čas trvání daného tepelného procesu do ustálení výpočtu, ale pouze počet iterací do dosažení tohoto ustálení, ze kterého ale není možné určit množství odvedeného tepla. Tato změna by na správné vyhodnocení výsledků neměla mít vliv. Dále jsou uvedeny i další veličiny a jejich hodnoty v různých místech řešené geometrie.

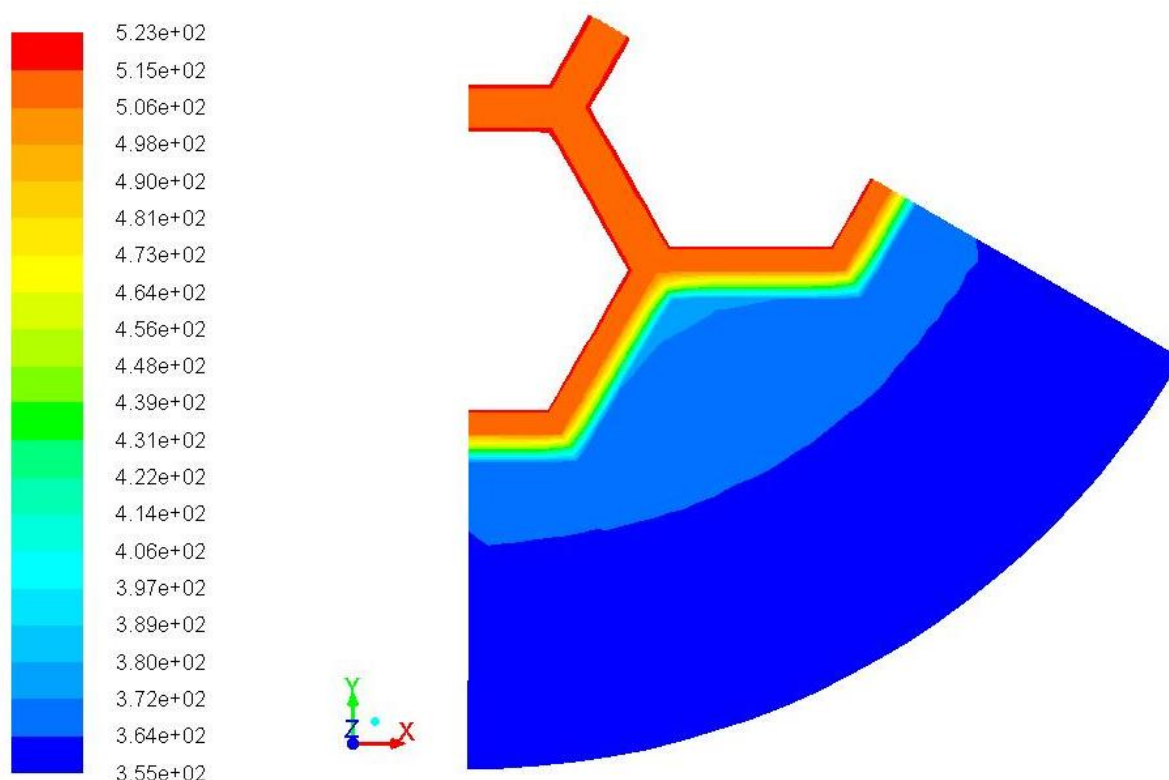
### 9.1 Odvod tepla prostupem

Základním určujícím faktorem úspěšně provedeného výpočtu je průběh residuálů, viz *Graf 3*. Tento průběh residuálů ukazuje, že výpočet zkonvergoval a až na velmi malé fluktuační hodnoty rychlostí, reprezentujících přirozenou konvekci v héliových mezerách, je výpočet zcela ustálený. Z grafu je též patrné, že zvolených 500 iterací je zcela dostačujících pro dosažení ustálenosti této varianty výpočtu.



Graf 3 - Průběh residuálů během výpočtu odvodu tepla prostupem

Jedním ze základních výsledků obdobných výpočtů je vykreslení teplotního pole, které udává hodnoty teplot v kterémkoliv místě po ústálení výpočtu, viz *Obr. 30*. Toto pole je vykresleno na horní čelní ploše výpočetního modelu. Hodnoty teplot jsou uvedeny v [K].



*Obrázek 30 - 2D teplotní pole [K] na horní čelní ploše řešeného modelu po provedení výpočtu prostupu tepla*

Na tomto 2D teplotním poli je velmi dobře pozorovatelné, že největší teplotní gradient je v oblasti velké héliové mezery. V ostatních částech modelu nejsou změny teplot tak radikální. Pro konkrétnější představu o teplotách na přesně daných rozhraních je přiložena *Tab. 3*.

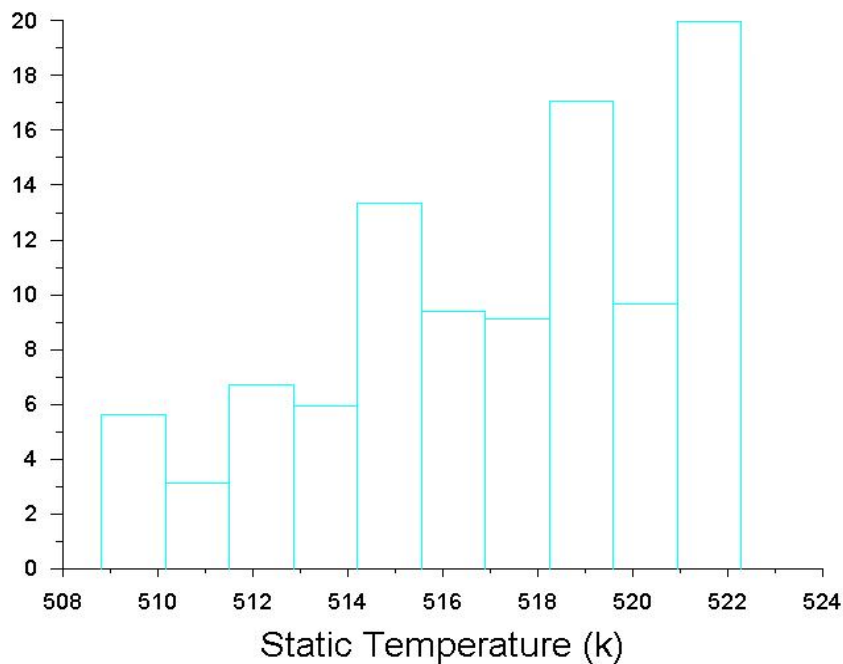
Sledovaná plocha	Střední teplota [K]
Rozhraní malé héliové mezery a palivového koše	511,498
Rozhraní palivového koše a velké héliové mezery	508,694
Rozhraní velké héliové mezery a kontejneru	368,726
Vnější povrch kontejneru	355,526

*Tabulka 3 - Konkrétní hodnoty průměrných teplot na daných rozhraních*

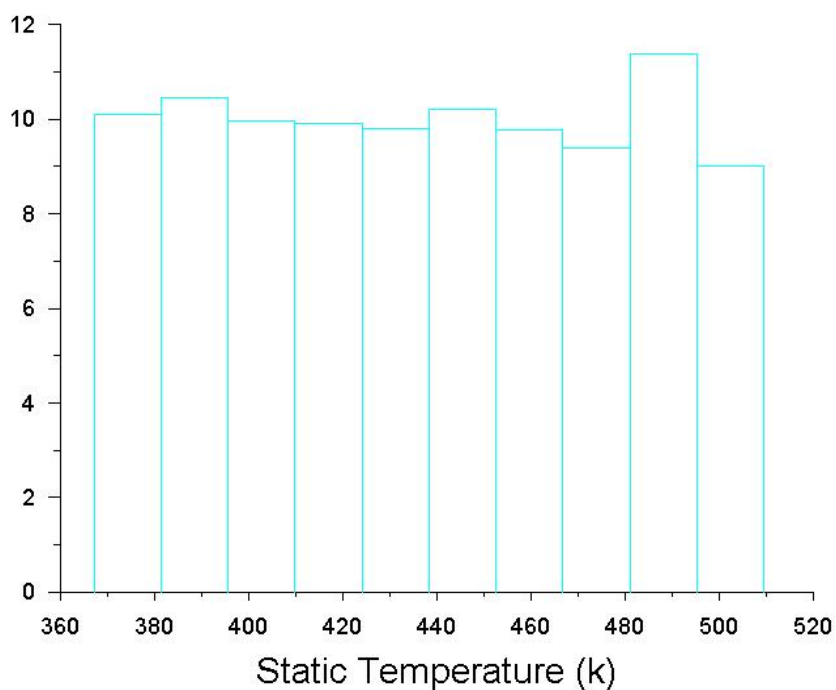
Pro potvrzení tohoto faktu je vygenerován histogram teploty v malé i velké héliové mezeře. Histogram malé héliové mezery, viz *Graf 4*, ukazuje, že změna teploty je jen v relativně malém rozsahu hodnot. Oproti tomu histogram velké héliové mezery, viz *Graf 5*, je charakteristický několikanásobně větším rozsahem teplot na ose x s jejich mnohem vyváženějším rozložením.

Teplotní pole po délce modelu je téměř konstantní jako na *Obr. 30*, nicméně vlivem přirozené konvekce v héliových mezerách jsou na okrajových čelních plochách modelu rozeznatelné malé rozdíly teplot v totožných místech příčného průřezu dané geometrie. Tento jev je lépe vysvětlen v dalším textu s využitím vhodnějšího typu výsledku.

V Tab. 3 byla uvedena střední hodnota na vnějším povrchu kontejneru, což nemusí být zcela vyhovující údaj pro splnění dané podmínky maximální dovolené teploty 85 °C. Z tohoto důvodu byla na vnějším povrchu kontejneru zjištěna i maximální vypočtená hodnota teploty. Tato maximální hodnota je vyšší přibližně o pouhé 0,3 °C, což je tak malá hodnota, že je ji možné zanedbat a jako relevantní hodnotu pro stanovení splnění podmínky maximální teploty na vnějším povrchu kontejneru brát v úvahu pouze střední hodnotu teploty na tomto povrchu.

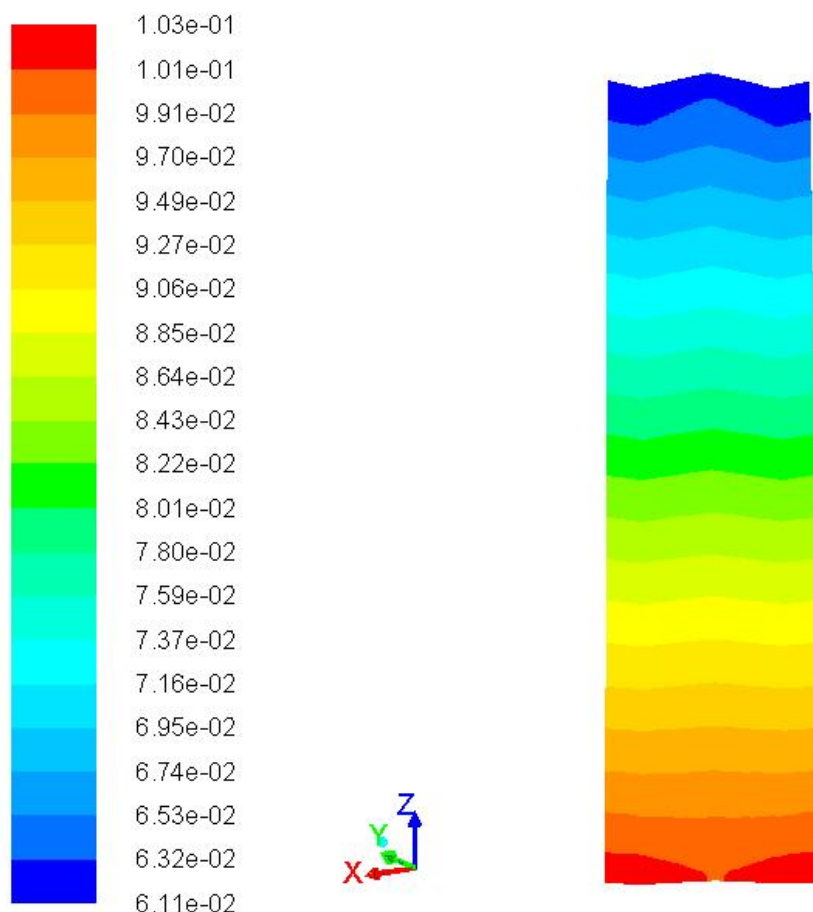


Graf 4 - Histogram teploty v malé héliové mezeře v [K]



Graf 5 - Histogram teploty ve velké héliové mezeře v [K]

Na počátku této varianty výpočtu s přirozenou konvekcí je uvažován v celém objemu atmosférický tlak. Vlivem postupného zahřívání modelu došlo k nepatrnému zvýšení tohoto tlaku v héliových mezerách, nicméně s pomocí jemného rozlišení hodnot je možné tuto změnu znázornit, viz *Obr. 31*, kde je znázorněna změna pouze ve velké héliové mezeře. Barevně jsou rozlišeny hodnoty přetlaku v [Pa]. V malé héliové mezeře je maximální přetlak přibližně o 0,3 Pa vyšší, což potvrzuje i *Tab. 4*.



Obrázek 31 - Znázornění hodnot přetlaků ve velké héliové mezeře vůči atmosférickému tlaku v [Pa]

Sledovaný objem	Maximální přetlak [Pa]
Malá héliová mezera	0,135
Velká héliová mezera	0,104

Tabulka 4 - Hodnoty maximálního přetlaku v héliových mezerách v [Pa]

V *Tab. 5* jsou uvedeny reprezentativní hodnoty hustoty hélia vyskytující se v mezerách po ustálení výpočtu.

Sledovaný objem	Minimální hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Maximální hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Střední hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
Malá héliová mezera	0,09	0,093	0,091
Velká héliová mezera	0,093	0,129	0,11

Tabulka 5 - Mezní hodnoty hustoty hélia v mezerách po ustálení výpočtu

Během realizace toho výpočtu s přirozenou konvekcí se vyskytla zajímavá myšlenka a sice otestovat výpočet a jeho závislost na délce geometrického modelu. Již při tvorbě výpočetního modelu je uvedeno, že jeho délka byla zvolena 1 m. Nicméně byl proveden ještě jeden výpočet s totožným nastavením, tentokrát ale s výpočetním modelem desetinasobně zmenšeným na délku 0,1 m, sloužící především pro porovnávací účely. Výsledky teplot na daných rozhraních pro tento zmenšený model jsou uvedeny v *Tab. 6*. Výsledkem tohoto pokusu je zjištění, že odchylky teplot na daných rozhraních jsou pro modely o délce 1 m a 0,1 m po ustálení minimální, přičemž nejvyšší odchylka je na rozhraní velké héliové mezery a kontejneru a to pouze 0,152 K.

Sledovaná plocha	Střední teplota [K]
Rozhraní malé héliové mezery a palivového koše	511,448
Rozhraní palivového koše a velké héliové mezery	508,633
Rozhraní velké héliové mezery a kontejneru	368,882
Vnější povrch kontejneru	355,637

*Tabulka 6 - Konkrétní hodnoty průměrných teplot na daných rozhraních pro model 0,1 m*

Jelikož teplota na rozhraních není hlavní porovnávací veličinou, je nyní na místě porovnat i hodnoty tepelných toků. Hodnoty tepelných toků na vnějším povrchu kontejneru jsou uvedeny v *Tab. 7*. Z tabulky plyne, že hodnota tepelného toku na modelu 0,1 m je přibližně desetkrát menší než na řešeném modelu o délce 1 m. Tepelný tok na modelu 1 m je o 1,553 W nižší než součet tepelných toků pro 10 pokusných zmenšených modelů. Vzhledem k velikosti hodnoty tepelného toku je tento rozdíl zanedbatelný, jelikož v procentuálním vyjádření se jedná o hodnotu 0,3 %. Z výše uvedeného tedy vyplývá, že délka modelu nemá pro tento výpočet s přirozenou konvekcí nijak zásadní vliv na přesnost výpočtu.

Sledovaná plocha	Tepelný tok [W]
Vnější povrch kontejneru na modelu o délce 1 m	418,423
Vnější povrch kontejneru na modelu o délce 0,1 m	41,976

*Tabulka 7 - Hodnoty odváděného tepelného toku z vnějšího povrchu kontejneru*

Dalším z důvodů realizace toho pokusného výpočtu je možnost jeho využití pro lepší interpretaci přirozené konvekce z hlediska jejího vektorového vyjádření rychlostí. Pro začátek jsou v *Tab. 8* pro výpočtový model o délce 1 m uvedeny hodnoty rychlostí v héliových mezerách, obdobně v *Tab. 9* pro pokusný model 0,1 m. Z hodnot v tabulkách je patrné, že v malé héliové mezeře jsou rychlosti velice nízké a přirozená konvekce se téměř neprojevuje.

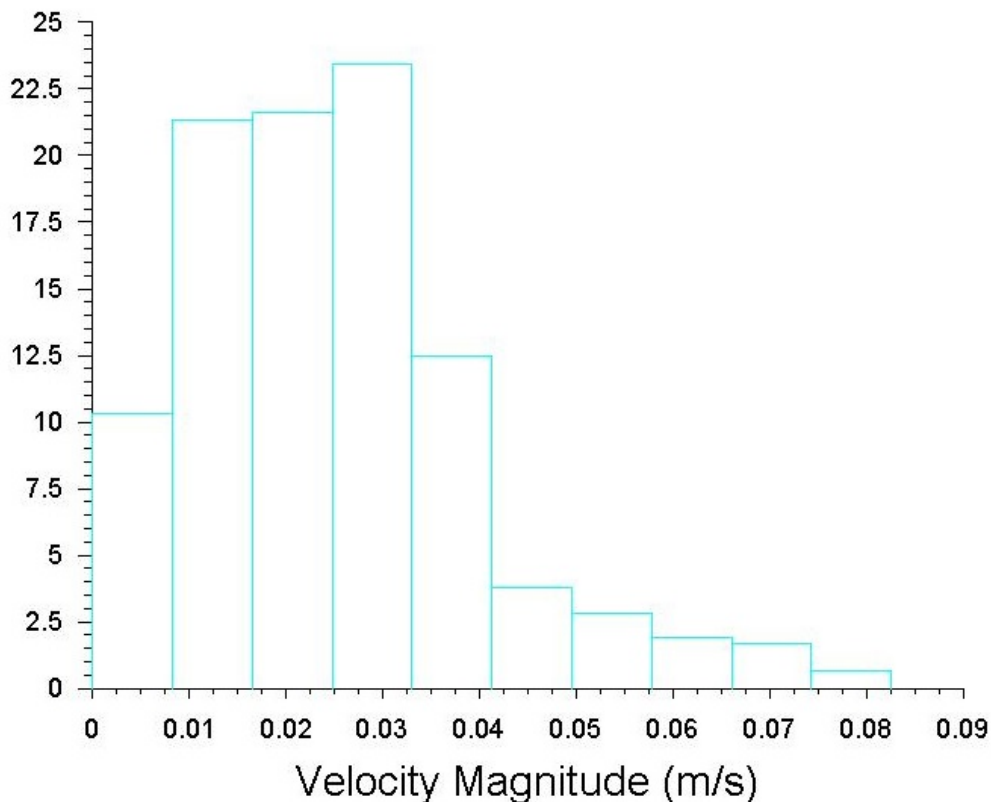
Sledovaný objem	Minimální rychlost [m/s]	Maximální rychlost [m/s]
Malá héliová mezera	$2,65 \cdot 10^{-07}$	0,001459
Velká héliová mezera	$2,65 \cdot 10^{-07}$	0,0826

*Tabulka 8 - Hodnoty minimálních a maximálních rychlostí v héliových mezerách pro model 1m*

Sledovaný objem	Minimální rychlost [m/s]	Maximální rychlost [m/s]
Malá héliová mezera	$7,92 \cdot 10^{-07}$	0,001438
Velká héliová mezera	0,000186	0,0628

*Tabulka 9 - Hodnoty minimálních a maximálních rychlostí v héliových mezerách pro model 0,1m*

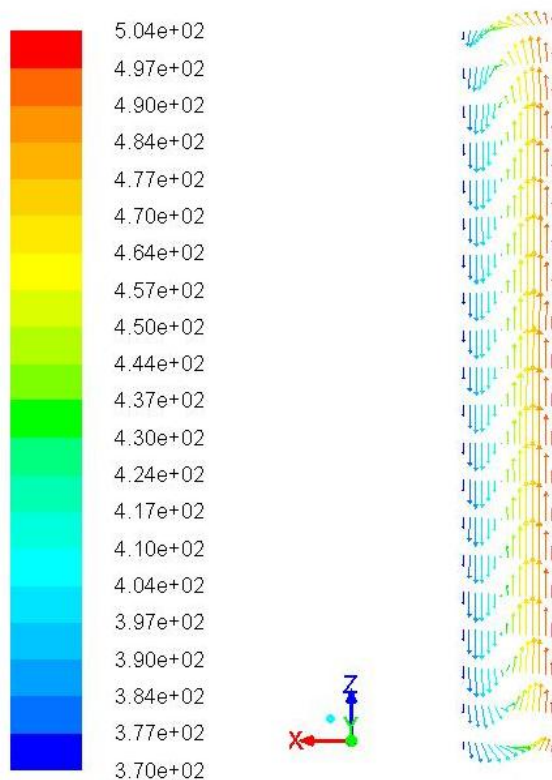
Maximální dosahované rychlosti přirozené konvekce ve velké héliové mezeře jsou také relativně malé, nicméně už o více než řád vyšší než v malé héliové mezeře. Pokud budou porovnávány hodnoty maximálních rychlostí ve velké héliové mezeře pro skutečný a pokusný model, tak je vidět, že ve skutečném modelu je rychlost vyšší než v pokusném. Tento fakt může být způsoben tím, že zmenšený model není dostatečně dlouhý a proud se začne kvůli změně směru na čelních plochách brzdit ještě před dosažením maximální možné rychlosti. Pro názornější představu o rozložení hodnot rychlostí je znázorněn histogram rychlosti přirozené konvekce ve velké héliové mezeře pro výpočtový model o délce 1 m, viz *Graf 6*.



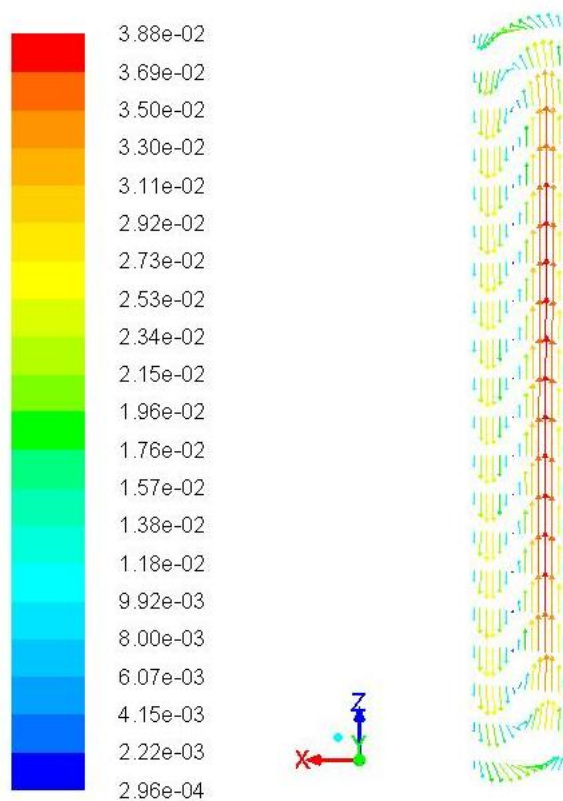
*Graf 6 - Histogram rychlosti přirozené konvekce ve velké héliové mezeře pro skutečný model 1 m*

Jak už bylo zmíněno výše, na zmenšeném pokusném modelu bude přiblížena přirozená konvekce ve velké héliové mezeře. Na *Obr. 32* je vidět detail přirozené konvekce na boční stěně modelu, přičemž vykreslené vektory barevně reprezentují ustálené teploty v [K]. Zde je velmi dobře patrné, že teplejší hélium s nižší hustotou stoupá vzhůru podél stěny palivového koše a naopak chladnější hélium klesá dolů podél vnitřního povrchu kontejneru a tvoří uzavřenou smyčku. Ve středu smyčky jsou rychlosti velmi malé, viz min. rychlost v *Tab. 9*.

Na *Obr. 33* je totožné schéma, ovšem se zásadním rozdílem, že barva vektorů reprezentuje skutečné rychlosti konvekce. I zde je zcela zřejmé, že vyšší rychlosti je dosaženo při stoupání teplejšího hélia vzhůru. Za povšimnutí stojí fakt, že rychlosti přímo u povrchů koše a kontejneru jsou nižší než v další vrstvě blíže ke středu mezery, což je způsobeno viskozitou hélia. Jelikož byl pro lepší a názornější ukázkou přirozené konvekce obrázek generován na boční stěně modelu, nezahrnuje tak celý rozsah rychlostí v celém objemu héliové mezery.



Obrázek 32 - Detail přirozené konvekce na boční stěně zmenšeného modelu, barvy vektorů odpovídají hodnotám teplot v [K]



Obrázek 33 - Detail přirozené konvekce na boční stěně zmenšeného modelu, barvy vektorů odpovídají hodnotám skutečných rychlostí v [m/s]

## 9.2 Určení fiktivního pevného materiálu nahrazující hélium

Nalezení fiktivního pevného materiálu je hlavním cílem této práce. Jeho úlohou je ekvivalentně nahradit vliv přirozené konvekce hélia v mezeře. Postup hledání toho materiálu byl popsán již dříve. Výchozí pevný fiktivní materiál pro výpočet měl totožné fyzikální vlastnosti jako plynné hélium, které jsou uvedené v *Tab. 10*.

Vlastnosti výchozího fiktivního materiálu	Hodnoty
Hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]	0,1625
Měrná tepelná kapacita [ $\text{J/kgK}$ ]	5193
Součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W/mK}$ ]	0,152

*Tabulka 10 - Fyzikální vlastnosti výchozího pevného fiktivního materiálu*

Po provedení výpočtu s tímto výchozím materiálem je zjištěna hodnota tepelného toku, která je uvedena v *Tab. 11*. V této tabulce je dále uveden tepelný tok získaný při výpočtu prostupu tepla s uvažováním přirozené konvekce hélia, který bude směrodatný. Tepelný tok, který byl získán výpočtem vedení tepla s výchozím fiktivním pevným materiálem, je o necelých 27 W nižší než v případě prostupu tepla. Z tohoto zjištění vyplývá, že zanedbáním přirozené konvekce hélia, zejména ve velké héliové mezeře, a při uvažování jen vedení tepla vědomě vzniká už relativně velká nepřesnost výpočtu, cca 6,5 %. Tuto odchylku je možné razantně snížit změnou součinitele tepelné vodivosti fiktivního materiálu. Po provedení dostatečného počtu upřesňujících výpočtů s postupnou změnou součinitele tepelné vodivosti je získán tepelný tok svou hodnotou velice blízký tepelnému toku, jenž je určen z výpočtu prostupu tepla. Tato hodnota tepelného toku je taktéž uvedena v *Tab. 11*. Odchylku tepelného toku se tak podařilo snížit přibližně na pouhé 0,03 %, což je velice uspokojivý výsledek.

Vnější povrch kontejneru	Tepelný tok [W]
Prostup	418,423
Vedení - výchozí fiktivní materiál	391,707
Vedení - finální fiktivní materiál	418,315

*Tabulka 11 - Hodnoty tepelných toků při určení finálního pevného materiálu*

Hodnoty teplot na daných rozhraních po provedení výpočtu odvodu tepla s již finálním fiktivním pevným materiálem jsou uvedeny v *Tab. 12*.

Sledovaná plocha (finální fiktivní materiál)	Střední teplota [K]
Rozhraní malé héliové mezery a palivového koše	512,612
Rozhraní palivového koše a velké héliové mezery	505,061
Rozhraní velké héliové mezery a kontejneru	374,999
Vnější povrch kontejneru	355,499

*Tabulka 12 - Střední hodnoty teplot na daných rozhraních po nalezení fiktivního pevného materiálu*

V *Tab. 13* jsou uvedeny vlastnosti finálního fiktivního pevného materiálu nahrazující hélium, v níž je zvýrazněna nová hodnota součinitele tepelné vodivosti. Některé hodnoty teplot se od teplot získaných při výpočtu prostupu tepla liší v řádech jednotek K, avšak teplota na vnějším povrchu kontejneru je téměř stejná, což je v tomto případě nejpodstatnější, jelikož k této teplotě se vztahuje podmínka maximální dovolené teploty na tomto povrchu.

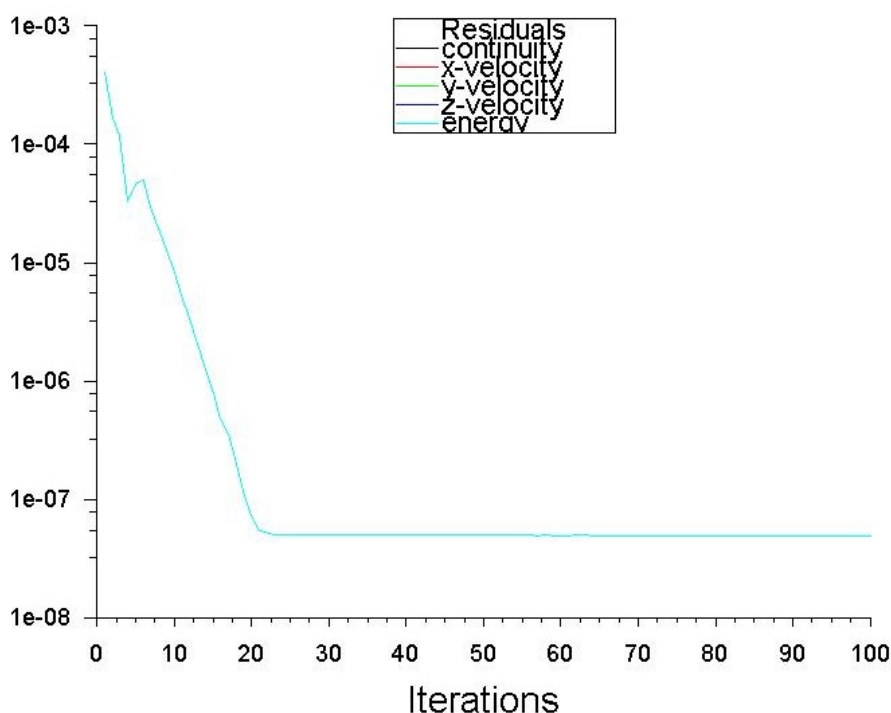


Vlastnosti finálního fiktivního materiálu	Hodnoty
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	0,1625
Měrná tepelná kapacita [J/kgK]	5193
Součinitel tepelné vodivosti [W/mK]	<b>0,1662</b>

Tabulka 13 - Fyzikální vlastnosti hledaného fiktivního materiálu ekvivalentně nahrazující hélium

### 9.3 Odvod tepla vedením

Při výpočtu odvodu tepla vedením, bez uvažování vlivu přirozené konvekce a s využitím vlastností fiktivního pevného materiálu, byl snížen počet iterací potřebných pro ustálení výpočtu, viz *Graf 7*. Důvodem je potlačení residuálů rychlosti konvekce hélium v mezerách.

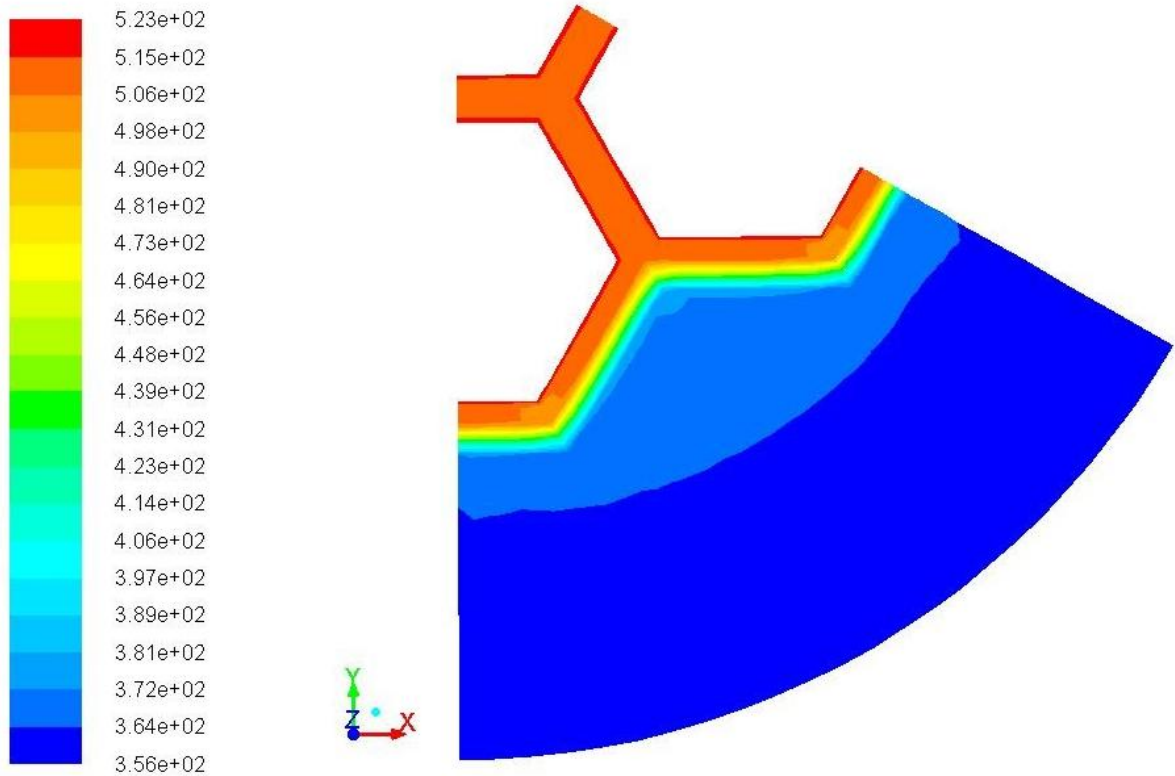


Graf 7 - Průběh residuálu během výpočtu odvodu tepla vedením

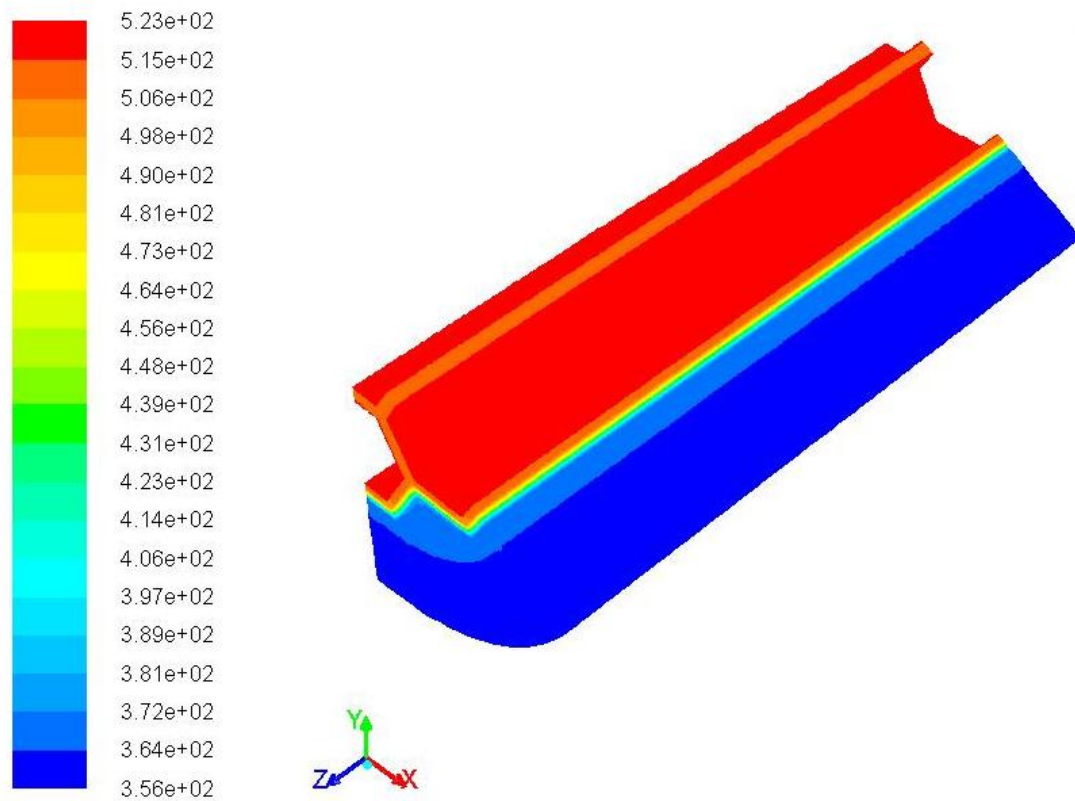
Vykreslené 2D teplotní pole po výpočtu odvodu tepla vedením je na *Obr. 34*. Na první pohled vypadá stejně jako v případě prostupu tepla, avšak po hlubší vizuální analýze se menší odlišnosti objeví, nicméně tyto detaily nejsou vůbec podstatné. Podstatnou veličinou je velikost odváděného tepelného toku, která je porovnána opět s hodnotou získanou během výpočtu prostupu tepla. Tyto dvě porovnávané hodnoty jsou uvedené v *Tab. 14*. Z tabulky vyplývá, že zjištěná hodnota tepelného toku získaná výpočtem vedení tepla je téměř totožná s porovnávanou hodnotou tepelného toku, což potvrzuje správnost výpočtu. Na *Obr. 35* je pro ilustraci znázorněn izometrický pohled na 3D teplotní pole výpočetního modelu.

Sledovaná plocha	Tepelný tok [W]
Vnější povrch kontejneru - prostup	418,423
Vnější povrch kontejneru - vedení	418,065

Tabulka 14 - Hodnoty tepelných toků pro porovnání prostupu tepla s vedením



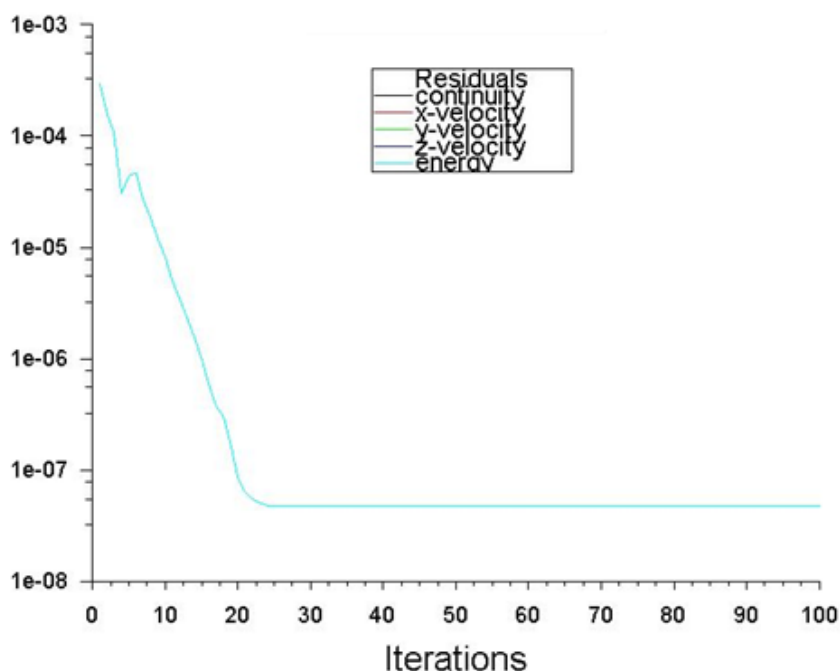
Obrázek 34 - 2D teplotní pole v [K] na horní čelní ploše řešeného modelu po provedení výpočtu vedení tepla



Obrázek 35 - Izometrický pohled na 3D teplotní pole v [K] řešeného modelu po provedení výpočtu vedení tepla

## 9.4 Odvod tepla vedením a sáláním

Jak již bylo zmíněno dříve, tato varianta výpočtu je spíše z teoretické oblasti, jelikož realizovat odvod tepla pouze sáláním z vnějšího povrchu kontejneru je prakticky nemožné. Navíc, jak je potvrzeno níže, je tento způsob odvodu tepla nedostatečný. Pro dostatečné ustálení výpočtu je zvolen stejný počet iterací jako v předchozím případě, viz *Graf 8*. Jak je z průběhu residuálu patrné, mohl by tento počet iterací být ještě nižší. Vyšší počet iterací ovšem není překážkou a v žádném případě není chybou výpočtu.

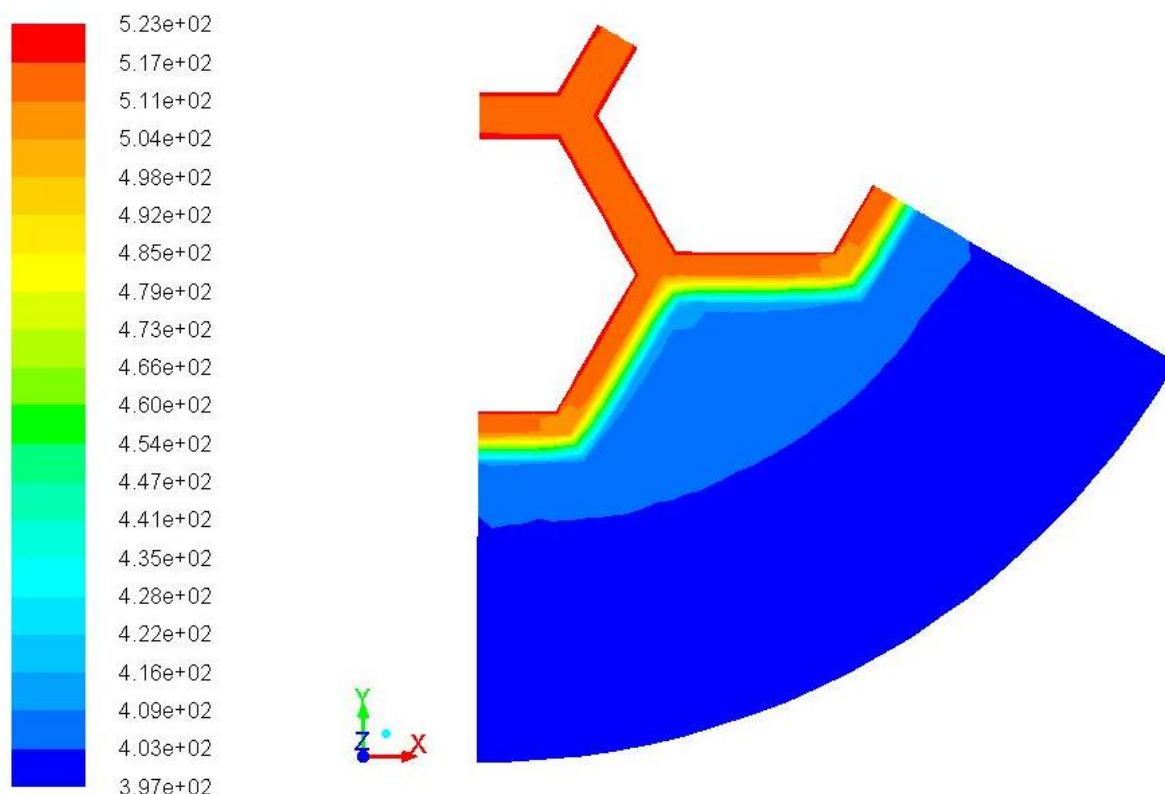


*Graf 8 - Průběh residuálu během výpočtu odvodu tepla vedením a sáláním*

Na *Obr. 36* je vykresleno 2D teplotní pole opět na horní čelní ploše řešeného modelu získané výpočtem odvodu tepla vedením a sáláním, které je z hlediska barevného rozložení teplot totožné s teplotním polem na *Obr. 35*. Je ale potřeba si všimnout, že barevná stupnice teplot je v tomto případě na vyšších hodnotách než v případě vedení tepla. Konkrétní hodnoty teplot na daných rozhraních jsou uvedeny v *Tab. 15*. Obdobně jako v předchozích variantách je nejpodstatnější hodnotou teplota na vnějším povrchu kontejneru. Z uvedené hodnoty v tabulce je jasné, že podmínka maximální povolené teploty na vnějším povrchu kontejneru není splněna o téměř 39 K.

Sledovaná plocha	Střední teplota [K]
Rozhraní malé héliové mezery a palivového koše	514,866
Rozhraní palivového koše a velké héliové mezery	509,518
Rozhraní velké héliové mezery a kontejneru	411,545
Vnější povrch kontejneru	396,857

*Tabulka 15 - Střední hodnoty teplot na daných rozhraních po výpočtu odvodu tepla vedením a sáláním*



Obrázek 36 - 2D teplotní pole [K] na horní čelní ploše řešeného modelu po provedení výpočtu vedení a sálání tepla

Z výrazně vyšší hodnoty teploty na vnějším povrchu kontejneru vyplývá, že odváděný tepelný tok bude nižší než v předchozích případech, jelikož nedošlo k žádné materiálové ani geometrické změně modelu. Došlo pouze ke změně okrajové teploty oproti předchozímu případu vlivem změny způsobu odvodu tepla z povrchu kontejneru. Vypočtená hodnota tepelného toku odváděného vedením a sáláním je uvedena v *Tab. 16* společně s hodnotami tepelných toků získaných z předchozích variant výpočtů pro závěrečné porovnání výsledků.

Vnější povrch kontejneru	Tepelný tok [W]
Prostup tepla	418,423
Vedení tepla	418,065
Vedení a sálání tepla	315,15

Tabulka 16 - Porovnání tepelných toků všech vypočtených variant odvodu tepla

## 10 Závěr

Hlavním cílem této práce byl výpočet tří zadaných variant odvodu tepla (prostupem, vedením, vedením a sáláním) a určení vlastností fiktivního pevného materiálu nahrazující helium pro případ vedení tepla. Pro úspěšné provedení zadaných úkolů nebylo možné provést jen samotný numerický výpočet, ale bylo nutné realizovat i důkladnou teoretickou přípravu.

Již v úvodu práce byl zmíněn princip vývinu zbytkového tepla v palivových kazetách, kvůli němuž vzniká řešený problém odvodu tepla z kontejnerů. Dále bylo pojednáno o vlastní konstrukci palivové kazety včetně její hlavní komponenty, palivového článku. Neodmyslitelnou součástí by měly být i teoretické znalosti z oblasti kontejnerů pro vyhořelé jaderné palivo, zejména CASTORu 440/84, především jeho konstrukčního řešení, ale i obecných požadavků a podmínek. Po nastudování těchto částí byl navržen a popsán geometrický model kontejneru, jenž sloužil jako výchozí návrh pro výpočetní řešení.

Pro pochopení fyzikální podstaty problému byla popsána i základní teorie přenosu tepla vycházející z diferenciální energetické rovnice. Tato rovnice byla dále upravena na Fourier-Kirchhoffovu rovnici stacionárního vedení tepla. Pro úplnost byla tato kapitola doplněna o Fourierův zákon vedení tepla, Newtonův vztah pro přestup tepla a specifikaci podmínek jednoznačnosti, jejichž význam je pro tento výpočet velmi důležitý.

Jelikož během vlastní numerické simulace je obtížné sledovat odehrávající se tepelné procesy, byla pro lepší přiblížení těchto procesů zpracována kapitola, která popisuje analytický postup výpočtu odvodu tepla na zjednodušeném modelu, využívající obecnou teorii přenosu tepla. Analyticky byly zpracovány všechny tři varianty výpočtů, kde navíc u výpočtu odvodu tepla prostupem byl ukázán i výpočet součinitele přestupu tepla na vnějším povrchu kontejneru s využitím Nusseltova kritéria podobnosti. Celá tato kapitola nebyla v náplni této práce, nicméně její přínos pro lepší pochopení principů odvodu tepla není zanedbatelný.

Před zahájením numerického výpočtu byl stručně vysvětlen princip CFD simulace a Fluentu, jenž sloužil jako výpočetní software. Dále byla popsána úprava výpočetního modelu do své finální podoby včetně procesu vygenerování vhodné výpočetní objemové sítě, která zajistila hladký průběh výpočtů a dostatečně přesné výsledky. Poté už byly zahájeny vlastní numerické výpočty, kterým předcházelo nastavování výpočetních parametrů, definování potřebných materiálů, okrajových podmínek a požadovaných funkčních závislostí. Všechny výpočty byly provedeny úspěšně, přičemž prvotním výpočtem, avšak určitě nejsložitějším, byl výpočet odvodu tepla prostupem. Dále následovala série výpočtů pro nalezení fiktivního pevného materiálu nahrazující helium. Zbývající výpočty odvodu tepla vedením a pomocí vedení a samotného sálání z vnějšího povrchu kontejneru do okolního prostředí nebyly už tak náročné.

Vyhodnocením prvotního výpočtu odvodu tepla prostupem byly získány směrodatné výsledky i pro další výpočty. Hlavní sledovanou veličinou byla teplota na vnějším povrchu kontejneru a hlavní porovnávací veličinou byl tepelný tok na tomto povrchu. Z výpočtu odvodu tepla prostupem byla zjištěna na vnějším povrchu kontejneru teplota 82,4 °C, což splňuje podmínku maximální dovolené teploty 85 °C. Odváděný tepelný tok z vnějšího povrchu kontejneru po ustálení dosáhl hodnoty 418,4 W.

Mimo rozsah práce byl také proveden pokusný výpočet s cílem zjistit závislost výpočtu na délce modelu pro případ odvodu tepla prostupem. Pro tento pokus byl realizován výpočet na zmenšeném modelu o délce 0,1 m. Z výsledků tohoto pokusného výpočtu bylo zjištěno, že délka modelu nemá nijak zásadní vliv na přesnost tohoto výpočtu, což bylo potvrzeno získanými hodnotami teplotního pole a tepelného toku.

Při výpočtu odvodu tepla vedením, s uvažováním již nalezeného fiktivního pevného materiálu nahrazující helium, byla hodnota teploty na vnějším povrchu kontejneru totožná jako v případě odvodu tepla prostupem, jelikož byla přímo zadána jako okrajová podmínka. Zjištěná hodnota tepelného toku byla 418,1 W. Vzhledem k tomu, že tato hodnota je velice blízká předchozí hodnotě tepelného toku, je potvrzen fakt, že fiktivní materiál byl nalezen úspěšně.

Výpočet odvodu tepla vedením a sáláním měl spíše porovnávací význam a podle očekávání byly zjištěné hodnoty teploty a tepelného toku odlišné od předchozích výsledků. Teplota na vnějším povrchu kontejneru dosáhla hodnoty 123,7 °C, což velmi výrazně nespĺňuje již dříve uvedenou podmínku maximální dovolené teploty 85 °C. Naopak hodnota tepelného toku dosáhla výrazně nižší hodnoty než v předchozích případech a to 315,2 W, což je o 103,2 W méně oproti prvotnímu výpočtu odvodu tepla prostupem.

Závěrem lze říci, že práce obsahuje to, co se od ní očekávalo a navíc spoustu dalších informací, které nemusí být pro vlastní numerické řešení podstatné, ale jsou přínosné zejména pro lepší pochopení dané problematiky.

## 11 Seznam použité literatury

- [1] BEČVÁŘ, J. *Jaderné elektrárny*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [2] ZDEBOR, J. *Primární okruh jaderné elektrárny - přednáška č. 6*. Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Katedra energetických strojů a zařízení, 2013.
- [3] BURKET, D. *Palivové vsázky se zdokonaleným palivem na Jaderné elektrárně Dukovany*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, 2003. 214 s. Vedoucí dizertační práce Prof. Ing. Karel Matějka, CSc.
- [4] VACEK, J. *Analýza teplotních polí palivových elementů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 73 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Hugo Šen.
- [5] TESAŘ, F. *Odvod tepla a vývin tepla vyhořelého jaderného paliva v úložištích*. Brno: Masarykova Univerzita, Pedagogická fakulta, 2011. 65 s. Vedoucí diplomové práce RNDr. Jindřiška Svobodová, Ph.D.
- [6] ŠVAŘÍČEK, T. *Analýza teplotního pole kontejneru pro použité palivo*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 60 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Hugo Šen.
- [7] HLATKÝ, P. *Studium tepelných a fyzikálních vlastností skladovacích kontejnerů pro použité jaderné palivo*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 95 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Hugo Šen.
- [8] VÍTOVSKÁ, M. *Nakládání s jaderným odpadem v jaderných elektrárnách a nemocničních zařízeních*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Andrea Tabasová, Ph.D.
- [9] MARCELL, J. *Přenos tepla v úložném obalovém souboru a jeho vliv na okolí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 80 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Oldřich Matal, CSc.
- [10] MACHÁČKOVÁ, A., KOCICH, R. *Sdílení tepla a proudění*. Ostrava: Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2576-2.
- [11] KOZUBKOVÁ, M., BLEJCHAŘ, T., BOJKO, M. *Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN - 978-80-248-2491-8.
- [12] HORÁKOVÁ, K., HONZEJK, V., LEMFELD, F. *Manuál pro výuku numerických metod*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, 2010. 222 s.
- [13] KRUTIL, J., KOZUBKOVÁ M. *Modelování přestupu tepla ve výměnících - sbírka příkladů*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2712-4.
- [14] BOJKO M. *3D proudění - Ansys Fluent*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2607-3.
- [15] ANSYS, Inc. *Ansys Fluent 12.0 Tutorial guide*. April 2009.

- [16] VARGAFTIK, N. *Spravočnik po teplofizičeskim svojstvam gazov i židkostej*. Moskva: Gosudarstvennoje izdatel'stvo fiziko-matematičeskoj literatury, 1963, 708 s.
- [17] [www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/56-soucinitele-salani-a-pomerne-tepelne-pohltnosti](http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/56-soucinitele-salani-a-pomerne-tepelne-pohltnosti)
- [18] <http://www.nukleonstory.cz/jaderne-palivo0>.
- [19] <http://www.skoda-js.cz/cs/vyrobky-a-sluzby/skladovani-vyhoreleho-jaderneho-paliva/kontejnery-pro-transport-a-skladovani.shtml>.
- [20] BAM Federal Institute for Materials Research and Testing. *Containers for Radioactive Materials*.  
[http://www.tes.bam.de/en/umschliessungen/behaelter\\_radioaktive\\_stoffe/index.htm](http://www.tes.bam.de/en/umschliessungen/behaelter_radioaktive_stoffe/index.htm). Berlin: 2010.
- [21] DUFKOVÁ, M. *Jak se plní CASTOR jaderným palivem*.  
<http://3pol.cz/1081-jak-se-plni-castor-jadernym-palivem>. Praha: 2011.
- [22] Central Europe Engineering & Investment. *Castory*. <http://www.ceei.sk/cz>. Bratislava: 2009.
- [23] <http://www.kfy.zcu.cz/dokumenty/FYSV/PrenosTepla.pdf>
- [24] <http://www.prirodnistavba.cz/popup/soucinitel-tepelne-vodivosti-33e.html>
- [25] [http://www.vscht.cz/uchi/ped/cfd/cfd.metoda\\_konecných\\_objemu.pdf](http://www.vscht.cz/uchi/ped/cfd/cfd.metoda_konecných_objemu.pdf)
- [26] <http://www.ceei.sk/cz/castor-440-84.php>
- [27] [http://ntc.zcu.cz/download/kos-SKODA440\\_rev.pdf](http://ntc.zcu.cz/download/kos-SKODA440_rev.pdf)
- [28] <http://enet.vsb.cz/miranda2/export/sites-root/enet/aktivita/cs/okruhy/energy4y/workshopy/2011/11/Prezentace-spolecnosti-SKODA-JS-2011.pdf>



## 12 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Palivová kazeta pro reaktor VVER 440 .....	16
Obrázek 2 - Palivové tablety .....	17
Obrázek 3 - Konstrukce palivového článku VVER 440 .....	19
Obrázek 4 - Konstrukce palivové kazety VVER 440 .....	20
Obrázek 5 - Příčný řez palivovou kazetou VVER 440 .....	21
Obrázek 6 - Reálný model kontejneru CASTOR 440/84.....	22
Obrázek 7 - Konstrukce CASTORU 440/84.....	23
Obrázek 8 - Palivový koš dle vlastního návrhu Škoda JS a.s. ....	24
Obrázek 9 - Podélný řez zjednodušeným modelem CASTORU .....	25
Obrázek 10 - Schéma manipulace s VJP a kontejnerem .....	26
Obrázek 11 - Zkouška volným pádem .....	26
Obrázek 12 - Zkouška tepelné odolnosti.....	27
Obrázek 13 - Grafická interpretace součinitele tepelné vodivosti .....	29
Obrázek 14 - Ilustrace Newtonova vztahu pro přestup tepla .....	30
Obrázek 15 - Výchozí schéma pro odvození okrajových podmínek .....	31
Obrázek 16 - Cylindrický souřadnicový systém .....	33
Obrázek 17 - Příčný průřez geometrického modelu kontejneru .....	34
Obrázek 18 – Podélný osový průřez geometrického modelu kontejneru.....	35
Obrázek 19 - Izometrický pohled do vnitřku kontejneru .....	35
Obrázek 20 - Skutečný (vlevo) a zjednodušený (vpravo) výpočetní model kontejneru pro analytické řešení.....	36
Obrázek 21 - Osový řez kontejnerem se znázorněním skutečných průměrů PK.....	37
Obrázek 22 - Uvedení použitých indexů na jednotlivých rozhraních.....	37
Obrázek 23 - Grafická ilustrace metody konečných objemů .....	47
Obrázek 24 - Výpočetní model vytvořený v Catii .....	48
Obrázek 25 - Příčný průřez výpočetním modelem z Catie .....	48
Obrázek 26 - Finální výpočetní model pro numerické řešení vytvořený v DesingModeleru ..	49
Obrázek 27 - Příčný průřez finálního výpočetního modelu se znázorněním rozdělení jednotlivých dílu.....	50
Obrázek 28 - Izometrický pohled na vygenerovanou objemovou síť na výpočetním modelu	51
Obrázek 29 - Detail výpočetní sítě v místě palivového koše a malé héliové mezery .....	51

Obrázek 30 - 2D teplotní pole [K] na horní čelní ploše řešeného modelu po provedení výpočtu prostupu tepla .....	58
Obrázek 31 - Znázornění hodnot přetlaků ve velké héliové mezeře vůči atmosférickému tlaku v [Pa] .....	60
Obrázek 32 - Detail přirozené konvekce na boční stěně zmenšeného modelu, barvy vektorů odpovídají hodnotám teplot v [K] .....	63
Obrázek 33 - Detail přirozené konvekce na boční stěně zmenšeného modelu, barvy vektorů odpovídají hodnotám skutečných rychlostí v [m/s] .....	63
Obrázek 34 - 2D teplotní pole v [K] na horní čelní ploše řešeného modelu po provedení výpočtu vedení tepla.....	66
Obrázek 35 - Izometrický pohled na 3D teplotní pole v [K] řešeného modelu po provedení výpočtu vedení tepla.....	66
Obrázek 36 - 2D teplotní pole [K] na horní čelní ploše řešeného modelu po provedení výpočtu vedení a sálání tepla .....	68

## 13 Seznam grafů

Graf 1 - Závislost hustoty hélia na teplotě při atmosférickém tlaku .....	53
Graf 2 - Závislost součinitele přestupu tepla na teplotě na povrchu kontejneru .....	54
Graf 3 - Průběh residuálů během výpočtu odvodu tepla prostupem .....	57
Graf 4 - Histogram teploty v malé héliové mezeře v [K].....	59
Graf 5 - Histogram teploty ve velké héliové mezeře v [K].....	59
Graf 6 - Histogram rychlosti přirozené konvekce ve velké héliové mezeře pro skutečný model 1 m.....	62
Graf 7 - Průběh residuálu během výpočtu odvodu tepla vedením .....	65
Graf 8 - Průběh residuálu během výpočtu odvodu tepla vedením a sáláním .....	67

## 14 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Výchozí hodnoty hustoty hélia při různých teplotách .....	53
Tabulka 2 - Výchozí hodnoty součinitele přestupu tepla na vnějším povrchu kontejneru při různých teplotách .....	54
Tabulka 3 - Konkrétní hodnoty průměrných teplot na daných rozhraních .....	58
Tabulka 4 - Hodnoty maximálního přetlaku v héliových mezerách v [Pa] .....	60
Tabulka 5 - Mezní hodnoty hustoty hélia v mezerách po ustálení výpočtu .....	60
Tabulka 6 - Konkrétní hodnoty průměrných teplot na daných rozhraních pro model 0,1 m... 61	
Tabulka 7 - Hodnoty odváděného tepelného toku z vnějšího povrchu kontejneru .....	61
Tabulka 8 - Hodnoty minimálních a maximálních rychlostí v héliových mezerách pro model 1m.....	61
Tabulka 9 - Hodnoty minimálních a maximálních rychlostí v héliových mezerách pro model 0,1m.....	61
Tabulka 10 - Fyzikální vlastnosti výchozího pevného fiktivního materiálu.....	64
Tabulka 11 - Hodnoty tepelných toků při určení finálního pevného materiálu .....	64
Tabulka 12 - Střední hodnoty teplot na daných rozhraních po nalezení fiktivního pevného materiálu.....	64
Tabulka 13 - Fyzikální vlastnosti hledaného fiktivního materiálu ekvivalentně nahrazující hélium.....	65
Tabulka 14 - Hodnoty tepelných toků pro porovnání prostupu tepla s vedením .....	65
Tabulka 15 - Střední hodnoty teplot na daných rozhraních po výpočtu odvodu tepla vedením a sáláním .....	67
Tabulka 16 - Porovnání tepelných toků všech vypočtených variant odvodu tepla .....	68

## **15 Seznam příloh**

Příloha 1 - Konstrukční výkres řešené části kontejneru

## **PŘÍLOHA č. 1**

### **Výkres kontejneru**



## Evidenční list

Souhlasím s tím, aby moje diplomová práce byla půjčována k prezenčnímu studiu v Univerzitní knihovně ZČU v Plzni.

Datum:

Podpis:

Uživatel stvrzuje svým podpisem, že tuto bakalářskou práci použil ke studijním účelům a prohlašuje, že ji uvede mezi použitými prameny.

<b>Jméno</b>	<b>Fakulta/katedra</b>	<b>Datum</b>	<b>Podpis</b>